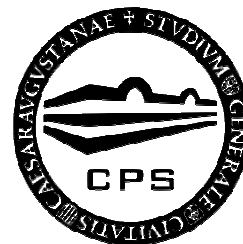




UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR



HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD EN REDES DE NUEVA GENERACIÓN

David Remón García

Ingeniería de Telecomunicación

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Junio 2010

Director: **José Ignacio Aznar Baranda**

Ponente: **Julián Fernández Navajas**



AGRADECIMIENTOS

Es el momento de dar las gracias, mirar atrás y dar las gracias.

A los que me han ayudado a realizar este trabajo. A Julián, Eduardo y sobre todo Josy, por la paciencia que ha tenido conmigo.

A mis amigos. Los que siempre están ahí y los que no ves pero sabes que sin ellos todo sería mucho más difícil.

A mi familia. La base de todo esto. La mayor parte del mérito es vuestro.

Yo no sería sin vosotros. Y que todo siga como mínimo igual, uno nunca sabe lo que se va a encontrar un lunes cualquiera.

Gracias.

HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE CAPACIDAD EN REDES DE NUEVA GENERACIÓN

RESUMEN

El panorama actual de las telecomunicaciones evoluciona hacia un punto de convergencia de tecnologías donde el término redes de nueva generación (*Next Generation Network*, NGN) toma un significado fundamental. Las NGN nacen con el objetivo de provisionar los servicios actuales sobre una infraestructura única, junto con el desarrollo de nuevas aplicaciones multimedia y servicios 4G, cuyos requerimientos son más exigentes. La gestión de la calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) adquiere un papel de relevancia por la necesidad de adaptarse tanto a las características propias de cada tipo de servicio, como a las necesidades individuales de los suscriptores. Las herramientas existentes de monitorización de la QoS deben adaptarse a las NGN y a sus elevados volúmenes de datos y tasas de transmisión.

En este proyecto se describe la QoS y los parámetros característicos que la definen. Más en concreto, se plantea el problema de la monitorización de la capacidad y se presentan algunas de las herramientas más actuales que la realizan como son *Pathrate* y *EQoSIM*. Se describe la metodología de análisis de estas herramientas y se aplica paso a paso sobre los métodos de estimación de capacidad.

La plataforma de simulación OPNET apoyada en la herramienta MATLAB, han permitido llevar a cabo el estudio del comportamiento de los métodos actuales de monitorización con el objetivo de manifestar sus puntos fuertes y débiles. Los resultados obtenidos han sido posteriormente utilizados como base para su optimización. Finalmente se ha establecido una comparación entre los métodos originales y sus optimizaciones y se han razonado las conclusiones más relevantes relacionadas con el análisis de herramientas de estimación de capacidad, así como de los métodos concretos objeto de estudio.

Este PFC ha sido desarrollado dentro del GTC (Grupo de Tecnologías de las Comunicaciones) en el Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de Zaragoza.

TABLA DE CONTENIDOS

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Las redes de nueva generación	2
1.2 Motivación	3
1.3 Objetivo del proyecto	3
1.4 Estructura de la memoria	4
Capítulo 2. Estado del Arte	5
2.1 La Calidad de Servicio y sus Parámetros Característicos	6
2.2 Métodos de Estimación de la QoS	9
2.3 Estimación de la Capacidad	14
2.3.1 Algoritmo <i>Packet Pair</i>	14
Capítulo 3. Metodología de análisis de herramientas de estimación de parámetros de QoS	19
Capítulo 4. Análisis de herramientas actuales de monitorización. Propuesta de optimización	22
4.1 Directrices. Selección de herramientas	23
4.2 Implementación y Simulación	23
4.2.1 Implementación, diseño de escenarios y pruebas	23
4.2.2 Características de los escenarios de simulación	26
4.2.3 Modularidad del sistema	29
4.3 Análisis: Limitaciones y propuesta de optimización	30
4.3.1 <i>EQoSIM</i>	30
4.3.2 <i>Pathrate</i>	31
Capítulo 5. Resultados de Simulación	35
1. Proceso de medida	36
2. Intrusividad	40
3. Error relativo	42
4. Tiempo de estimación	44
5. Fiabilidad	46

6. Análisis global.....	47
Capítulo 6. Conclusiones y Líneas de Trabajo Futuras	49
6.1 Conclusiones.....	50
6.2 Líneas de Trabajo Futuras.....	51
Anexos	53
Anexo I. Pathrate	54
Anexo II. Opnet	59
Anexo III. Otros resultados de simulación	69
Referencias Bibliográficas	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Las redes de nueva generación como elemento clave hacia la convergencia..	2
Figura 2. Ejemplo de variación del retardo en la transmisión de cuatro paquetes.....	8
Figura 3. Gestión de la QoS para IPTV.	9
Figura 4. Clasificación de los métodos de Estimación de la QoS.....	10
Figura 5. Esquema de una herramienta <i>Round Trip</i>	11
Figura 6. Esquema de una herramienta <i>One-Way</i>	12
Figura 7. Compromiso adoptado por una herramienta de estimación.	13
Figura 8. Par de paquetes circulando por el <i>narrow link</i>	14
Figura 9. Ejemplo de reducción del tiempo entre los paquetes del par.....	16
Figura 10. Ejemplo de aumento del tiempo entre los paquetes del par.....	17
Figura 11. Esquema del análisis realizado sobre <i>Pathrate</i> y <i>EQoSIM</i>	24
Figura 12. Esquema multinivel de un escenario de simulación en OPNET.....	24
Figura 13. Esquema de trabajo para la obtención de una estimación de capacidad.	25
Figura 14. Esquemas de red.	26
Figura 15. Ejemplo de un paquete en OPNET y campos configurados para una simulación.	27
Figura 16. Esquema de funcionamiento de <i>Pathrate</i>	32
Figura 17. Distribución multimodal de las estimaciones de capacidad realizadas mediante <i>Packet Pair</i>	33
Figura 18. Escenario de la prueba.	36
Figura 19. Resultados de la sesión de simulación.	37
Figura 20. Información transmitida por cada herramienta de estimación en función del grado de congestión del <i>narrow link</i>	40
Figura 21. Error relativo cometido por cada herramienta de estimación en función ... del grado de congestión del <i>narrow link</i>	42
Figura 22. Tiempo de estimación en función del grado de congestión del <i>narrow link</i>	44
Figura A.1. Distribución multimodal de las estimaciones de capacidad realizadas mediante <i>Packet Pair</i>	55
Figura A.2. Esquema de funcionamiento de <i>Pathrate</i>	56
Figura A.3. Relación jerárquica de niveles en OPNET Modeler.	61
Figura A.4. Correspondencia entre transmisor, receptor y canales.	62
Figura A.5. Ejemplo de <i>Node Model</i>	63
Figura A.6. <i>Process Model</i> de un nodo <i>router</i>	64
Figura A.7. Ejemplo de <i>Header Block</i> empleado en el <i>process model</i> del nodo fuente de la herramienta <i>Pathrate</i>	65
Figura A.8. Ejemplo de <i>Function Block</i> empleado en el <i>process model</i> de un <i>router</i>	66

Figura A.9. Enlace, compuesto de uno o más canales independientes.....	67
Figura A.10. Formato de paquete.	67
Figura A.11. Escenarios configurados en el nivel de red empleados en la simulación..	68
Figura A.12. Efectividad de medidas de capacidad en enlace a 90Mbps.....	70
Figura A.13. Efectividad de medidas de capacidad en enlace a 150Mbps.....	71
Figura A.14. Estimación de capacidad para 5 longitudes de ráfaga diferentes.....	72
Figura A.15. Escenario 1.	74
Figura A.16. Escenario 2.	74
Figura A.17. Resultado de simulación en Media Congestión.	75
Figura A.18. Resultado de simulación en Alta Congestión.	76
Figura A.19. Proceso de obtención de resultados en función de congestión.	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de descarga de vídeo diseñadas.	29
Tabla 2. Comparativa de la información inyectada por Pathrate y su evolución.	34
Tabla 3. Fiabilidad de cada herramienta.	46
Tabla 4. Comparativa de herramientas de estimación.....	47

GLOSARIO DE SIGLAS

ABW	Available Bandwidth
ADR	Average Dispersion Rate
BW	Bandwidth
CoV	Coefficient of Variation
DPI	Deep Packet Inspection
E2E	End-to-End
FB	Function Block
FIFO	First In, First Out
FSM	Finite State Machine
HB	Header Block
ICMP	Internet Control Message Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ISO	Organización Internacional para la Estandarización
ITU	International Telecommunication Union
MTU	Maximum Transmission Unit
NGN	Next Generation Network
PFC	Proyecto Fin de Carrera
PPTD	Packet Pair/Train Dispersion
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
SLoPS	Self-Loading of Periodic Streams
TOPP	Trains of Packet Pairs
VoIP	Voice over IP
VPS	Variable Packet Size probing

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Las redes de nueva generación

El actual y competitivo panorama de las comunicaciones 3G y el futuro escenario **4G**, están evolucionando hacia tecnologías de banda ancha y hacia la convergencia de redes y servicios. Al mismo tiempo, los nuevos modelos de negocio de las telecomunicaciones están siendo dotados con nuevas capacidades técnicas y comerciales, posibilitando el desarrollo de los emergentes servicios multimedia **0** que las **redes de nueva generación (Next Generation Network, NGN)** tratan de integrar [2], tal y como se aprecia en la figura 1. Estos servicios en auge no sólo presentan unos requerimientos más exigentes, sino que además éstos difieren en función del tipo de servicio ofrecido. La solución a esta problemática no pasa únicamente por el sobredimensionamiento [3], un recurso válido de no ser por sus elevados costes, principalmente en el dominio celular.

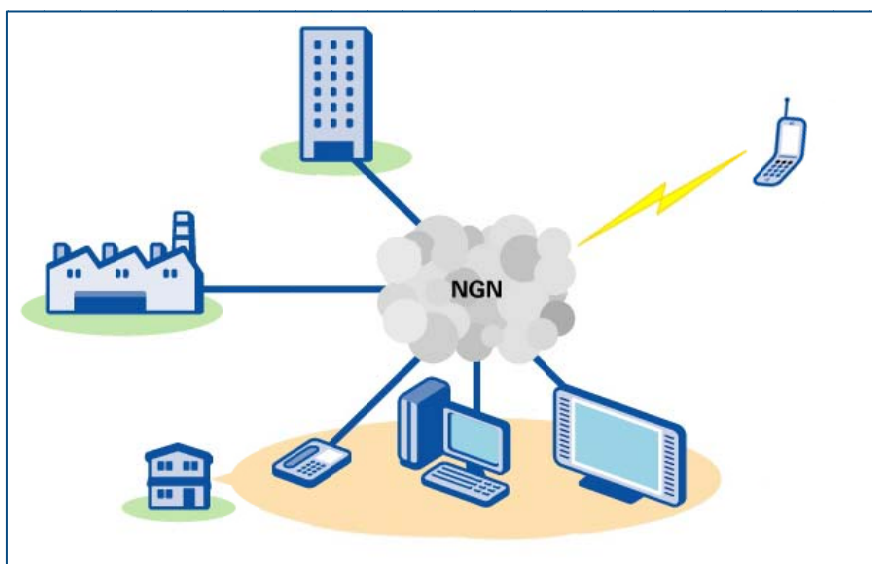


Figura 1. Las redes de nueva generación como elemento clave hacia la convergencia.

Los **operadores** de telefonía (Telco) pueden y deben plantearse nuevos modelos de negocio que les permitan mantener la competitividad mediante la evolución de sus redes acorde a las nuevas herramientas que la tecnología facilita. Esta evolución no sólo requiere el mantenimiento de los servicios tradicionales, sino también el desarrollo de una amplia gama de servicios en tiempo y coste efectivos: el “*single-service offer*” da paso al “*multi-service offer*”, donde cada suscriptor elige de entre la carta de servicios y es diferenciado del resto de suscriptores.

Uno de los requisitos que la oferta de nuevos servicios impone a las redes NGN es la adecuada gestión de sus recursos con el fin de optimizar su rendimiento. Para ello, una tendencia muy extendida hoy en día en lo que a gestión de recursos se refiere, consiste en la monitorización de los principales parámetros de **calidad de**

servicio (*Quality of Service, QoS*), tales como ancho de banda disponible, capacidad, *jitter*, retardo y tasa de pérdidas.

1.2 Motivación

Una red NGN, según la definición de la ITU (*International Telecommunication Union*), debe hacer uso de las Tecnologías de Calidad de Servicio [4]. Las herramientas actuales de monitorización de la QoS, y concretamente de la capacidad, no se consideran óptimas para su utilización en redes funcionando a elevadas tasas, y no permiten garantizar el compromiso entre la precisión de las medidas y la escalabilidad del sistema de monitorización.

Por todo ello es necesaria la realización de un análisis de los métodos existentes para la estimación de capacidad en una red; con tal fin se deberá llevar a cabo la recopilación de herramientas de estimación de capacidad y así, posteriormente, se seleccionarán aquellas cuyo uso sea apropiado en una red NGN. El análisis se fundamentará en la simulación para, de este modo, poner de manifiesto las limitaciones de estas herramientas de estimación.

1.3 Objetivo del proyecto

En este escenario se plantea el proyecto. El **objetivo principal** consistirá en la realización de un “análisis de los procedimientos actuales de estimación de la capacidad y el desarrollo de una herramienta extremo a extremo adaptada a los requerimientos de QoS de las nuevas redes y servicios multimedia”.

Con tal propósito, es necesario plantear una serie de **objetivos secundarios** necesarios para culminar esta tarea:

- Análisis de los parámetros que permiten una adecuada identificación de la capacidad de los enlaces.
- Estudio mediante simulación de las diferentes herramientas existentes para la estimación de la capacidad.
- Comparación de los resultados obtenidos. Análisis de las posibles optimizaciones introducidas.

1.4 Estructura de la memoria

Esta memoria está estructurada de la siguiente manera:

- Capítulo 1:** En este capítulo se detalla el marco de desarrollo del proyecto, la motivación, los objetivos y la estructura de la memoria.
- Capítulo 2:** Consta del estado del arte, la calidad de servicio y los parámetros que la definen, métodos de estimación de éstos, más concretamente de la capacidad. Algoritmo del *Packet Pair*.
- Capítulo 3:** En este capítulo se explica la metodología del análisis de herramientas de estimación de parámetros de QoS.
- Capítulo 4:** A lo largo de este capítulo se analizan las herramientas actuales de monitorización de capacidad y se propone una optimización.
- Capítulo 5:** Contiene los resultados de las pruebas de simulación.
- Capítulo 6:** Detalla las conclusiones y líneas futuras.
- Anexo I:** En este capítulo se explica con detalle el funcionamiento de la herramienta de estimación de capacidad *Pathrate*.
- Anexo II:** Contiene una introducción a la plataforma OPNET Modeler.
- Anexo III:** En este anexo se exponen otros resultados de simulación.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 La Calidad de Servicio y sus Parámetros Característicos

La definición del término Calidad de Servicio no es tarea fácil. Es un concepto muy global y se encuentra muy extendido en diferentes disciplinas técnicas. Se han ofrecido diversas definiciones; todas ellas son válidas, aunque suelen resultar muy generalistas. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), en la recomendación ITU – T E.800, la define como *“la totalidad de las características de un servicio de telecomunicaciones que determinan su capacidad para satisfacer las necesidades explícitas e implícitas del usuario del servicio”* [5].

