

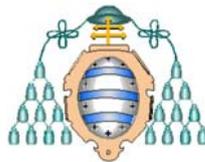




# Máster en Tecnologías de la Información y Comunicaciones en Redes Móviles

TRABAJO FIN DE MASTER

## ESTIMACIÓN EXTREMO A EXTREMO DE ANCHO DE BANDA DISPONIBLE PARA REDES DE ALTA CAPACIDAD: IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS



AUTOR: JOSÉ IGNACIO AZNAR BARANDA

DIRECTOR: JULIÁN FERNÁNDEZ NAVAJAS

PONENTE: JOSÉ RUIZ MAS

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

SEPTIEMBRE - 2010





*A Mamá, Papá y Juan.*

*A mis abuelos.*



***“Step by step. I can't think of any other way of accomplishing anything. The game is my life. It demands loyalty and responsibility, and it gives me back Satisfaction and peace”.***

**Michael Jordan**

***“La libertad, Sancho, es uno de los más preciosos dones que a los hombres dieron los cielos; con ella no pueden igualarse los tesoros que encierran la tierra y el mar: Por la libertad, así como por la honra se puede y debe aventurar la vida”.***

**Miguel de Cervantes Saavedra**

## RESUMEN

El desarrollo de nuevas tecnologías de red y servicios cada vez más personalizados, conlleva una serie de requerimientos que hacen que el sobre-dimensionamiento de recursos de red no sea la mejor solución en situaciones de congestión o falta de recursos. Una posible alternativa, consiste en realizar una adecuada gestión de los parámetros de calidad de servicio (Quality of Service, QoS) a través de una estimación de los mismos y una posterior actuación en función del estado de la red y de las necesidades particulares de cada servicio.

Uno de los parámetros de mayor relevancia es el ancho de banda disponible (*Available Bandwidth*, ABW). Si bien existen otros parámetros (e.g. retardo extremo a extremo, tasa de pérdidas) así mismo importantes, el ABW es fundamental especialmente en el actual panorama de servicios multimedia, los cuales precisan mayor eficiencia y flexibilidad en su provisión. Las técnicas de estimación de ABW constituyen una herramienta fundamental en la gestión de recursos en tiempo real, en el control de flujo y control de congestión, o también en la detección de errores de red y técnicas de control de admisión. Sin embargo, las técnicas de estimación de ABW presentan cierto escepticismo sobre la idoneidad de las mismas en la obtención de medidas en términos de precisión, escalabilidad e intrusividad en el sistema, especialmente en redes con enlaces de alta capacidad.

El TFM "*Estimación extremo a extremo de ancho de banda disponible para redes de alta capacidad: implementación y evaluación de herramientas*" plantea en un entorno de simulación, la implementación de una herramienta de estimación de ABW, activa, extremo a extremo y que permita al estado de congestión de la red, manteniendo un compromiso entre la precisión, la intrusividad y la complejidad de las estimaciones. El TFM se desarrolla en el marco del proyecto RUBENS [EU-3187 CP5-020] en el que el Grupo de Tecnologías de las Comunicaciones (GTC) de la Universidad de Zaragoza, es partícipe de diversas tareas, entre ellas, la propuesta de una herramienta de estimación de ABW extremo a extremo.