Por otro lado, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) define la QoS, en la ISO 9000, como el *“grado en el que un conjunto de características inherentes satisface los requisitos”* [6]. Una matización a la norma anterior aparece en la ISO 8402, al decir que la QoS es el *“conjunto de características de una entidad que le confiere la aptitud para satisfacer las necesidades establecidas e implícitas”* [7].

Otros autores, orientando la definición anterior hacia una aplicación telemática, exponen que la Calidad de Servicio es *“el conjunto de las características tanto cuantitativas como cualitativas de un sistema distribuido necesarias para alcanzar las funcionalidades requeridas por una aplicación”* [8].

Es necesario realizar una diferenciación entre los términos QoS y QoE. La calidad de servicio se mide de manera objetiva a partir de parámetros puramente tecnológicos. Por otro lado, la ITU-T define la QoE como la aceptación global de una aplicación o servicio, tal como es percibida por el usuario final, donde esa aceptación puede estar influenciada por las propias expectativas del usuario o por el contexto en que se desarrolla [9].

Los parámetros de QoS admiten diversas clasificaciones. Se exponen los más relevantes en el contexto de este proyecto, agrupados en tres categorías:

- Parámetros relacionados con el **ancho de banda**, entre los que se encuentran la capacidad y el ancho de banda disponible (*Available Bandwidth*, ABW).
- Parámetros relacionados con el **tiempo**, como son el retardo y el *jitter*.
- Parámetros relacionados con las **pérdidas**, como la tasa de pérdidas.

Se presentan a continuación los cinco parámetros básicos que caracterizan la calidad objetiva del funcionamiento de una red [10]:

Capacidad

El término capacidad (o ancho de banda) se refiere a la máxima tasa de transferencia que se puede conseguir en un salto. Extendiendo este concepto, la capacidad de un camino extremo a extremo (**End-to-End, E2E**) será la máxima tasa de transferencia que el camino (*path*) puede alcanzar de terminal fuente a destino. Por tanto, la capacidad entre dos equipos vendrá determinada por la menor de las capacidades de todos los saltos que conforman el camino extremo a extremo [10]:

$$C = \min_{i=1,...,H} C_i \quad (1)$$

Donde C_i es la capacidad del salto i -ésimo y H es el número de saltos en el camino. El salto con menor capacidad del camino es el denominado “cuello de botella” (*narrow link*). Se mide en bits/segundo y está limitada por el ancho de banda físico del enlace y por el hardware electrónico y óptico de transmisor y receptor.

Ancho de Banda Disponible

En la red, los tráficos generados por las distintas aplicaciones y usuarios compiten entre ellos; es decir, los enlaces son compartidos. Así, se podrá definir el ancho de banda disponible como la capacidad libre (no utilizada) de un salto. Ésta queda libre para poder ser consumida por las nuevas aplicaciones que surjan en la red. Extendiendo la definición a un camino de varios saltos, el ancho de banda disponible en un camino extremo a extremo será el mínimo de los anchos de banda disponibles en todos los saltos [11].

$$A = \min_{i=1,...,H} A_i \quad (2)$$

Donde A_i es el ancho de banda disponible en el salto i -ésimo y H es el número de saltos en el camino. El salto con menor ancho de banda disponible es el denominado *tight link*. Éste no tiene por qué coincidir con el *narrow link*.

A diferencia de la capacidad, el ABW depende de la utilización de la red [11]. Por ello varía con el tiempo en función del tráfico existente. La capacidad también puede hacerlo, pero siempre a un ritmo mucho menor, manteniendo las mismas características durante un período más largo de tiempo. Por ello, la frecuencia de estimación de ambos parámetros será diferente, siendo mucho mayor la del ABW.

Retardo extremo a extremo

Es el tiempo que tarda un paquete en ir de fuente a destino; es la suma de los tiempos que tarda un determinado paquete en atravesar cada uno de los saltos. Este tiempo se compone de: tiempos de transmisión, tiempos de propagación, tiempos de procesado y tiempos de encolado.

Variación del retardo o *Jitter*

Mide la variación del retardo de los distintos paquetes. Es un parámetro muy a tener en cuenta para aplicaciones en tiempo real. Un ejemplo de *jitter* se presenta en la figura 2, donde se observa como el segundo paquete sufre una variación del retardo en la transmisión de 8 milisegundos.

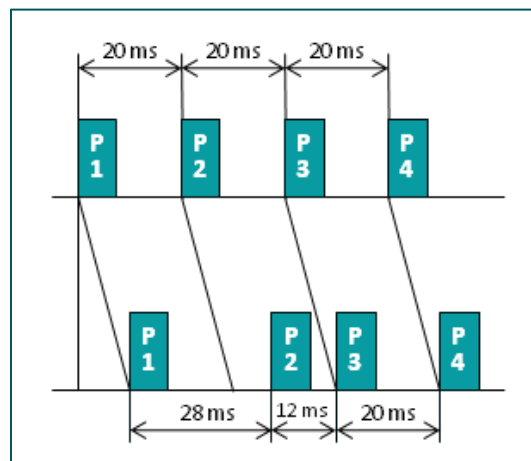


Figura 2. Ejemplo de variación del retardo en la transmisión de cuatro paquetes.

Tasa de Pérdidas

Es el porcentaje de paquetes perdidos en una comunicación respecto al total de paquetes enviados. Esta pérdida puede producirse como consecuencia de la congestión, por errores en el medio físico o por el descarte de paquetes generado en los *router* como medida para evitar alcanzar una situación de congestión [12].

En general, hay que tener en cuenta que dichos parámetros se pueden medir a distintos niveles de la arquitectura, es decir, se puede hablar de retardos, ancho de banda, *jitter* o pérdidas tanto a nivel de aplicación como a nivel de red. En la siguiente figura se muestra un ejemplo referente a la gestión de QoS para IPTV y la distribución de los parámetros que se miden en los niveles de red y aplicación. No existe un

consenso universal sobre qué parámetros medir en qué niveles de la arquitectura; la del ejemplo es sólo una posibilidad.

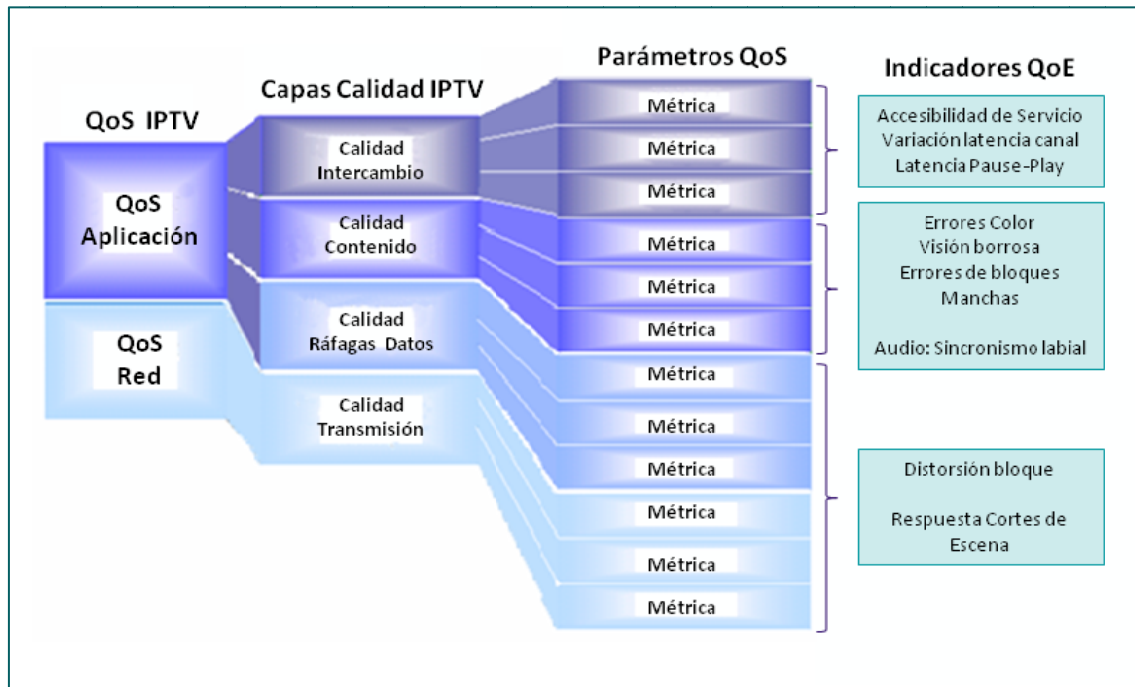


Figura 3. Gestión de la QoS para IPTV.

En este proyecto se entiende una estimación de QoS a nivel IP. Esta decisión permite independizar la estimación del tipo de tecnología física de las distintas redes que atraviesan los paquetes de medida.

Otros parámetros

Otros parámetros de QoS son la cuantificación de la disponibilidad de la red, es decir, la probabilidad de bloqueo, la congestión de la red o el tiempo de establecimiento de servicio. Son parámetros no menos importantes que los anteriores, pero no atañen a este PFC y por lo tanto no van a ser objeto de estudio.

2.2 Métodos de Estimación de la QoS

Existe un amplio abanico de métodos para llevar a cabo la estimación de la QoS. En la literatura se encuentran diversas clasificaciones analizando características de la calidad de servicio [12]. En la siguiente figura se observa un diagrama que resume algunas de estas clasificaciones:

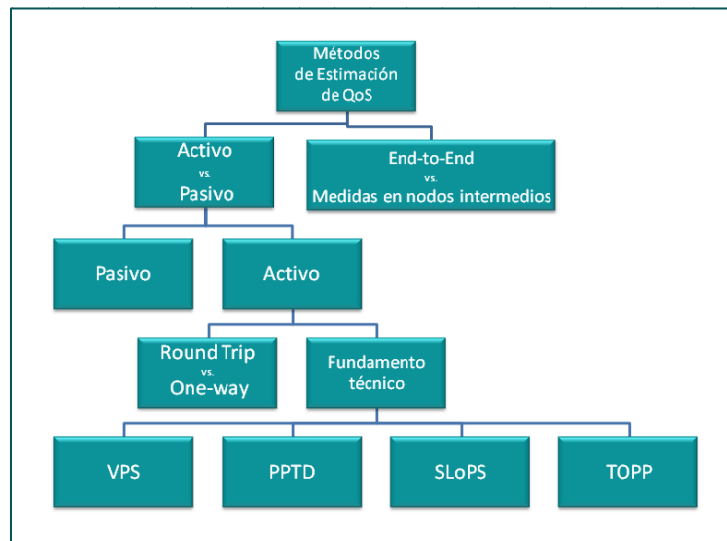


Figura 4. Clasificación de los métodos de Estimación de la QoS

Detallando la figura anterior, se observan diferentes clasificaciones:

- Métodos *End-to-End* vs. Medidas en nodos intermedios: Se considera una herramienta **de toma de medidas en los nodos intermedios** si realiza las operaciones de estimación y computación en los nodos intermedios pertenecientes a los operadores de la red. Las medidas obtenidas presentan una gran precisión por la potencia de estimación y procesado en los nodos. Sin embargo, por motivos de seguridad en la red, sólo los operadores las implementan y no recogen información extremo a extremo. Las técnicas realizadas **extremo a extremo** permiten conocer la capacidad entre los extremos de la comunicación y pueden ser desplegadas sin necesidad de acceder a información de nodos propietarios.
- Método de Estimación Pasivo vs. Activo: Las herramientas **pasivas** estiman las características de la red sin perturbar el estado de la misma; realizan sus cálculos midiendo el tráfico existente en la red, principalmente mediante técnicas basadas en DPI (*Deep Packet Inspection*). Por el contrario, las herramientas **activas** inyectan tráfico de prueba en la red para evaluarla. Los métodos activos se emplean cuando no hay tráfico en la red, pero presentan el problema de que el tráfico introducido puede tener un impacto negativo en las prestaciones recibidas por otros tipos de tráfico [13] haciendo necesario salvaguardar el binomio **Intrusividad - Precisión** de las medidas.

A su vez, los métodos activos se subdividen siguiendo diferentes criterios:

- Método *Round Trip* vs. *One-way*: Será **Round Trip** aquel que estime de forma conjunta ambos sentidos de la comunicación, mientras que se denominará **One-way** al método que mida cada sentido de la comunicación por separado [14].

Una herramienta basada en *Round Trip* presenta la ventaja de ser más completa, ya que mediante una ejecución estimará la QoS en el trayecto de ida y vuelta. Por el contrario, dada la asimetría que pueden presentar ambos caminos, es posible que la estimación de parámetros no sea acertada porque las características de uno de los caminos influyan sobre las del otro. Un ejemplo sería la estimación de un retardo de 40 ms en el trayecto de ida y 40 ms en el trayecto de vuelta a partir del reparto equitativo de 80 ms medidos mediante un método *Round Trip*, cuando en realidad el retardo en la ida sea de 71 ms y en la vuelta de 9 ms. Una herramienta *Round Trip* se esquematiza en la figura 5:

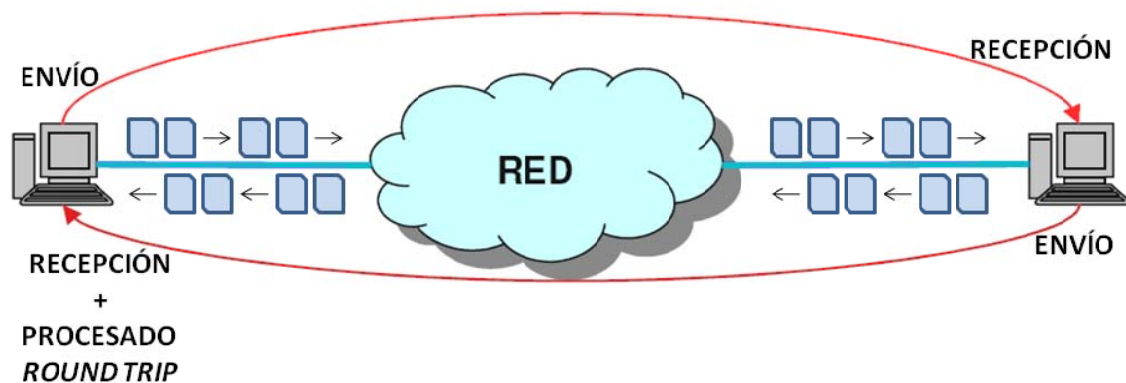


Figura 5. Esquema de una herramienta *Round Trip*.

Una herramienta *One-way*, al estimar cada *path* de forma independiente, resaltaré las diferencias de prestaciones existentes entre los dos caminos, pero deberá llevar a cabo dos realizaciones para obtener la medida completa. Un método *One-way* debe solventar también el problema de la sincronización entre ambos terminales para que la estimación sea adecuada. Se puede observar su funcionamiento en la siguiente figura:

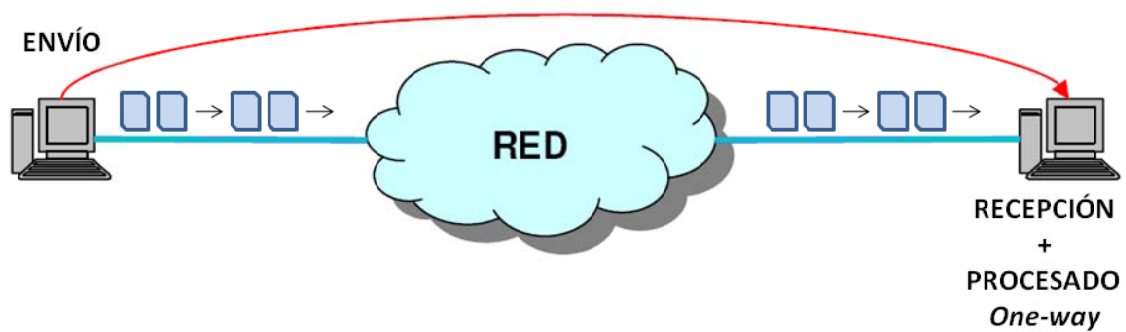


Figura 6. Esquema de una herramienta *One-Way*.

- Existen diferentes fundamentos técnicos y parámetros en los que están basados los métodos de estimación de QoS, principalmente aquellas herramientas orientadas a la medida de capacidad y ancho de banda disponible. De entre todos ellos cabe destacar los siguientes [13]:
 - Tamaño de paquete de prueba variable (*Variable Packet Size probing, VPS*). Se emplean en la monitorización del ancho de banda en saltos individuales.
 - Dispersión de pares o trenes de paquetes (*Packet Pair/Train Dispersion, PPTD*). Calcula la capacidad de un camino extremo a extremo.
 - Flujos periódicos de auto carga (*Self-Loading of Periodic Streams, SLoPS*). Estima el ancho de banda disponible extremo a extremo.
 - Trenes de pares de paquetes (*Trains of Packet Pairs, TOPP*), utilizados para el ancho de banda disponible extremo a extremo.

En el diseño de una herramienta de estimación de un parámetro, como puede ser el ancho de banda disponible o la capacidad, se tiene como objetivo fundamental la medición de tal parámetro. Con ese propósito se deben preservar otras características fundamentales para la validez de las medidas, tales como la precisión, la intrusividad y la complejidad en su obtención. La figura 7 ilustra este compromiso.

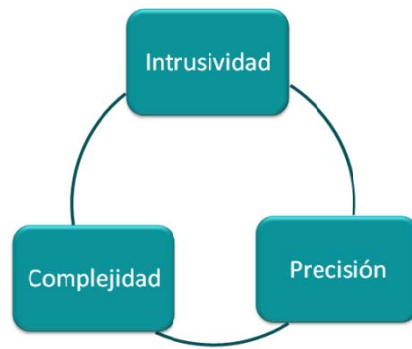


Figura 7. Compromiso adoptado por una herramienta de estimación.

- Intrusividad: Un método se considera **poco** o **muy intrusivo** según interfiera poco o mucho en la comunicación existente al llevar a cabo la estimación. Cuantos menos paquetes sean necesarios y menos recursos de la red se consuman menor será el ancho de banda consumido y mejor será el método.
- Complejidad: Se podrá considerar **muy complejo** o **poco complejo** en función de la carga computacional necesaria en la obtención del resultado. A menudo se relaciona con el tiempo necesario para dar la respuesta, es decir, la velocidad de convergencia del método.
- Precisión: La precisión de una herramienta, en este ámbito, viene establecida por el grado de **compromiso** existente entre intrusividad y complejidad.

Como se ha comentado anteriormente, este proyecto se centra en la estimación de la capacidad. La capacidad constituye uno de los parámetros cuya estimación y monitorización resulta de gran utilidad en numerosos escenarios, tal y como se ha relatado en la motivación de este PFC, en el Capítulo 1. Adicionalmente, muchos de los métodos de monitorización de ancho de banda disponible asumen la capacidad de los enlaces conocida, por lo que se requiere de mecanismos previos para la estimación de la misma.

2.3 Estimación de la Capacidad

Los nuevos modelos de red de comunicaciones, diseñados para la provisión de nuevos y atractivos servicios, conllevan el hecho de que sea primordial la gestión de los parámetros de QoS durante su utilización; la capacidad se ha convertido en un parámetro básico en este contexto.

Gran parte de las herramientas de monitorización de la capacidad de un *path* extremo a extremo disponibles hoy en día están basadas en la técnica PPTD. El fundamento teórico de la técnica de estimación mediante el envío de pares o trenes de paquetes es el denominado algoritmo del **Packet Pair** [15][16]. Esta práctica muestrea los retardos en el envío de paquete, observando sus tiempos de envío y llegada para la posterior evaluación de su dispersión.

2.3.1 Algoritmo *Packet Pair*

Este algoritmo se fundamenta en el hecho de que si dos paquetes atraviesan juntos el salto con menor capacidad, **narrow link**, saldrán del enlace con una dispersión de T segundos, desde la llegada del último bit del primer paquete hasta la del último del segundo:

$$T = \frac{L}{B} \quad (3)$$

Donde L es el tamaño del segundo paquete y B es el ancho de banda del **narrow link**. Una imagen intuitiva del proceso se observa en la figura 8:

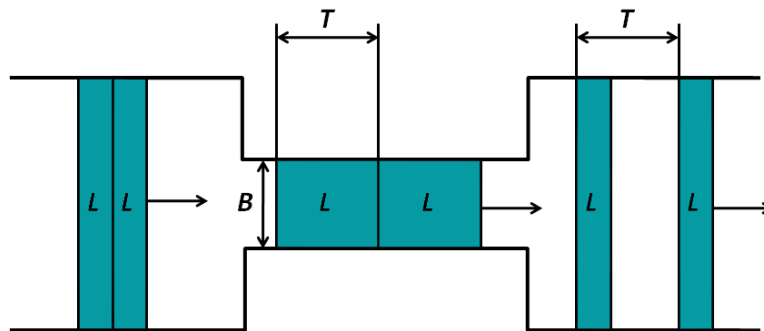


Figura 8. Par de paquetes circulando por el **narrow link**.

De esta manera, dado que es el enlace cuello de botella, no habrá ningún otro que presente una capacidad inferior, y el segundo paquete no se solapará con el primero, manteniéndose entre ellos esa diferencia temporal T . Así, se calcula la capacidad del cuello de botella como

$$B = \frac{L}{T} \quad (4)$$

Esta técnica es aplicable de diversas maneras. Generalizando, es posible enviar ráfagas de un número deseado k de paquetes, todos del mismo tamaño. En tal caso, la capacidad vendrá dada por la expresión:

$$B = \frac{(k-1) \cdot L}{t_k - t_1} \quad (5)$$

Donde k es el número de paquetes que componen la ráfaga, t_i es el tiempo de llegada del paquete, $i = 1, \dots, k$, y L sigue siendo el tamaño del paquete.

El algoritmo del *Packet Pair* considera que los paquetes atraviesan el *narrow link* consecutivamente y sin ningún paquete ajeno (interferente) entre ellos. Por tanto, si no hubiera tráfico en la red, salvo el inyectado por el propio algoritmo, la estimación sería perfecta. El objetivo principal de todo método de estimación de capacidad es la posibilidad de medirla adecuadamente sea cual sea la situación de tráfico en la red. Algunos estudios han puesto de relieve que el algoritmo del *Packet Pair* puede estimar la capacidad de forma no del todo precisa [16]. Se debe a la presencia de tráfico en la red, generando interferencia, o a la incapacidad de los equipos terminales para medir dispersión de manera exacta.

2.3.1.1 EFECTOS DEL TRÁFICO INTERFERENTE SOBRE *PACKET PAIR*

El tráfico interferente puede causar una imprecisión en los resultados obtenidos, en forma de **sobreestimación** o **subestimación** de la capacidad, dado que los paquetes que forman el par pueden resultar encolados en cualquier salto [16].

La sobreestimación de la capacidad tiene lugar cuando la dispersión entre el par de paquetes es menor que la que habría sido introducida por el *narrow link*; se ha producido una compresión del tiempo T entre los paquetes. Esto puede suceder siempre que el cuello de botella no sea el último enlace del camino. Si el primer paquete del par se encola en un enlace posterior al *narrow link*, mientras el segundo lo atraviesa más rápidamente que el primero, la dispersión entre ambos disminuye. Por tanto, al realizar el cálculo, la monitorización de la capacidad realizada será falseada, estimándola mayor de su valor real.

Una subestimación tendrá lugar cuando la dispersión entre el par de paquetes es mayor que la que habría sido introducida por el *narrow link* en ausencia de tráfico interferente; se ha producido una expansión del tiempo T entre los paquetes. Esta expansión puede ocurrir antes, durante o después del cuello de botella, y se debe a que el segundo paquete del par ha sido encolado: se ha colado un paquete entre ambos. En este caso:

$$B = \frac{L+L_j}{T} \quad (6)$$

Donde L_j es el tamaño del paquete interferente.

2.3.1.2 EFECTOS DEL TAMAÑO DE LOS PAQUETES DE PRUEBA EN *PACKET PAIR*

En la aplicación de un método basado en *Packet Pair*, ambos paquetes del par de prueba (**probe packets**) deben ser del mismo tamaño, ya que paquetes de diferente tamaño tienen retardos de propagación diversos. Si el segundo fuera más pequeño que el primero su tiempo de transmisión sería siempre menor que el del primero. Como consecuencia, atravesaría los enlaces más rápido que el primero y acabaría por eliminar la separación del cuello de botella [15][16]. Un ejemplo en el que se reduce el tiempo entre la llegada de los dos paquetes puede observarse en la figura 9.

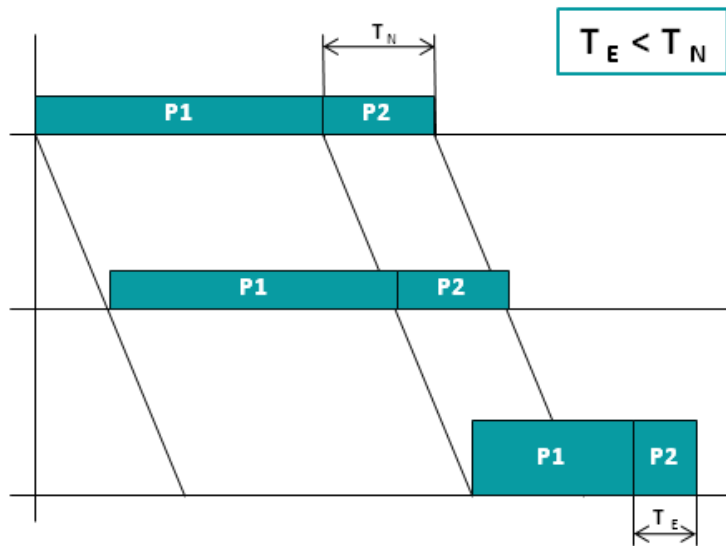


Figura 9. Ejemplo de reducción del tiempo entre los paquetes del par.

De igual modo, si el primer paquete fuera más pequeño que el segundo, viajaría más rápido e iría continuamente incrementando la separación entre ellos. Se muestra

un ejemplo de este aumento del tiempo entre llegadas de los paquetes del par en la figura 10.

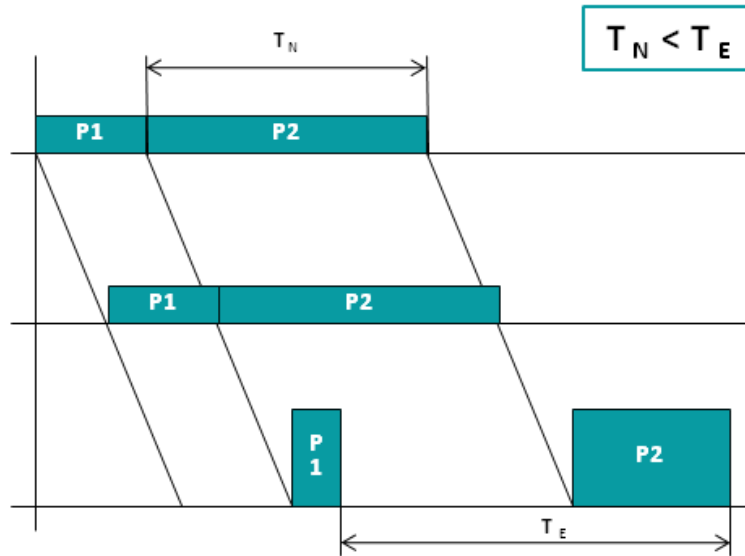


Figura 10. Ejemplo de aumento del tiempo entre los paquetes del par.

Un paquete interferente (*jammer*) se introducirá entre los dos paquetes del par siempre que llegue tras el primer *probe* y antes que el segundo (dispone del tiempo $T = L/C$ que tarda en llegar al nodo el segundo paquete de prueba). Por tanto, disminuyendo el tamaño del segundo paquete (y por ende el del primero también) decrecerá la probabilidad de subestimación.

Por otro lado, reduciendo el tamaño de los paquetes de prueba respecto a los *jammer*, en caso de que se cuele un paquete en mitad del par, la magnitud de la subestimación aumentará. Se observa en la fórmula anterior (6), ya que cuanto mayor sea L_j más se desviará el cálculo de la capacidad.

El efecto contrario, el denominado sobreestimación, es más pronunciado cuando los paquetes del par son de tamaño menor que los paquetes interferentes. Se produce cuando el primer paquete es encolado mientras llega el segundo. Esto sucede porque el nodo está sirviendo al paquete anterior (será un *jammer*, un paquete existente en la red). Así, la probabilidad de encolar el primer paquete aumenta cuando el tamaño de los paquetes de prueba disminuye respecto al de los *jammer*. Si ambos son encolados durante el tiempo suficiente en un enlace intermedio, el tiempo entre ellos se reduce a 0, y por tanto la capacidad que estimaré será la del salto de menor capacidad posterior al momento de dispersión nula [16].

2.3.1.3 SUPUESTOS IMPLÍCITOS POR LA TÉCNICA *PACKET PAIR*

La técnica del *Packet Pair* asume unos supuestos con alta probabilidad de cumplirse, pero que no necesariamente deben hacerlo [14]:

- La disciplina seguida por las colas situadas en los *router* existentes en la red y atravesados por los paquetes probe será **FIFO** (First In, First Out).
- El método de retransmisión empleado por esas colas en los *router* será *store-and-forward* (esperan a recibir el último bit de cada paquete antes de comenzar a reenviarlo).
- La resolución del reloj en los equipos es tal que permite realizar medidas temporales lo suficientemente precisas [17].

Estos supuestos suelen cumplirse en Internet, aunque es posible que no suceda así en algún caso.