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Diagrama funcional de la arquitectura RUBENS que incluye el sistema de monitorización de ABW.....	3
FIGURA 2: Clasificación de herramientas de estimación de ABW.....	9
FIGURA 3: Estimación activa basada en PGM.....	9
FIGURA 4: Triángulo de compromiso adoptado por los métodos de estimación de ABW.....	11
FIGURA 5: <i>Fish-eye</i> como posible tasa de pruebas. Analogía con la forma del ojo.....	15
FIGURA 6: Retardo de encolamiento de un tren de paquetes <i>chirp</i> .....	16
FIGURA 7: Clasificación de los sistemas de simulación.....	23
FIGURA 8: Metodología general del estudio de simulación.....	24
FIGURA 9: Implementación genérica de un escenario de red en OPNET.....	29
FIGURA 10: Escenario implementado y sus características para la realización de simulaciones.....	30
FIGURA 11: Sectorización de las tasas configuradas para los paquetes de un tren de estimación.....	33
FIGURA 12: Simplificación del procesado de datos: Traslación de tiempo a ABW y métricas.....	38
FIGURA 13: Procesado y medida de ABW a partir del método basado en regresión lineal.....	39
FIGURA 14: Estimación de ABW para una situación de congestión media. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.....	45
FIGURA 15: Estimación de ABW para una situación de congestión elevada. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.....	46
FIGURA 16: Cálculo del error relativo cometido en la estimación de ABW en situaciones de congestión media y elevada. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.....	47
FIGURA 17: Cálculo de $R^2$ en situaciones de congestión media y elevada. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.....	49
FIGURA 18: Bondad de ajuste con regresión lineal en situaciones de congestión media y elevada. Estadísticas para distintos conformados de tren y número de paquetes por tren. Método PRM.....	50
FIGURA 19: Estimación de ABW para situaciones de congestión media (izquierda) y congestión elevada (derecha). Método PGM.....	51
FIGURA 20: Diagrama de situación de enmascaramiento y error en la estimación con el método PGM..	52
FIGURA 21: Diagrama de situación de estimación de la capacidad y no del ABW. Fallo en la estimación.	52
FIGURA 22: Tiempo de estimación de una muestra de ABW requerido por el método basado en PGM...	54



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Principales características de las herramientas de estimación.....	10
TABLA 2: Resumen de simulaciones más relevantes para la validación del método PRM.....	34
TABLA 3: Resumen de la configuración de parámetros para el mecanismo basado en PGM.....	37
TABLA 4: Resumen de simulaciones realizadas para el análisis de las herramientas de estimación de ABW.....	44
TABLA 5: Principales características de las herramientas de estimación.....	48
TABLA 6: Intrusividad del método basado en PGM para los escenarios de congestión media y alta.....	53

**TABLA DE CONTENIDOS**

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	2
1.1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN .....	2
1.2. PROYECTO RUBENS: MARCO DEL TFM .....	3
1.3. OBJETIVOS DEL TFM .....	4
1.4. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO.....	4
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE</b> .....	8
2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE ANCHO DE BANDA .....	8
2.2. CARACTERÍSTICAS Y REQUERIMIENTOS DE LAS HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN .....	10
2.3. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES .....	12
2.3.1. REVISIÓN DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES.....	12
2.3.2. OTRAS TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES.....	16
2.4. REVISIÓN DE TÉCNICAS DE FILTRADO Y PROCESADO DE DATOS PARA LA OBTENCIÓN DEL ABW.....	17
2.5. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ESTADO DEL ARTE.....	20
<b>CAPÍTULO 3. MÉTODOLÓGÍA DE SIMULACIÓN</b> .....	22
3.1. MOTIVACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SIMULACIÓN .....	22
3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMA DE SIMULACIONES.....	23
3.3.- MÉTODOLÓGÍA DEL ESTUDIO DE SIMULACIÓN.....	23
<b>CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MECANISMO DE ESTIMACIÓN DE ABW, BASADO EN MEDIDAS ACTIVAS Y EXTREMO A EXTREMO</b> .....	28
4.1. INTRODUCCIÓN .....	28
4.2. OPNET Y MATLAB COMO HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN .....	28
4.3. ESCENARIO DE SIMULACIÓN. HERRAMIENTA OPNET.....	29
4.3.1. DESCRIPCIÓN Y COMPONENTES DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN.....	30
4.4. IMPLEMENTACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE OBTENCIÓN DE DATOS TEMPORALES ..	31
4.4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN .....	31
4.4.2. MÉTODO BASADO EN PRM .....	32
4.4.3. MÉTODO BASADO EN PGM.....	34
4.5. IMPLEMENTACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE FILTRADO, PROCESADO Y TRASLACIÓN DE DATOS. ....	37
4.5.1. PROCESADO DE DATOS BASADO EN REGRESIÓN LINEAL .....	38
4.5.2. PROCESADO DE DATOS BASADO EN VHF.....	40
4.6. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA Y SIMULACIONES .....	41