2.3.1.4 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN EXISTENTES

Existen numerosos trabajos publicados sobre la estimación activa *end-to-end* de la capacidad en una red o serie de enlaces. Uno de los primeros en aparecer fue *bprobe* [18], que hace pasar las medidas temporales de los pares de paquetes a través de un filtrado de unión e intersección. *Cartouche* [17] se sirve de trenes de paquetes de diferente tamaño para su funcionamiento. Otro método que se encuentra en la literatura es *Sprobe*, el cual se caracteriza por ser un método rápido que se implementa únicamente en el terminal fuente [19]. El fundamento de *Nettimer* [20] es igualmente *PPTD*, y procesa las medidas mediante una sofisticada técnica estadística llamada *kernel density estimation*. *ImTCP* [21] calcula la capacidad a partir del ABW. Diferentes herramientas se basan en la teoría del *Packet Pair* y difieren en la forma de filtrar los resultados (herramienta diseñada por Lai [15], *Tracerate* [22], *CapProbe* [16]). El objetivo de estas técnicas de filtrado consiste en determinar qué muestras son indicadoras del ancho de banda en el *bottleneck link* y cuáles no [20].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE QoS

El **análisis** de una **herramienta de estimación** de un parámetro es un proceso complejo que requiere una actuación ordenada y metódica. Se subdivide en fases y para ejecutar cada una de ellas es condición *sine qua non* haber completado la anterior; de lo contrario el trabajo pierde rigor. Cada fase requiere una tarea y no siempre es posible plasmar todo el trabajo realizado en una publicación. Por ejemplo, el estudio de la literatura existente es fundamental a la hora de realizar un diseño, no resulta sencillo documentarlo y no por ello carece de importancia. En este capítulo se describe brevemente el proceso que comprende el análisis, comparación y optimización de procedimientos, y más concretamente las pautas llevadas a cabo en el análisis de las herramientas actuales de estimación de la capacidad de una red, junto con su implementación y optimización. Esta metodología de trabajo no se deriva de forma casual; ha sido extraída de la literatura, tras la lectura de numerosas publicaciones, algunas de las cuales exponen con claridad estas pausas a seguir [23][16][22][15].

El primer paso consiste en la **recopilación de información**. El proceso comienza con la identificación de los aspectos más genéricos de los trabajos y publicaciones relacionados con el tema de interés para, paulatinamente, ir centrándose en detalles más específicos acerca de las diferentes herramientas actuales en el ámbito de la gestión de la QoS. Esta tarea permite comprender el funcionamiento de los métodos y algoritmos de estimación de parámetros que facilitan esa gestión. Deben figurar aspectos comunes a los diversos parámetros y su estimación, así como los relativos únicamente a la capacidad.

Tras conocer el panorama actual de la estimación de la QoS y de la capacidad es necesario realizar una serie de suposiciones y establecer las **directrices** que las herramientas deben cumplir a fin de mantener el compromiso presentado en la figura 7. Los criterios deben ser establecidos con fundamento, justificando cada decisión. A continuación se escogen las **herramientas** que mejor se ajusten a las directrices seleccionadas. Es importante que la selección sea representativa de toda la muestra y que los métodos en estudio no hayan quedado obsoletos frente a las nuevas tecnologías.

Por último, las herramientas de estimación son **analizadas** en profundidad, estudiándolas tanto en situaciones de congestión intermedia, como en situaciones críticas, con el fin de extraer los puntos fuertes y débiles de cada una. Para realizar este análisis es necesario implementar el método e introducirlo en un escenario de simulación de una red genérica. Esta implementación permite investigar los efectos que el tráfico interferente tiene en la dispersión de los paquetes del *Packet Pair*, evitando cuestiones como cambios de ruta, enlaces multicanales o precisión y resolución del reloj, que pueden distorsionar las estimaciones.

A partir de la construcción del escenario de red, la implementación de la herramienta de estimación y el diseño de un banco de pruebas es posible obtener las principales métricas de interés, que permiten valorar la validez de las herramientas. Analizando los resultados se ponen de relieve aquellas carencias o **limitaciones** en los métodos estudiados. En este punto se puede llevar a cabo una **optimización**, buscando mejorar alguno de los aspectos que presenten mayores limitaciones, evitando deteriorar el resto de características de la herramienta analizada.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE HERRAMIENTAS ACTUALES DE MONITORIZACIÓN. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN

4.1 Directrices. Selección de herramientas

El objetivo fundamental de este PFC consiste en la estimación de la **capacidad extremo a extremo** en una red genérica, a partir de la aplicación de **herramientas activas**. La aplicación de técnicas activas permite que la estimación de la capacidad se lleve a cabo de forma independiente al tipo de tráfico existente en la red y de sus características. La configuración empleada en el método de estimación se basa en técnicas **one-way** por la asimetría de algunos de los accesos a Internet existentes, la cual implica que un método *round trip* pueda introducir imprecisiones al ponderar las medidas para los trayectos ascendente y descendente.

Tras el análisis de las herramientas de estimación que cumplen estos requisitos, el abanico de posibilidades se reduce. Finalmente se han escogido los siguientes dos métodos la herramienta **EQoSIM** [14] desarrollada por el GTC de la Universidad de Zaragoza y el método **Pathrate** [22]. Ambos están basados en los mismos conceptos si bien los fundamentos de su implementación difieren.

En primer lugar se ha evaluado el método *EQoSIM*, dando continuidad al trabajo realizado con anterioridad en la Universidad de Zaragoza [12]. Esta técnica se caracteriza porque apenas introduce tráfico, no alterando las condiciones de la red.

A continuación se ha examinado *Pathrate*. Pertenece al grupo de herramientas de estimación de capacidad más actual [16] y es uno de los métodos de referencia en la medida de capacidad extremo a extremo [10]. Trabaja inyectando un considerable número de paquetes de prueba en la red, filosofía antagónica a la de EQoSIM.

4.2 Implementación y Simulación

4.2.1 Implementación, diseño de escenarios y pruebas

El objeto de esta sección es la descripción de la metodología llevada a cabo para la el análisis concreto de las herramientas de estimación seleccionadas, *EQoSIM* y *Pathrate*. La figura 11 resume el proceso de análisis:

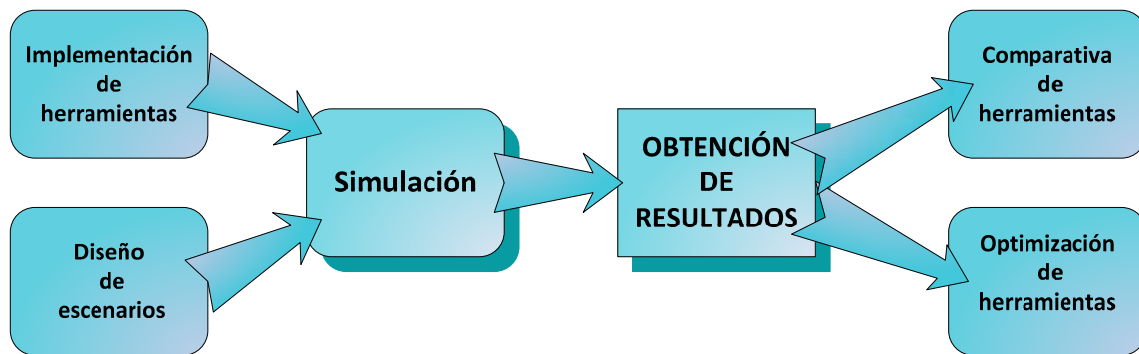


Figura 11. Esquema del análisis realizado sobre *Pathrate* y *EQoSIM*.

Dos plataformas basadas en las herramientas OPNET y MATLAB servirán de base sobre la que llevar a cabo el proceso: OPNET se encarga de gestionar las tareas relacionadas con simulación del tráfico en red mientras que MATLAB funciona como procesador de datos. OPNET es una herramienta multinivel que facilita el diseño de redes, conjugando elementos predefinidos con otros diseñados por completo, junto con su simulación. La siguiente figura muestra un esquema en el que se muestra la configuración multinivel de un escenario ejemplo realizado con OPNET.

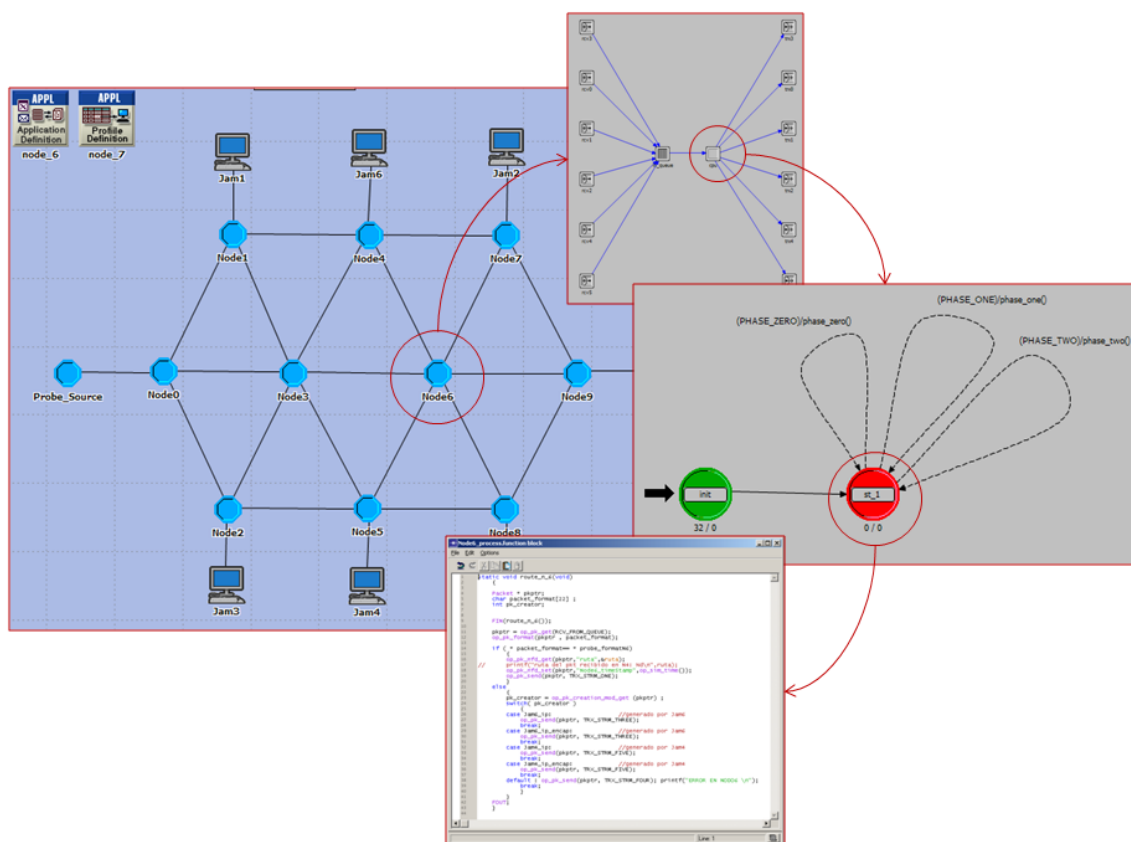


Figura 12. Esquema multinivel de un escenario de simulación en OPNET.

Para estimar capacidad, la herramienta en análisis determina la cantidad y distribución de los paquetes que deben ser enviados. OPNET se encarga de la transmisión y recepción de los paquetes, extrae los parámetros temporales requeridos por la herramienta de estimación y los pone a disposición de MATLAB, que los procesa y convierte en valores de capacidad. En la figura 13 se observa el proceso: OPNET lleva a cabo la **adquisición de medidas temporales** mientras que MATLAB las procesa, realizando la **traslación de unidades temporales a unidades de capacidad**.

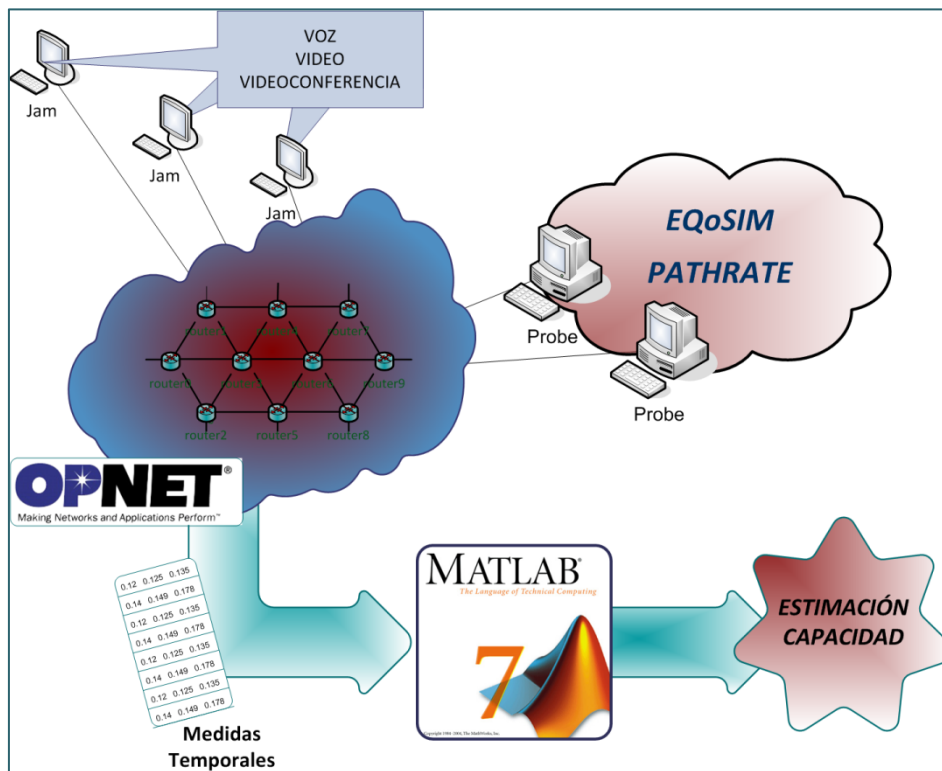


Figura 13. Esquema de trabajo para la obtención de una estimación de capacidad.

Con el fin de lograr una batería adecuada de resultados, cada herramienta (*EQoSIM* y *Pathrate*) se ejecuta en dos terminales y estima la capacidad de la red sobre escenarios con diferentes parámetros (tráfico interferente de diversa índole, elección dinámica del *path* que atraviesan los paquetes de prueba, nivel de congestión, etc.). A continuación se detallan las características de los diferentes escenarios de simulación y su comportamiento, mientras que una explicación ampliada de la plataforma OPNET puede encontrarse en el Anexo II.

El objetivo de este capítulo es la descripción de las herramientas implementadas y de las pruebas llevadas a cabo para su análisis. Los resultados de este análisis se encuentran en el Capítulo 5 y en el Anexo III.

4.2.2 Características de los escenarios de simulación

Se han diseñado dos esquemas de red que han supuesto la base sobre la que se han construido los diferentes escenarios. A partir de la variación de los parámetros se han analizado las características que influyen decisivamente en la estimación de la capacidad. Ambos esquemas se muestran en la figura 14.

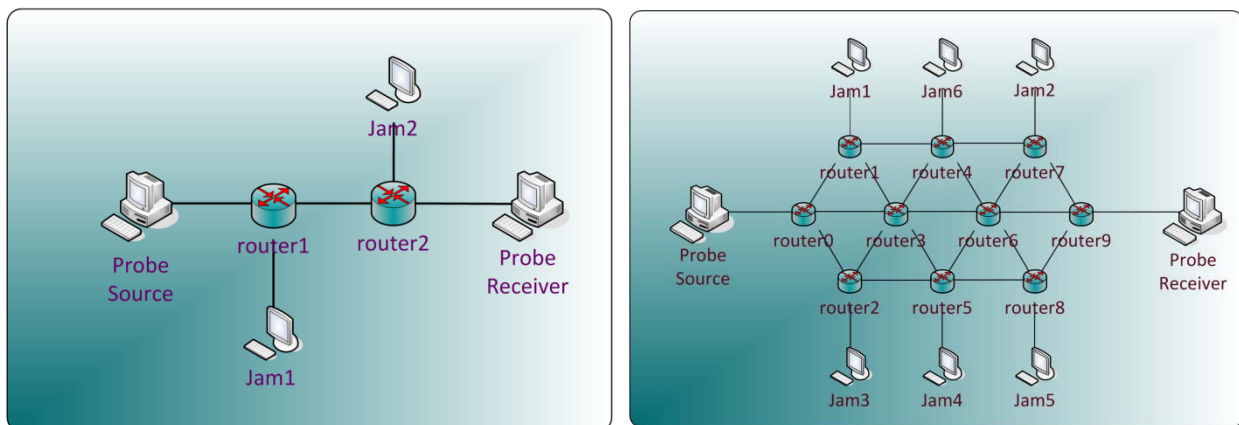


Figura 14. Esquemas de red.

4.2.2.1 ELEMENTOS

Cada escenario consta de varios elementos que intervienen en la comunicación y que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Nodo.** Realiza las funciones de enrutamiento de los paquetes (*router*) o bien actúa de extremo en una comunicación (terminal). A través de los terminales se conectan a la red los usuarios; los terminales en que se lleva a cabo la estimación de capacidad se denominan *probe* y el resto son considerados terminales *jammer*.

Cada *router* realiza la función de recepción y envío del paquete por la salida correspondiente después de realizar su procesamiento.

- **Enlace.** Lleva a cabo la interconexión de dos nodos. Los empleados en este PFC han sido configurados como bidireccionales.
- **Paquete.** Consta de diversos campos y cabeceras, necesarios para su enrutamiento y para el funcionamiento de la herramienta de estimación. El tamaño de estos paquetes no depende de los campos de que disponga, sino

que viene determinado por el método de estimación (en caso de que sea un paquete *probe*) o por la aplicación para la que es destinado (caso de ser un paquete *jammer*), siempre dentro de los límites establecidos por la tecnología y los protocolos empleados. En la siguiente figura se muestra un paquete de OPNET con diversos campos.



Figura 15. Ejemplo de un paquete en OPNET y campos configurados para una simulación.

4.2.2.2 FUNCIONALIDADES

Con el fin de analizar las herramientas de estimación, éstas han sido implementadas en los denominados nodos *probe*, tanto fuente como destino. Así mismo se han diseñado e implementado los nodos *router*, paquetes y enlaces, además de todas las funcionalidades necesarias para la correcta transmisión. De estas funcionalidades, cabe destacar por su especial relevancia:

- **Marcado temporal (*timestamp*).** Cuando un paquete de prueba atraviesa un nodo, ya sea terminal o *router*, se marca el paquete con el instante temporal de llegada al nodo. Estas “impresiones” son las que empleará cada herramienta para llevar a cabo la estimación de capacidad posteriormente.

El marcado temporal es un recurso existente en la red y empleado por las herramientas de estimación de parámetros de QoS. La impresión del instante en que el paquete llega al terminal destino es una tarea de la que se encarga la herramienta de estimación implementada en éste. En cambio, el *timestamp* en *router* intermedios es una opción empleada por diversos métodos de estimación y que es preciso que esté activada en la red. Viene determinada por el protocolo IP [24]; cada paquete que debe ser marcado contiene un *flag* al que se asigna el valor 0 en caso de que se escriban únicamente los *timestamp* y no la dirección IP del nodo que lo lleva a cabo.

El tiempo juega un papel fundamental en el proceso de estimación de la capacidad. Existen una serie de suposiciones que es necesario tener en cuenta para la validación de las herramientas de estimación de la capacidad y estrechamente relacionada con parámetros temporales.

1. Los enlaces actuales alcanzan tasas del orden de Gbps, lo que implica que las diferencias temporales entre los paquetes de prueba de nuestras estimaciones sean muy pequeñas. Por tal motivo, en el

Capítulo 2 se ha considerado un supuesto implícito requerido por el *Packet Pair* una resolución suficientemente buena del reloj de los equipos que intervengan en el proceso.

2. Otra suposición que debe hacerse es la existencia de sincronismo entre las máquinas; es un problema abierto sobre el que se ha escrito abundante literatura. En este PFC no se aborda tal cuestión. Existen métodos de sincronización entre equipos en una red empleando distintos protocolos [25]. Un ejemplo es la sincronización mediante el envío de un paquete ICMP con la opción “*request timestamp*” activada; de esta forma se solicita el instante temporal actual a los nodos a los que se haya conectado el equipo para su sincronización. Sin entrar en debate acerca de la precisión de estos métodos, se asume la existencia de sincronismo para efectuar la medición de tiempos de envío y recepción de paquetes de prueba [25].
- **Enrutamiento** (*routing*). Cada paquete, tanto de prueba como *jammer*, es recibido por un *router*, almacenado en una cola y enviado por la salida correspondiente en función de su ruta y nodo destino.

Una opción diferente de enrutamiento podría habilitarse en un futuro. Consistiría en un enrutamiento dinámico en el que las rutas se asignaran en función de los parámetros de QoS que presente la red. Es lo que se denomina *QoS routing*. Por ejemplo, el parámetro de QoS que más afecta a los juegos en red es el *jitter*, por lo que en un sistema *QoS routing* los paquetes de aquellos usuarios que juegan en red son transmitidos por el enlace que presenta menor *jitter*.

Para terminar de configurar el escenario y la red sobre la que se analizarán *EQoSIM* y *Pathrate* es necesario definir el tráfico interferente que existirá en la red.

4.2.2.3 TRÁFICO INTERFERENTE

El tráfico interferente o *jammer* estará formado por todos aquellos paquetes que circulen por la red y no sean paquetes de prueba, cuya finalidad es la estimación de la capacidad, sino simplemente hacer uso de recursos disponibles y congestionar la red. Es generado por usuarios que se conectan a la red desde los terminales *jammer*. Los contenidos de la red cuyo estudio es el objeto de este PFC son principalmente contenidos multimedia de voz y vídeo utilizados por los servicios más actuales. Los usuarios que se conecten a esta red ejecutarán servicios de esta índole. Por ello,

aprovechando las posibilidades de configuración de aplicaciones de OPNET, se ha optado por hacer uso de las aplicaciones que incorpora la herramienta en lugar de crear los flujos desde su nivel de aplicación. De esta manera el tráfico *jammer* viene generado por aplicaciones de Voz sobre IP (**VoIP**, **Voice over IP**), **descarga de vídeo y videoconferencia**. A continuación se observa una tabla con las características de los diferentes modelos de descarga de vídeo diseñados; todos ellos emplean una velocidad de generación de fotogramas de 30 *frames*/segundo.

	Duración	Ancho de banda utilizado
News	5 minutos	5 Mbps
Documentary	55 minutos	10 Mbps
Music	5 minutos	2.6 Mbps
Cine	2 horas	10 Mbps
Sport	90 minutos	5 Mbps

Tabla 1. Aplicaciones de descarga de vídeo diseñadas.

Mediante la introducción de este tráfico interferente específico aumenta el grado de realismo y la situación sobre la que se evalúan las herramientas se asemeja en mayor grado a la realidad existente en la Red Rubens.

4.2.3 Modularidad del sistema

Una característica muy importante en el diseño de las herramientas, es la **modularidad**. Cada herramienta (*Pathrate* y *EQoSIM*) ha sido programada como un módulo individual que se puede introducir en los terminales *probe* para estimar la capacidad, de tal manera que sobre el mismo escenario y las mismas condiciones se puede ejecutar una herramienta o la otra con la única diferencia de introducir un bloque u otro.

Aquí se han descrito las características más relevantes de los escenarios. Más información puede encontrarse en los anexos.

4.3 Análisis: Limitaciones y propuesta de optimización

4.3.1 *EQoSIM*

4.3.1.1 DESCRIPCIÓN

La técnica empleada en *EQoSIM* para la estimación de la capacidad aplica el método basado en *Packet Pair* más teórico sin modificación. Para su implementación ha sido necesaria la configuración de varios parámetros a partir de medidas empíricas experimentales:

- En primer lugar es necesario conocer el tamaño de los paquetes de prueba que serán inyectados en la red. Experimentalmente, y de acuerdo con la filosofía del método, se ha comprobado que la dimensión de paquete de prueba óptimo es de 200 Bytes (ver Anexo III). De este modo se minimiza la intrusividad hacia las comunicaciones existentes. Otro motivo por el que elegir un paquete de tamaño pequeño es el siguiente: cuanto menor sea el paquete de prueba, en caso de producirse una subestimación, mayor será ésta (ya que el paquete *jammer* que se introduce entre los paquetes del par es de mayor tamaño que éstos); sin embargo, la probabilidad de que tenga lugar la subestimación será menor. Este tamaño es asimismo considerado óptimo por otros métodos de monitorización de capacidad [16][26].
- En segundo lugar se establece la longitud de las ráfagas a utilizar, es decir, el número de paquetes enviados de forma consecutiva. Experimentalmente se ha constatado que la efectividad del método es la misma utilizando ráfagas de longitud variada. Por ello se enviarán ráfagas de dos paquetes con el objetivo de minimizar intrusividad. Una explicación más detallada de la longitud óptima de ráfaga se encuentra en el Anexo III.

4.3.1.2 LIMITACIONES

Tras realizar pruebas de simulación para el análisis de *EQoSIM* se ha observado que es un método rápido y poco intrusivo, pero que presenta una considerable carencia de robustez. El grado de fiabilidad es reducido, y disminuye conforme aumenta la congestión en la red, ya que se incrementa la probabilidad de que un paquete se introduzca entre los dos paquetes del par de prueba. Por este motivo se ha buscado implementar una optimización de la herramienta que conserve la filosofía del original y presente una mejora en fiabilidad y robustez sin empeorar por ello el resto de características.

4.3.1.3 OPTIMIZACIÓN

Según la teoría del *Packet Pair*, una estimación de capacidad será errónea cuando uno o ambos paquetes que realizan la medida se encolan en un *router*, generalmente debido a la presencia de tráfico interferente. Si se encola el primero (o ambos, siempre que el tiempo entre ellos disminuya) se produce una sobreestimación, y si se encola el segundo (o ambos, siempre que el tiempo entre ellos aumente) tiene lugar una subestimación de la capacidad.

El objetivo de este método se basa en detectar si una estimación de capacidad es una sobreestimación; de este modo puede ser descartada, eliminando así una de las dos causas de error en la medida como es la sobreestimación. La filosofía del filtrado es que si el tiempo entre dos paquetes de un par de prueba se reduce en algún salto posterior al *narrow link* se generará una sobreestimación. Para llevarlo a cabo, los paquetes de prueba son marcados en cada *router* con el instante en que salen de éste. El terminal *probe* destino, en el cual se ejecuta la herramienta, procesa los paquetes y descarta aquellas estimaciones no válidas. Dado que a partir de un par se extrae una muestra de capacidad, si éste es descartado no es posible dar un resultado. Con el fin de evitar esta situación, a la vez que se mejora la robustez respecto al método original, se enviarán 1000 pares de paquetes de prueba, y la capacidad resultante se calculará mediante un histograma de las estimaciones de capacidad válidas de las 1000 iniciales.

Se observa cómo el método busca mejorar su precisión a costa de ser más intrusivo y llevar a cabo un procesamiento más complejo; se conserva el compromiso comentado en el Capítulo 2.2.

4.3.2 Pathrate

4.3.2.1 DESCRIPCIÓN

Esta herramienta de monitorización [27] está basada en PPTD (igual que *EQoSIM*). El proceso de estimación consta de tres fases. La “Fase 0” o preliminar lleva a cabo un estudio inicial del *path* mediante una medición rápida; si ésta es considerada válida se acepta como capacidad resultante. En caso contrario se procede a la ejecución de las fases 1 y 2, con un estudio detallado del *path*.

Un esquema de su funcionamiento se muestra en la siguiente figura:

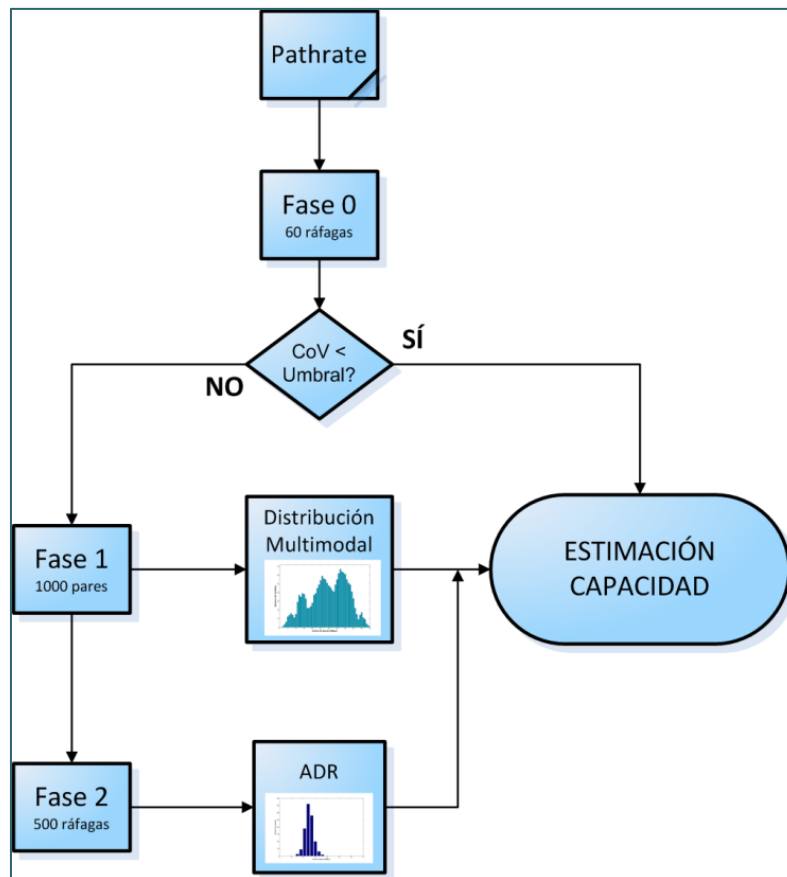


Figura 16. Esquema de funcionamiento de *Pathrate*.

El objetivo de la “Fase 0” consiste en que, en caso de que haya poca congestión en la red, la obtención del ancho de banda del *narrow link* se realice en poco tiempo, minimizando la intrusividad. En caso de no ser posible se llevan a cabo las dos siguientes fases, con su consiguiente envío de información, incrementando la intrusividad del método.

En la “Fase 1” *Pathrate* descubre los modos de distribución de las estimaciones de ancho de banda mediante el envío de pares de paquetes, uno de los cuales será la capacidad que se desea desenmascarar. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de histograma resultado de la ejecución de la Fase 1; se puede observar como las medidas se agrupan en cinco modos, situados aproximadamente en 7, 14, 26.5, 38 y 50 Mbps.