<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN</b> .....	44
5.1. INTRODUCCIÓN .....	44
5.2. RESULTADOS PARA EL MÉTODO BASADO EN PRM.....	44
5.2.1. ESTIMACIÓN DE ABW Y CÁLCULO DEL ERROR RELATIVO PARA CONGESTIONES MEDIA Y ALTA.....	45
5.2.3. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DERIVADOS DEL ESTUDIO DE INTRUSIVIDAD .....	47
5.2.4. ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ESTIMACIÓN .....	48
5.2.5. CÁLCULO DE LOS FACTORES <b>R2</b> E ÍNDICE DE REDUCCIÓN DE VALIDACIÓN CRUZADA. FIABILIDAD DE LAS MEDIDAS. ....	48
5.2.6. CONCLUSIONES DEL MÉTODO PRM.....	50
5.3. RESULTADOS PARA EL MÉTODO BASADO EN PGM .....	51
5.3.1. ABW ESTIMADO PARA NIVELES DE CONGESTIÓN MEDIA Y ALTA .....	51
5.3.2. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DERIVADOS DEL ESTUDIO DE INTRUSIVIDAD .....	53
5.3.3. ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ESTIMACIÓN .....	53
5.3.4. FIABILIDAD DEL SISTEMA DE SIMULACIÓN Y LAS MEDIDAS OBTENIDAS .....	54
5.3.6. CONCLUSIONES DEL MÉTODO PGM .....	54
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO ABIERTAS</b> .....	56
6.1. CONCLUSIONES .....	56
6.2. LÍNEAS DE TRABAJO ABIERTAS.....	57
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	59
<b>ANEXO I. DEFINICIONES DE INTERÉS</b> ..... ¡Error! Marcador no definido.	
<b>ANEXO II. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES. VERSIÓN EXTENDIDA.</b> ..... ¡Error! Marcador no definido.	
<b>ANEXO III. REVISIÓN DE TÉCNICAS DE FILTRADO Y PROCESADO DE DATOS PARA LA OBTENCIÓN DEL ABW. VERSIÓN EXTENDIDA</b> ..... ¡Error! Marcador no definido.	





# **CAPÍTULO 1.**

# **INTRODUCCIÓN**

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La banda ancha, y en general las redes de telecomunicación, se encuentran en una encrucijada en la que los usuarios de Internet se han acostumbrado a la rápida evolución y utilización de múltiples servicios. La ingente cantidad de información personalizada y los servicios crecen exponencialmente, pero los consumidores se ven atados a una red *best-effort* que ofrece una respuesta muy inestable. Por tanto, los diversos bloques funcionales que integran las redes encargados de la gestión de recursos y la provisión de Calidad de Servicio (*Quality of Service*, QoS) precisan de una mayor investigación que permita ofrecer soluciones al problema de provisión de contenidos personalizados y ser capaces de este modo de garantizar una buena calidad de experiencia (*Quality of Service*, QoE) al usuario final.