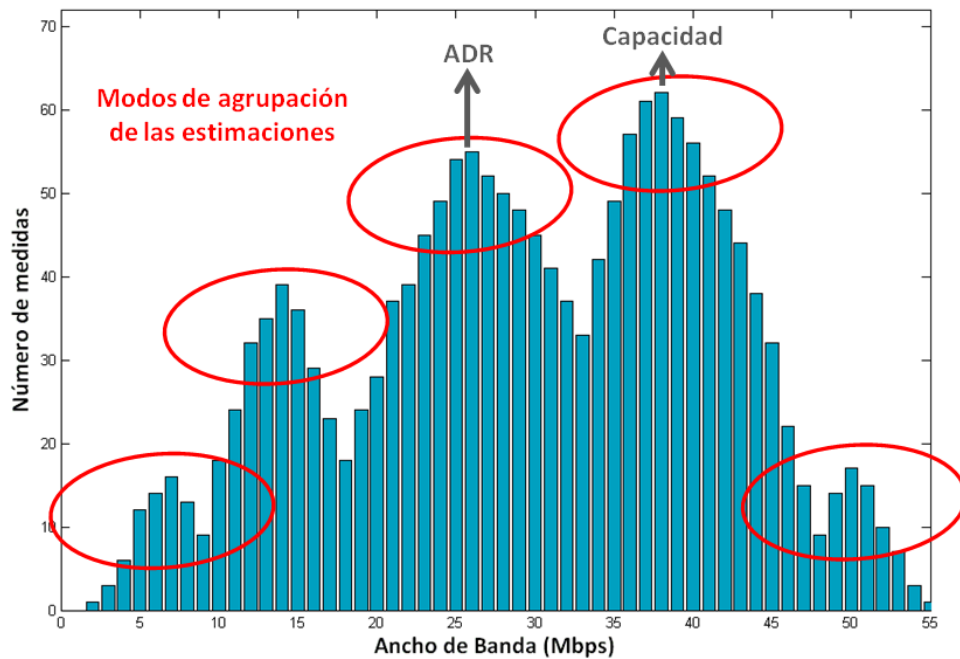


Figura 17. Distribución multimodal de las estimaciones de capacidad realizadas mediante *Packet Pair*.

Mediante la “Fase 2” la herramienta determina cuál de esos modos de agrupación de las estimaciones de capacidad es la capacidad del *narrow link*. Lo lleva a cabo estimando el ADR (*Average Dispersion Rate*): la capacidad del *narrow link* será el modo estimado con mayor frecuencia, siempre y cuando sea superior al ADR. El ADR es estimado enviando ráfagas de paquetes del tamaño máximo permitido por la red antes de la fragmentación. En el ejemplo de la Figura 17, el ADR obtenido mediante la “Fase 2” serían 26 Mbps, y la capacidad estimada mediante *Pathrate* 38Mbps. Una descripción más detallada del método se encuentra en el Anexo I.

4.3.2.2 LIMITACIONES

Mediante la reproducción simulada del método se ha constatado que *Pathrate* entrega un estudio detallado de los diferentes modos en que se agrupan las estimaciones de capacidad realizadas mediante el algoritmo del *Packet Pair*. El método supone un envío ingente de información por la red, resultando muy intrusivo. El estudio de los modos aporta información prescindible a la hora de calcular la capacidad, por lo que no es rentable introducir tal cantidad de datos para su obtención.

Pathrate envía 52.351 paquetes en cada ejecución, lo que da una idea de la cantidad de recursos que consume. Los archivos de tiempos generados resultan

extensos, su procesamiento aumenta la complejidad operacional del método y por ende el tiempo necesario para obtener la estimación de capacidad.

4.3.2.3 OPTIMIZACIÓN

La evolución implementada de *Pathrate* presenta tres fases equivalentes a las del método original, pero un número de paquetes enviados diverso. Se puede observar en la tabla siguiente la diferencia en número de paquetes y en cantidad de información inyectada en la red por cada uno de los dos métodos:

	<i>Pathrate</i>		Evolución de <i>Pathrate</i>	
	Paquetes	Información	Paquetes	Información
Fase 0	351	4.01 Mb	80	0.92 Mb
Fase 1	2000	15.64 Mb	3000	23.46 Mb
Fase 2	50000	572.20 Mb	1500	17.17 Mb
Total	52351	591.85 Mb	4580	41.55 Mb

Tabla 2. Comparativa de la información inyectada por *Pathrate* y su evolución.

La filosofía del método se conserva, ya que la función de cada fase es la misma que en la versión original; la intrusividad es reducida considerablemente. Tras la modificación de la fase preliminar es necesario variar también el umbral del coeficiente de variación. Experimentalmente se determina que sea superior a su valor en la ejecución original, puesto que al aumentar la cantidad de pares enviados lo hace también su variabilidad.

El resultado es una herramienta con una robustez similar al método original, pero en un tiempo y con una complejidad operacional notablemente inferior. A su vez, los recursos consumidos, tanto ancho de banda de la red como utilización de memoria y de cálculo, son inferiores.

Se observa como ambas herramientas de estimación son de filosofía opuesta y sus optimizaciones convergen en un punto común.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se presentan los resultados más relevantes derivados del estudio de las herramientas de estimación del parámetro “Capacidad” seleccionadas, así como de las mejoras propuestas. Tal y como se ha explicado en el capítulo 2, los parámetros de referencia son la **intrusividad**, **error relativo**, **tiempo invertido en la estimación** y **fiabilidad de las medidas**. El análisis comparativo de las herramientas ha resultado fundamental para la obtención de conclusiones de los métodos propuestos.

1. Proceso de medida

En primer lugar se presenta el proceso de estimación de capacidad llevado a cabo en un escenario concreto a modo de caso de uso sobre un escenario concreto, una tasa de transferencia y un grado de congestión determinado. La figura 18 muestra la configuración del escenario en el que se han llevado a cabo las pruebas. En esta situación, los cuatro métodos analizados están sometidos a las mismas condiciones de congestión y capacidad en el *path*, es decir, han sido reproducidos en las mismas condiciones de simulación.

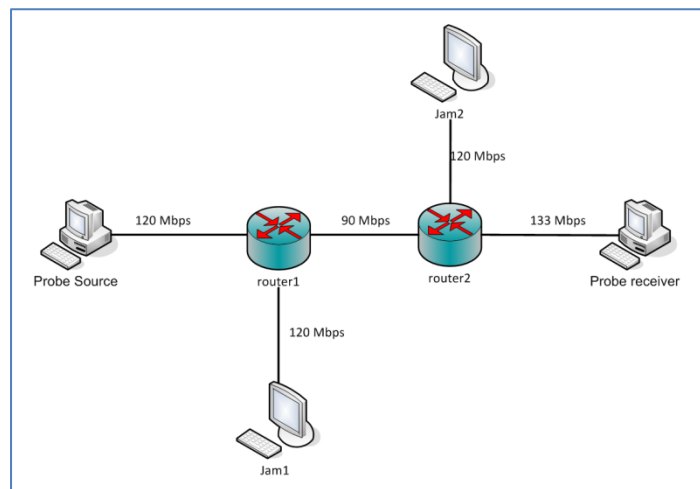


Figura 18. Escenario de la prueba.

La duración de la simulación es de dos horas. Como se ha comentado anteriormente, dado que el tiempo de convergencia de la estimación de *EQoSIM* y su

optimización es menor que en el caso de *Pathrate* y *Pathrate* optimizado, el número de medidas realizadas es mayor. Es importante mencionar que no se deben enviar simultáneamente paquetes pertenecientes a dos ejecuciones diferentes del método, puesto que los resultados se distorsionarían; por este motivo la separación entre dos pruebas de *EQoSIM* es de un minuto y la existente entre dos de *Pathrate* de cinco minutos. El *narrow link* presenta una capacidad de 90 Mbps y una congestión “media-alta”, que en media es cercana al 65 %. En la figura 19 se muestran las estimaciones realizadas por cada uno de los cuatro métodos.

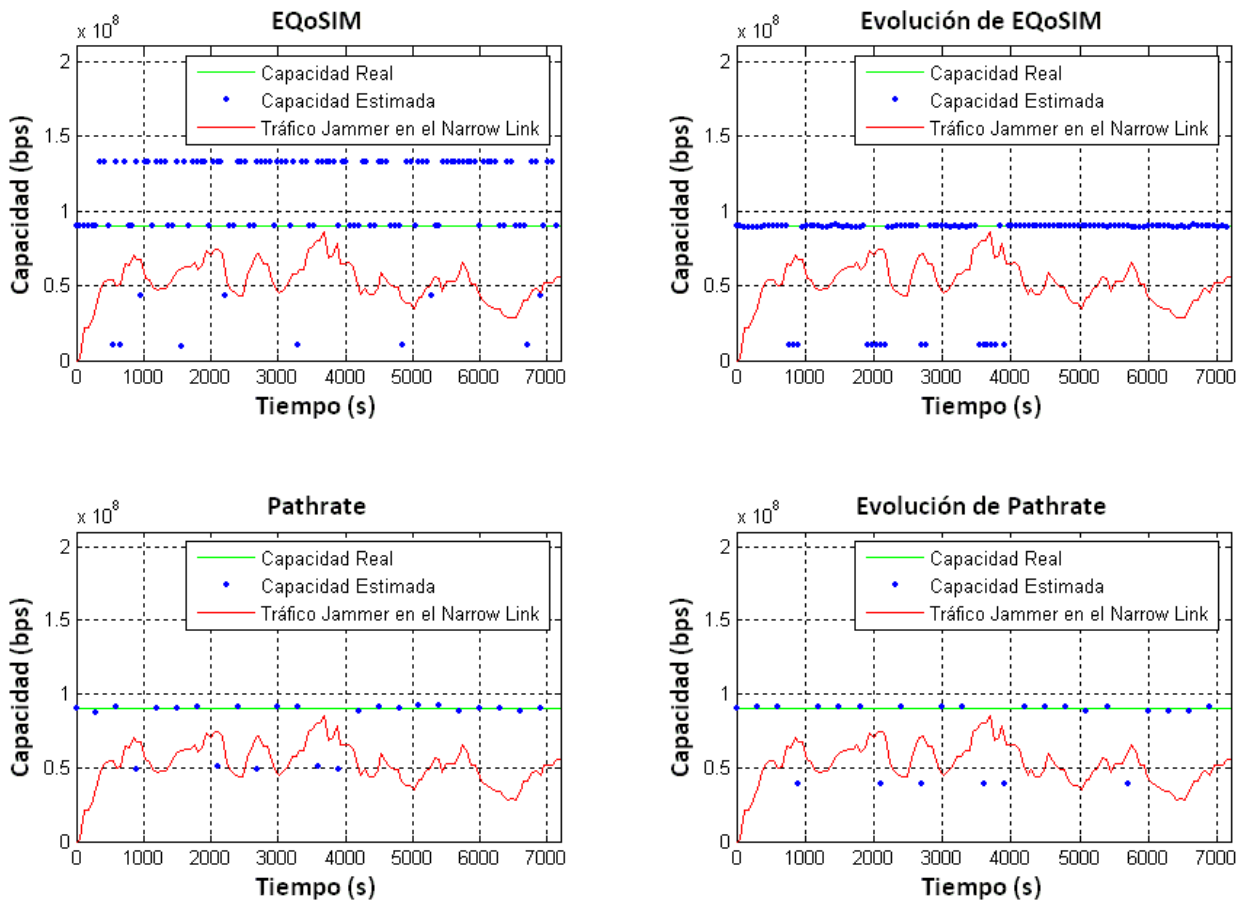


Figura 19. Resultados de la sesión de simulación.

Se observa en la figura la tasa de envío real de paquetes en el *narrow link* en color verde, la ocupación debido al tráfico interferente en color rojo y las estimaciones de capacidad en color azul. Se aprecia como la frecuencia de estimación es mayor en el caso de *EQoSIM* que en el de *Pathrate*. Las principales consecuencias extraídas de la figura anterior son las siguientes:

- En los instantes en que el grado de congestión es mayor se cometen más frecuentemente errores en la estimación. El problema que más afecta a *EQoSIM* es la sobreestimación, mientras que la optimización de *EQoSIM* anula su efecto mediante la realización del filtrado de paquetes; por el contrario, *Pathrate* únicamente se ve afectado por la subestimación. El valor de las sobreestimaciones que tienen lugar al ejecutar *EQoSIM* tiende a 133Mbps, capacidad del enlace posterior al *narrow link*. El motivo reside en que al menos el primer paquete del par de prueba se encola en el *router2*, de manera que se reduce el tiempo entre paquetes y se ajusta al correspondiente a la capacidad del último enlace.
- Comparando los resultados de *Pathrate* y su optimización se observa como este último presenta un error en cada estimación mayor que el método original, puesto que sus muestras erróneas se desvían en proporción mayor respecto al valor real que las de *Pathrate*. Igualmente, se observa cómo la fiabilidad de *Pathrate* optimizado es algo menor, en esta sesión, que en el caso original, puesto que presenta una estimación errónea más que la herramienta original.

Para la obtención del resto de resultados, se han realizado simulaciones sobre los dos escenarios diseñados. La configuración de los aspectos más relevantes puede resumirse en los siguientes puntos:

- Las tasas de transmisión de información de los nodos *jammer* está comprendida entre los 60 los 220 Mbps, infiriendo distintos niveles de congestión. Se ha considerado “congestión baja” a una situación en la que el tráfico interferente consume alrededor del 20% de la capacidad del *narrow link*, “congestión media” alrededor del 60% y “congestión alta” entre el 75 u 80%. La interferencia es generada por usuarios conectados a la red. Éstos llegan mediante un proceso de *Poisson* con un tiempo entre llegadas que responde a una distribución exponencial. Ejecutan las aplicaciones descritas anteriormente de voz sobre IP, descarga de vídeo y videoconferencia.
- Las medidas realizadas cubren un intervalo de congestión que va desde el canal vacío hasta una saturación del *narrow link* cercana al 90%.
- Es importante señalar que los resultados de las estimaciones corresponden al promediado de varias simulaciones para cada valor de congestión. Esto permite dar validez a las medidas e independizar las estimaciones de la tasa de transmisión.

2. Intrusividad

La figura muestra la intrusividad de cada una de las herramientas de estimación de capacidad en función del grado de congestión en el *narrow link*. Se define intrusividad como la interferencia que cada herramienta produce en las comunicaciones existentes en la red, y es referida a los recursos empleados de la red, ya sea ancho de banda o recursos computacionales. En este caso se mide la cantidad de información que cada herramienta inyecta en la red, ya que es una forma de estimar la cantidad de recursos consumidos en enlaces y nodos intermedios. La relación entre esta cantidad y el grado de congestión del *narrow link* puede observarse en la figura 20.