A lo largo de la última década, la investigación y trabajos realizados en torno a la estimación de diversos parámetros de QoS han sido una constante. Más en concreto, la estimación del ancho de banda disponible (*Available BandWidth*, ABW) de un enlace extremo a extremo es un parámetro fundamental de QoS dado el potencial que su estimación y monitorización puede ofrecer en la provisión de aplicaciones a usuarios finales. Los servicios de voz sobre IP (*Voice over IP*, VoIP), *Peer to Peer* (P2P) y *streaming* de video son ejemplos de aplicaciones ampliamente extendidas que se pueden beneficiar del conocimiento del ABW a lo largo de un determinado enlace de Internet. Así mismo, las herramientas de estimación de ABW son utilizadas para la monitorización y verificación de los *Service Level Agreements* (SLAs) puesto que ofrecen a usuarios y proveedores de servicios información precisa para la gestión de los contratos. Los protocolos de nivel de transporte pueden valerse de estas herramientas para ajustar la tasa de transmisión de acuerdo con la cantidad de ABW presente en el enlace y utilizar los recursos de red de forma más eficiente evitando situaciones de congestión. Los mecanismos de ingeniería de tráfico (*Traffic Engineering*) pueden utilizar la medida del ABW para realizar un adecuado aprovisionamiento de recursos en aplicaciones en tiempo real y mejorar el rendimiento del balanceo de carga en la red. Los sistemas de control de admisión (*call Admission Control*, CAC) pueden utilizar la medida de estimación para admitir o rechazar nuevas conexiones garantizando de esta forma la QoS de las conexiones establecidas en la red [3]. Incluso algunas aplicaciones comerciales como *Microsoft Windows Media Server* incluye una tecnología denominada “*streaming* inteligente”, que a partir de la medida de ABW, permite identificar la utilización actual de la red y en consecuencia seleccionar la mejor tasa de codificación que maximice la calidad de los contenidos sin sobrecargar la red [4]. La selección dinámica de servidores [5], o enrutamientos basados en parámetros de QoS (*QoS Routing*) [6] son también mecanismos que se sirven de la potencia de las herramientas de estimación de ancho de banda (*Available Broadband Bandwidth Estimation Tools*, ABBETs) en sus funciones. Todos estos ejemplos constituyen una muestra de la importancia de la estimación del ancho de banda disponible (ABW).

## 1.2. PROYECTO RUBENS: MARCO DEL TFM

El objetivo principal del proyecto RUBENS (*rethinking the Use of Broadband Access for Experience Optimized Networks and Services*) consiste en definir y evaluar una nueva infraestructura de red que ofrezca una QoE personalizada de forma eficiente y escalable para una amplia gama de aplicaciones, modelos de provisión y dispositivos. Para alcanzar dicho objetivo se pretende realizar un replanteamiento (un *rethinking*) de las actuales arquitecturas de banda ancha y de los bloques funcionales de red que en la actualidad limitan la capacidad de las redes para proporcionar una QoE personalizada [1]. La figura 1 muestra el diagrama funcional de la arquitectura RUBENS y las diversas funcionalidades que la componen. Una de las funcionalidades que cabe destacar es el denominado SMQoE. Este sistema se encarga de la monitorización de ABW a partir de la estimación previa del mismo.