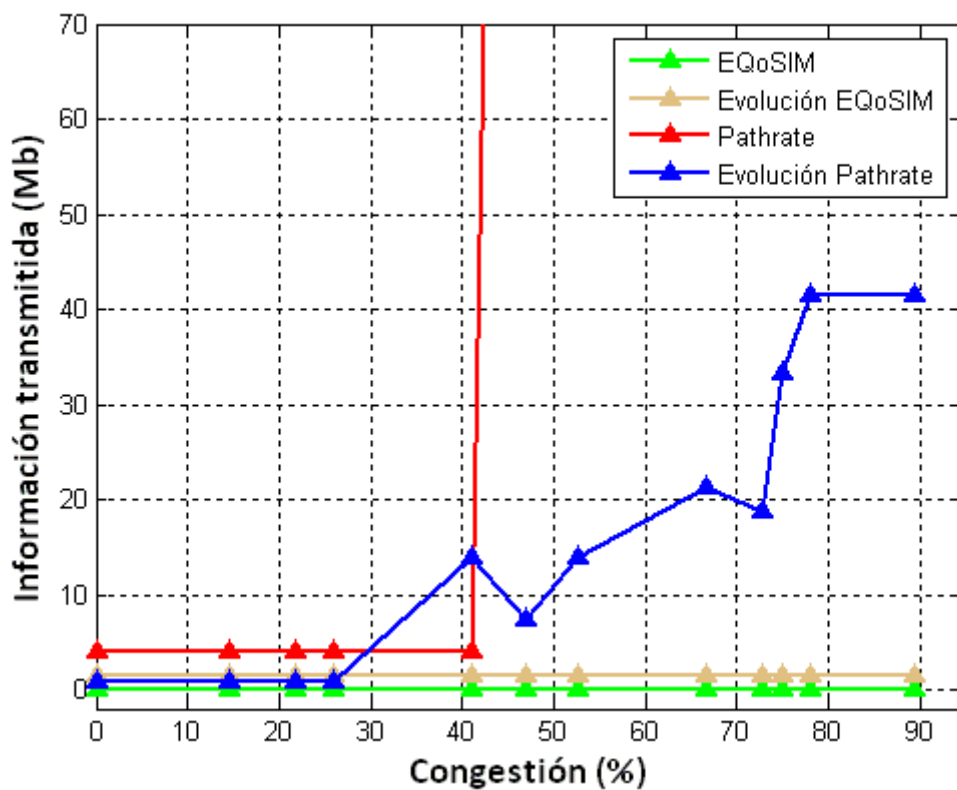


Figura 20. Información transmitida por cada herramienta de estimación en función del grado de congestión del *narrow link*.

La figura anterior muestra la cantidad de información en Mb, que cada herramienta transmite para llevar a cabo la estimación de capacidad. Las líneas verde y naranja corresponden a EQoSIM y su evolución, respectivamente; la roja representa la

información enviada por *Pathrate* y la azul por su optimización. La curva asociada al método *Pathrate* presenta valores de información transmitida superiores a los 70 Mb en toda la segunda mitad de la gráfica, por lo que desaparece de ésta. Se ha representado de esta manera con el fin de observar con detalle el resto de las conductas. En la caracterización de la intrusividad no se ha tenido en cuenta el tiempo empleado en el envío de la información puesto que éste es abordado más adelante, siendo relacionados al final del capítulo.

Pueden observarse dos comportamientos claramente diferenciados, en función de que el método de estimación pertenezca a la familia de *EQoSIM* o a la de *Pathrate*. Las principales conclusiones que se derivan de la figura son:

- En el caso de *EQoSIM* y su optimización se advierte que la información transmitida por la red para llevar a cabo la estimación de capacidad permanece constante para cualquier grado de congestión en el *narrow link*, y por tanto en la red; es decir, la intrusividad de estas dos herramientas no depende del tráfico interferente. Este hecho es algo lógico ya que en su funcionamiento envía siempre el mismo número de paquetes.
- En el caso de *Pathrate* y su evolución, se aprecia cómo la información inyectada en la red es mayor cuanto mayor es el grado de congestión en el *narrow link*: cuanto más tráfico *jammer* circula por la red más interferencia genera el método. Este hecho se justifica ya que a medida que aumenta el tráfico interferente deja de ser suficiente la “Fase 0” para la obtención del valor de capacidad, siendo necesario el envío de los paquetes de las Fases 1 y 2. El grado de congestión en el *narrow link* a partir del cual se ejecutan “Fase 1” y “Fase 2” depende del umbral escogido. Para congestión muy baja se envía únicamente la información de la “Fase 0” y cuando el grado de interferencia aumenta, tanto *Pathrate* como *Pathrate* optimizado transmiten los paquetes de sus tres fases.
- Analizando la cantidad de información de monitorización transmitida por la red de forma absoluta, en el caso de *EQoSIM* es mínima, resultando un poco mayor en el caso de su optimización. En ambos casos, la cuantía de paquetes enviados es pequeña en relación a la capacidad de las redes de nueva generación, suponiendo una intrusividad asumible. En el caso de *Pathrate* y su optimización, esta cantidad de datos inyectados puede ser considerada grande, principalmente en casos de alto grado de congestión.

3. Error relativo

Los resultados que se presentan en esta figura, se han obtenido de las mismas pruebas de simulación llevadas a cabo en la figura anterior. La medición del error en las estimaciones se realiza con el fin de evaluar la precisión de la herramienta. El error relativo será la desviación, en términos porcentuales, de la estimación de capacidad proporcionada por la herramienta respecto a la capacidad real. El error en una herramienta de estimación basada en el envío de paquetes proviene de las subestimaciones y sobreestimaciones, explicadas en el Capítulo 2, que tienen lugar cuando un paquete interferente se cuela en mitad del *packet pair* o cuando los paquetes de prueba sufren encolamientos en los *router*. La figura siguiente muestra la relación entre el error relativo de cada método y el grado de congestión del *narrow link*.

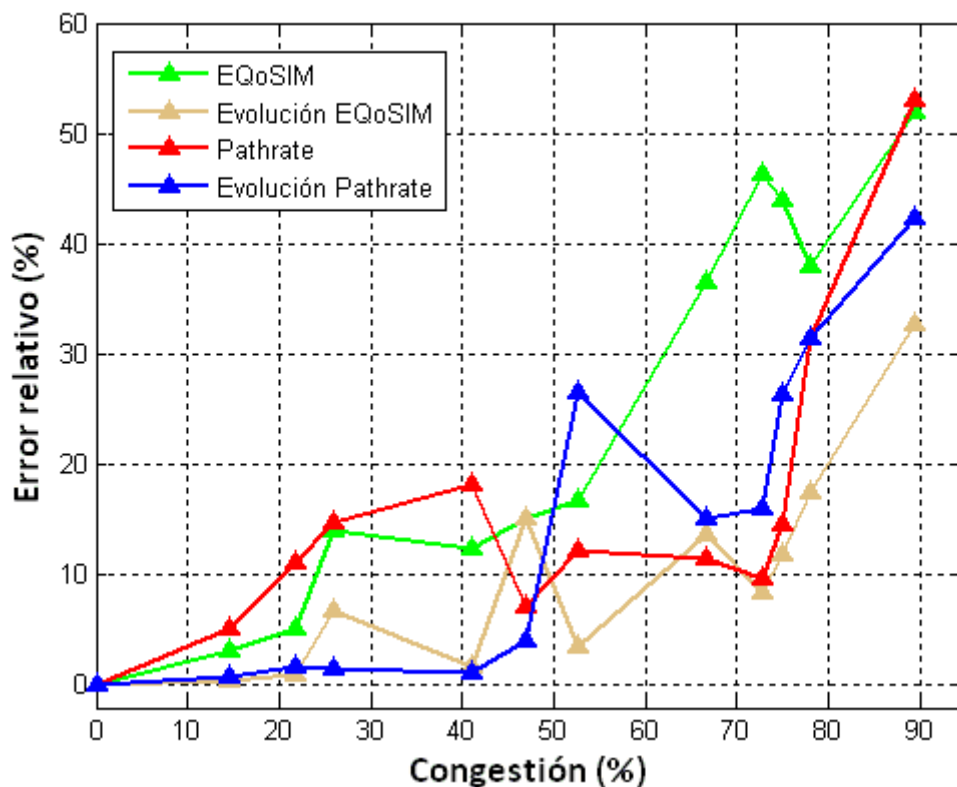


Figura 21. Error relativo cometido por cada herramienta de estimación en función del grado de congestión del *narrow link*.

La figura anterior muestra el error relativo de cada herramienta en la estimación de capacidad. Las líneas verde y naranja corresponden a *EQoSIM* y su

evolución, respectivamente; la roja representa el error cometido por *Pathrate* y la azul por su optimización. Las principales consecuencias derivadas de este análisis son:

- En primer lugar se observa una elevada variabilidad en los resultados. El error relativo es un parámetro que depende en gran medida de la capacidad de los enlaces posteriores al *narrow link*; cuanto mayor sea la diferencia entre la capacidad del enlace crítico y la de los enlaces siguientes, mayor valor alcanzará el error relativo en la estimación. Por otro lado, observando el error en las estimaciones de las diferentes herramientas se advierte que, a pesar del promediado, no se ha logrado independizar la medida de la capacidad de los enlaces en el escenario de simulación, ya que los resultados no siguen un patrón de convergencia. Las dependencias respecto a la capacidad y enlaces posteriores del *narrow link* ocasionan la alta variabilidad en el error de estimación.
- En líneas generales, el error en la estimación aumenta conforme lo hace el grado de congestión; es decir, cuanto mayor sea la cantidad de paquetes interferentes existentes en la red mayor será la probabilidad de aparición de una sub o sobreestimación. Cuando la red se encuentra sin tráfico la precisión en la estimación de todas las herramientas es máxima, sin error o con error despreciable.

4. Tiempo de estimación

Los escenarios y pruebas realizadas son los mismos que en el caso anterior. El objetivo de este análisis es medir el tiempo que tarda cada herramienta en proporcionar una estimación de la capacidad, independientemente de la fiabilidad y error relativo de ésta, y de este modo poder compararlo con el empleado por los otros métodos. Este tiempo está a su vez compuesto por otros dos: el tiempo de transmisión de los paquetes y el tiempo de procesamiento de éstos en el terminal destino. El resultado del análisis puede observarse en la figura 22.

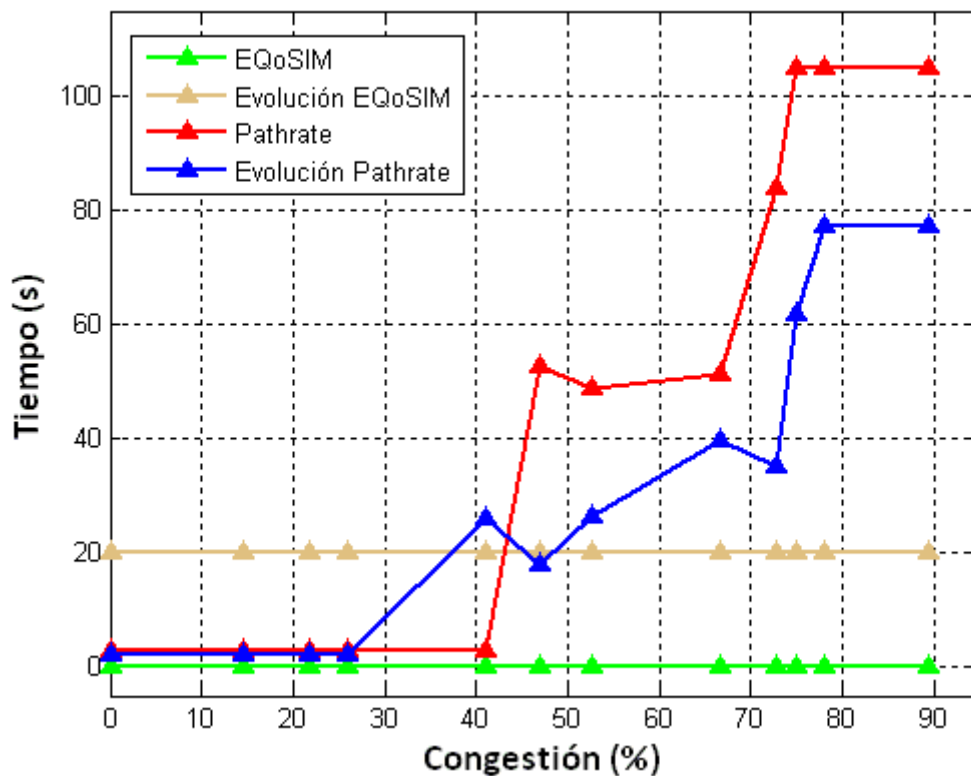


Figura 22. Tiempo de estimación en función del grado de congestión del *narrow link*.

En la figura se muestra la relación entre el tiempo empleado por cada herramienta para dar una estimación y el grado de congestión del *narrow link*. Las líneas verde y naranja corresponden a *EQoSIM* y *EQoSIM* mejorado, respectivamente; la roja representa el tiempo consumido por *Pathrate* y la azul por su optimización.

Las principales consecuencias extraídas de la figura son las siguientes:

- En el caso de *EQoSIM* y su optimización, se observa que el tiempo empleado en obtener una estimación de capacidad permanece constante. Esto sucede porque, al igual que se observa en la figura 20, el número de paquetes transmitidos para la obtención de una muestra de capacidad no varía. El tiempo empleado en proporcionar una estimación de capacidad por *EQoSIM* y su evolución es independiente del grado de congestión en el *narrow link*, y por tanto en la red.
- En el caso de *Pathrate* y *Pathrate* evolucionado, se observa como el tiempo necesario para realizar una estimación es mayor cuanto mayor es el grado de congestión en el *narrow link*, y por tanto en la red. La causa es que conforme aumenta el tráfico interferente la “Fase 0” se hace insuficiente para la medida de la capacidad, siendo necesarias las Fases 1 y 2, por lo que se retarda la obtención del valor. El grado de congestión en el *narrow link* a partir del cual se ejecutan “Fase 1” y “Fase 2” depende del umbral escogido.
- El tiempo empleado por *EQoSIM* es mínimo, al igual que es pequeño el empleado por *Pathrate* y *Pathrate* optimizado. La optimización de *EQoSIM* emplea un tiempo mayor, a la par que ofrece mayor robustez. En casos de congestión, *Pathrate* y su optimización tienen un retardo considerable en la estimación, siendo menor en el caso de la optimización.
- El tiempo empleado por las herramientas, a excepción de *EQoSIM* y de los casos en que la “Fase 0” de *Pathrate* y su optimización es válida para proporcionar la estimación, se puede considerar elevado para la provisión de servicios en tiempo real. Esto se debe a la configuración realizada de las herramientas de estimación: no se permite que la herramienta sature un enlace en la red. Para lograrlo es necesario que distribuya el envío de información durante un intervalo de tiempo; de este modo no se genera congestión con el único objetivo de estimar la capacidad y los usuarios continúan haciendo uso normal de la red, con la desventaja de que el tiempo transcurrido desde el comienzo de la estimación hasta que ésta es obtenida se incrementa. Este aumento se considera asumible, dado que la capacidad de un *path* es un parámetro poco cambiante durante una comunicación y cuya estimación no es solicitada en intervalos pequeños de tiempo.

5. Fiabilidad

Este último parámetro de las herramientas de estimación se ha evaluado en los mismos escenarios y a partir de las mismas pruebas que los anteriores. La fiabilidad aporta información sobre la robustez del método al proporcionar medidas, y se calcula como el porcentaje de las veces que la herramienta estima con éxito la capacidad. Una medida se considera acertada cuando el valor de la estimación difiere del valor real de capacidad menos de un 3% de ésta. La fiabilidad no informa de cuánto se ha desviado la medida; únicamente si ésta es acertada o no. El valor de fiabilidad de los métodos deberá compararse teniendo en cuenta los costes a asumir en retardo e intrusividad por cada una de ellos, proporcionando de este modo la “rentabilidad” de la herramienta de estimación.

Para cada experimento se calcula dividiendo las estimaciones correctas entre las estimaciones totales. Realizando una media ponderada al número de pruebas en cada experimento se calcula la fiabilidad de cada herramienta. Es un valor independiente de la congestión de la red. Las fiabilidades de las cuatro herramientas son parámetros comparables, ya que los métodos han estado sometidos a los mismos grados de congestión en cada experimento. En la siguiente tabla se muestra la fiabilidad media obtenida para cada método:

	<i>EQoSIM</i>	Evolución de <i>EQoSIM</i>	<i>Pathrate</i>	Evolución de <i>Pathrate</i>
Fiabilidad (%)	44.29	79.5	75.17	73.93

Tabla 3. Fiabilidad de cada herramienta.

Una herramienta logra una fiabilidad del 50% en una simulación cuando ha estimado correctamente la capacidad la mitad de las veces, mientras que si obtiene el 100% habrá estimado de manera acertada en todos los intentos.

- *EQoSIM* es, con diferencia, la herramienta menos fiable, mientras que su optimización, debido al descarte de medidas que experimentan sobreestimación, es el método de estimación que estima correctamente con mayor frecuencia. Las robusteces de *Pathrate* y *Pathrate* optimizado se encuentran a un nivel cercano a la de *EQoSIM* mejorado, con la consabida desventaja que presentan en retardo e intrusividad.

6. Análisis global

En esta última figura se muestra el análisis conjunto de las cuatro métricas calculadas anteriormente para cada una de las cuatro herramientas. De este modo se analiza el efecto conjunto de las cuatro medidas sobre cada método de estimación. Puede observarse el resultado en la tabla 4:


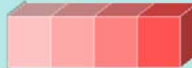






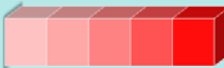
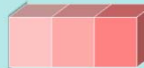
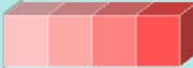
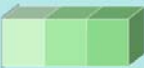
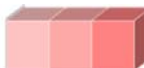
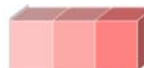
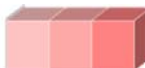

	Intrusividad	Error	Tiempo	Fiabilidad
<i>EQoSIM</i>				
<i>Evolución EQoSIM</i>				
<i>Pathrate</i>				
<i>Evolución Pathrate</i>				

Tabla 4. Comparativa de herramientas de estimación.

En la tabla anterior se muestra de forma comparativa las características de cada herramienta de estimación respecto a las cuatro métricas analizadas en este PFC. Es un análisis cualitativo, puesto que no se realiza siguiendo relaciones matemáticas; la puntuación para cada métrica varía de 1 a 5, recibiendo un 1 la herramienta que adquiere el menor valor en la variable medida. Se puede observar igualmente el código de colores: así por ejemplo, un valor de 4 en la métrica *Tiempo* supondrá un retardo elevado al proporcionar la estimación, característica negativa y por ello en color rojo, mientras que un 4 en *Fiabilidad* representa una tendencia a estimar correctamente la capacidad, lo que se relaciona con la bondad de la herramienta y aparece en color verde.

Una herramienta ideal sería aquella que lograra una fiabilidad máxima con un error nulo en la estimación, a costa de generar una intrusividad mínima o nula durante un tiempo despreciable. Sin embargo, la implementación de tal herramienta es a día de hoy una tarea imposible, puesto que las cuatro características que la definen son antagónicas requiriendo de un equilibrio y compromiso entre las mismas. Por ejemplo,

estimaciones de gran precisión suelen lograrse incrementando el número de muestras, lo que aumenta el retardo y la intrusividad.

Se observa en la tabla anterior (y se aprecia también comparando la “Figura 1. Intrusividad” y la “Figura 3. Tiempo”) la relación existente entre el tiempo de estimación y la cantidad de información inyectada por cada herramienta. Este hecho se debe a que, en la mayoría de los casos, el tiempo de transmisión de los paquetes es muy superior al de procesado, pudiéndose considerar éste despreciable; por ello el retardo en la estimación queda determinado generalmente por el tiempo de transmisión de los paquetes, mayor cuanto más información se inyecte.

Las pautas derivadas del análisis conjunto de las herramientas pueden ser esquematizadas en la siguiente relación:

- *EQoSIM* resulta una herramienta rápida y apenas intrusiva, aunque por el contrario sus estimaciones presentan la menor fiabilidad y mayor error de las cuatro analizadas.
- *Pathrate* es un método de estimación cuya fiabilidad es considerable, pero el coste a pagar en intrusividad es extremadamente alto, principalmente en casos de alta congestión.
- La optimización de *Pathrate* ofrece aproximadamente la misma fiabilidad que su homólogo original con unas características de retardo e intrusividad mucho menores, por lo que resulta más adecuado. Por el contrario, el análisis de la distribución multimodal de las estimaciones que realiza no resulta tan preciso; esta característica resulta asumible, puesto que únicamente se desea la estimación de la capacidad y no el análisis completo llevado a cabo por *Pathrate*.
- *EQoSIM* optimizado resulta la herramienta que obtiene una mejor valoración en el análisis; ofrece la mayor fiabilidad en la estimación, a costa de una intrusividad y retardo asumibles.

Si bien no se ha logrado la implementación de una herramienta que aúne las mejores características de cada herramienta de estimación y por ende logre optimizar todas las métricas de interés, sí se ha conseguido una optimización de cada herramienta. Dicha optimización mejora al menos, las prestaciones de las herramientas originales. En el Anexo III puede encontrarse información adicional necesaria para completar el proceso de análisis y mejora de las herramientas.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

6.1 Conclusiones

A través de los capítulos anteriores se han expuesto los pasos requeridos para el desarrollo del objetivo principal del proyecto, mediante la descripción, simulación, análisis y optimización de herramientas actuales de estimación de capacidad en su adaptación a las redes de nueva generación. Del mismo modo, en la realización de este proceso se han completado los objetivos secundarios.

En el capítulo uno se introdujo la motivación y los requisitos de calidad de servicio en las redes de nueva generación. En el capítulo 2 se ha presentado el estado del arte, los parámetros característicos de la QoS y sus métodos de estimación, concretamente los relacionados con la capacidad. La metodología de análisis de las herramientas de estimación se ha descrito en el capítulo 3, mientras que en el capítulo 4 se ha llevado a la práctica esa metodología y se han propuesto dos optimizaciones de herramientas de estimación. Finalmente, los resultados derivados de las simulaciones se muestran en el capítulo 5.

Las principales conclusiones extraídas son las siguientes:

- Los resultados obtenidos por la herramienta *Pathrate* en cuanto a prestaciones son correctos. Sin embargo, el precio a pagar en retardo y, principalmente, intrusismo es demasiado alto.
- En situaciones en que la congestión en la red es razonable (valores entorno al 40%) las herramientas en su versión optimizada presentan buenos resultados, si bien es cierto que en la zona de congestión más acusada el comportamiento empeora en alguna de las variables estudiadas. Se debe tener en cuenta que los operadores tratan de evitar situaciones de estrés y congestión elevada en la red.
- Las diferentes variables analizadas sobre el comportamiento de una herramienta de estimación se mueven en direcciones opuestas, por lo que mantener en equilibrio el compromiso entre ellas resulta una tarea compleja.

Personalmente, la realización de este proyecto me ha permitido:

- Conocer y poner en práctica la metodología de análisis de herramientas publicadas en la literatura; ésta debe ser abordada desde un punto de vista sistemático y minucioso.
- Obtener una visión completa de la calidad de servicio en el ámbito de las redes IP, los parámetros que la definen y los métodos existentes para su caracterización, todo ello orientado hacia las redes de nueva generación.
- Adquirir experiencia en la adquisición de datos, tratamiento para su organización y representación de forma adecuada.
- Profundizar en el diseño de escenarios y simulación mediante la plataforma OPNET. Es una herramienta potente que, mediante la conjugación de diseños de programación con elementos predefinidos, permite un dominio absoluto de configuraciones de tráfico. Por otra parte, mi experiencia particular no ha resultado satisfactoria debido a las dificultades generadas por el funcionamiento de OPNET en el equipo de trabajo dispuesto por la universidad (carencia de la potencia de operación necesaria, lo que ha ocasionado a simulaciones abortadas siempre que las condiciones de congestión de la red eran críticas).

6.2 Líneas de Trabajo Futuras

Las líneas de trabajo futuras se pueden dividir en dos: las relacionadas con el análisis de las herramientas de estimación de la QoS, concretamente la capacidad, y las relacionadas directamente con las herramientas de estimación, sus características y posibles optimizaciones.

Entre las primeras cabe destacar:

- Tras el análisis de las herramientas de estimación de capacidad mediante simulación, una continuación lógica del trabajo sería el estudio del comportamiento de estas herramientas en una red con tráfico real de aplicaciones.
- Realización de un análisis similar al llevado a cabo, introduciendo tráfico de otras aplicaciones cuyos paquetes recorran el *path* empleado por la

herramienta de estimación de forma simultánea a las pruebas (denominado tráfico interferente *path-persistent*).

Se citan a continuación algunas de las líneas de trabajo abiertas en relación a los métodos de estimación de capacidad:

- Automatización del proceso de estimación de capacidad en un único programa que permita escoger el método y, en caso de ser éste *Pathrate* o su optimización, decidir igualmente un rango en el compromiso precisión – tiempo de estimación, todo ello desarrollado en un entorno amigable de tal manera que cualquier usuario pudiera hacer uso de la herramienta.
- Tras la estimación de la capacidad y otros parámetros característicos de QoS, sería lógico pensar en una iniciación en el enrutamiento de paquetes en función de la calidad de servicio requerida (*QoS routing*), y la posible utilización de alguna de las herramientas analizadas en este ámbito.
- Análisis de herramientas actuales de estimación de la capacidad desde el punto de vista de la calidad de la experiencia (QoE).
- Realización de un método de estimación realimentado basado en estimaciones anteriores, con un posible ahorro en intrusividad.
- Diseño de una herramienta que, mediante la impresión de *timestamps* en los *router* requerida por *EQoSIM*, lleve a cabo un estudio detallado de los modos de distribución de las estimaciones. Extraer de las sobreestimaciones, en lugar de descartarlas, la capacidad de cada enlace, encontrándose la del *narrow link* entre ellas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. J. C. Crimi, **"Next Generation Network (NGN) Services"**, Telcodia Technologies White Paper, 2005.
- [2]. K. Rezabeigi, A. Vafaei, N. Movahhedinia, **"A Web Services based Architecture for NGN Services Delivery"**, Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009.
- [3]. J. McCabe, **"Over-provisioning vs QoS"**, 2004.
- [4]. ITU, **"Definition of Next Generation Network"**, 2004.
- [5]. Recomendación ITU – T E.800.
- [6]. Norma ISO 9000.
- [7]. Norma ISO 8402.
- [8]. A. Vogel, B. Kerhevé, G. von Bochmann and J. Gecsei, **"Distributed Multimedia and QoS: A Survey"**, *IEEE Multimedia*, 1995.
- [9]. Recomendación ITU - T P.10/G.100, *Amendment1* (2007), *New Appendix I*, Definición de Calidad de la Experiencia (QoE).
- [10]. R. Prasad, C. Dovrolis, **"Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques and Tools"**, *IEEE Network*, Noviembre/Diciembre 2003.
- [11]. M. Jain, C. Dovrolis, **"End-to-end Estimation of the Available Bandwidth Variation Range"**, SIGMETRICS'05, Junio 2005.
- [12]. PFC **"Análisis de prestaciones de diferentes tecnologías de Acceso a Internet"**, Laura Bueso Ramo, Universidad de Zaragoza, CPS, Mayo 2006.
- [13]. R. S. Prasad, M. Murray, C. Dovrolis, K. Claffy, **"Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools"**, *IEEE Networks*, Diciembre 2003.
- [14]. J. Fernández, E.A. Viruete, J.C. Ibar, I. Martínez y J.C. Bellido, **"Evaluación de QoS en accesos a internet para aplicaciones Multimedia (EQoSIM)"**, X Congreso Mundo Internet, Abril 2005.
- [15]. K. Lai, M. Baker, **"Measuring Bandwidth"**, In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, March 1999.
- [16]. R. Kapoor, L. Chen, L. Lao, M. Gerla, M. Y. Sanadidi, **"CapProbe: A Simple and Accurate Capacity Estimation Technique"**, ACM SIGCOMM, Septiembre 2004.
- [17]. K. Harfoush, A. Bestavros, J. Byers, **"Measuring Bottleneck Bandwidth of Targeted Path Segments"**, Boston University 2001.
- [18]. R. Carter, M. Crovella, **"Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks"**, *Performance Evaluation*, Octubre 1996.
- [19]. S. Saroiu, P. K. Gummadi, S.D. Gribble, **"A Fast Technique for Measuring Bottleneck Bandwidth in Uncooperative Environments"**, In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2002.
- [20]. K. Lai, M. Baker, **"Nettimer: A tool for Measuring Bottleneck Link Bandwidth"**, *Proceedings of the USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems*, Abril 2001.

- [21]. C. L. T. Man, G. Hasegawa, M. Murata, **"A Merged Inline Measurement Method for Capacity and Available Bandwidth"**, In *Proceedings of the 6th Passive and Active Measurement Workshop PAM 2005*, Marzo 2005.
- [22]. M. Goutelle, P. Vicat-Blanc/Primet, **"Study of a non-intrusive method for measuring the end-to-end capacity and useful bandwidth of a path"**, In *Proceedings of ICC*, Junio 2004.
- [23]. C. D. Guerrero, M. A. Labrador, **"On the applicability of available bandwidth estimation techniques and tools"**, *Department of Computer Science & Engineering, University of South Florida*, Agosto 2009.
- [24]. J. Postel, **"Protocolo de Internet – DARPA Internet Program Protocolo de Especificaciones"**, RFC 791, DARPA, Septiembre 1981.
- [25]. D. L. Mills, **"DCNET Internet clock service"**. *Network Working Group Report RFC 778, COMSAT Laboratories*, Abril 1981.
- [26]. J. Xu, **"PacketTwins: A Novel Method for Capacity Estimation of a Heavy-loaded Path"**, *Research Letters in Communications*, Junio 2009.
- [27]. C. Dovrolis, P. Ramanathan, D. Moore, **"Packet-Dispersion Techniques and a Capacity-Estimation Methodology"**, *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, Diciembre 2004.
- [28]. Packet Triplet, impreso Z. ZiXuan, L.B. Sung, F. C. Peng, S. Jie, **"Packet Triplet: An Enhanced Packet Pair Probing for Path Capacity Estimation"**, *Proceedings of Network Research Workshop*, Agosto 2003.
- [29]. V. Jacobson, **"Pathchar: A tool to infer characteristics of Internet paths"**, Abril 1997.
- [30]. M. Jain, C. Dovrolis, **"End-to-End available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput"**, In *Proc. ACM SIGCOMM Symp. Communications Architectures Protocols*, Agosto 2002.
- [31]. www.opnet.com