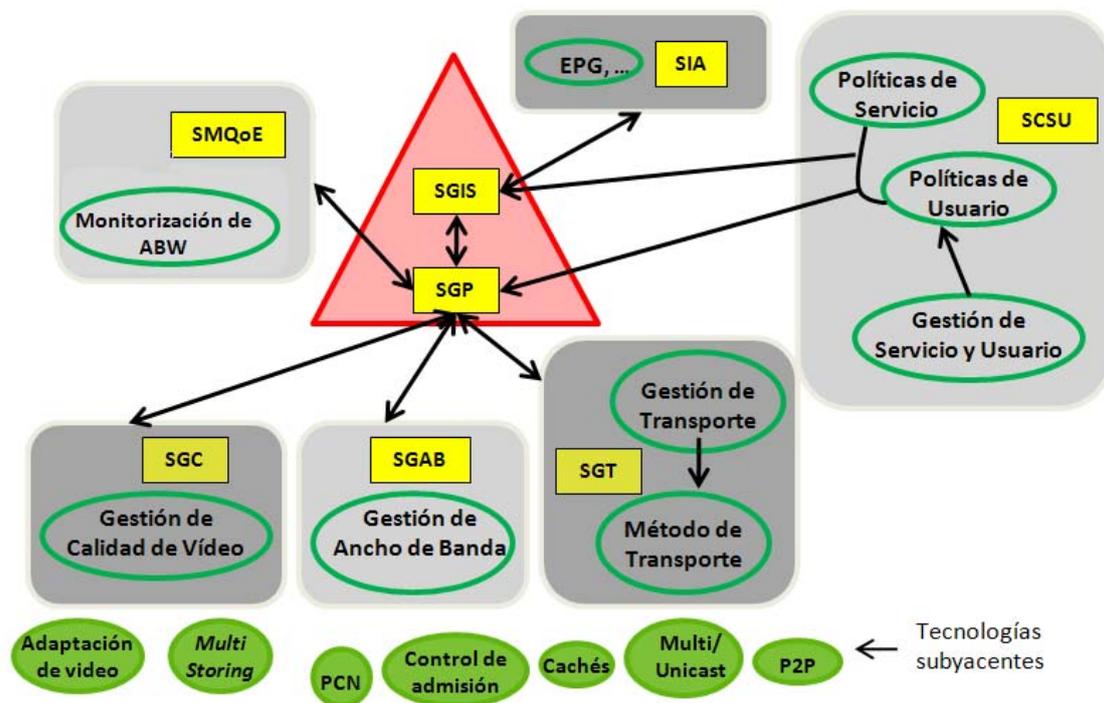


FIG 1: Diagrama funcional de la arquitectura RUBENS que incluye el sistema de monitorización de ABW.

El sistema de estimación de ancho de banda se integra en esta arquitectura y es responsable de proveer información sobre la QoS de los servicios que están siendo provistos en la red, centrándose en la estimación del parámetro ABW. El SGP (Sistema de Gestión Principal) es el componente clave de la arquitectura que gestiona los servicios de forma individual basándose en un limitado conjunto de parámetros (calidad requerida, anchos de banda máximos y mínimos, políticas de servicio y usuario) y un conjunto de controles (provisión del servicio, reserva de ancho de banda, *caching*, etc). Este bloque funcional constituye el punto de toma de decisiones de la arquitectura; procesa la información recibida de los bloques SGC, SGAB, SGT y SMQOE, e informa al resto de bloques de lo que deben hacer, para lograr una adecuada provisión de QoE de los servicios. Más información sobre el proyecto RUBENS puede consultarse en [2].

La Universidad de Zaragoza, ha participado de este proyecto a partir de la implementación del sistema SMQoE (entre otras tareas) es decir, de un sistema de estimación de ancho de banda disponible.

En el contexto del proyecto RUBENS, la necesidad de estimación de ABW se encuentra íntimamente ligada a la filosofía del mismo: Gestionar de manera eficiente (económica y tecnológicamente) los recursos de red disponibles, rompiendo con la idea de que el sobre-dimensionamiento de redes es la mejor solución para evitar situaciones de congestión. El sobre-dimensionamiento (*overprovisioning*) de recursos no es la solución más acertada; las redes están construidas de la forma en que están construidas y tratar de poner parches no es la mejor solución. Una gestión adecuada de recursos apoyada en técnicas tales como la estimación y monitorización de recursos, resulta más adecuado que pretender incrementar el ancho de banda, al menos desde los puntos de vista de I+D y económico.

### 1.3. OBJETIVOS DEL TFM

El objetivo fundamental del TFM consiste en plantear e implementar en un entorno de simulación, una herramienta de estimación de ABW activa, extremo a extremo y que permita de forma dinámica adaptarse al estado de congestión de la red manteniendo un compromiso entre la intrusividad, complejidad y precisión de las estimaciones siempre en el contexto del proyecto RUBENS. A tal fin, se ha seguido una metodología para la implementación del sistema de simulación y se ha dividido el proceso en dos objetivos parciales y diferenciados.

Por un lado se ha llevado a cabo el análisis de herramientas de estimación extremo a extremo relevantes para la posterior implementación del sistema. Se han implementado y evaluado algunas de estas herramientas a fin de estudiar su validez o ser descartadas en el contexto del proyecto RUBENS. La plataforma de simulación escogida para todo el proyecto de simulación es OPNET *Modeler* en colaboración con Microsoft Visual Studio.

Por otro lado, se han estudiado diversas técnicas de filtrado y métodos de procesado y traslación de parámetros temporales (*output* de las herramientas de estimación) a unidades de ancho de banda. Varias de estas técnicas han sido también implementadas para estudiar la posibilidad de incorporarlas al diseño de la herramienta. Estas tareas se han realizado a partir de la herramienta MATLAB v7.04.

La integración de ambas partes constituye el paso final en el desarrollo e implementación del mecanismo de estimación de ABW.

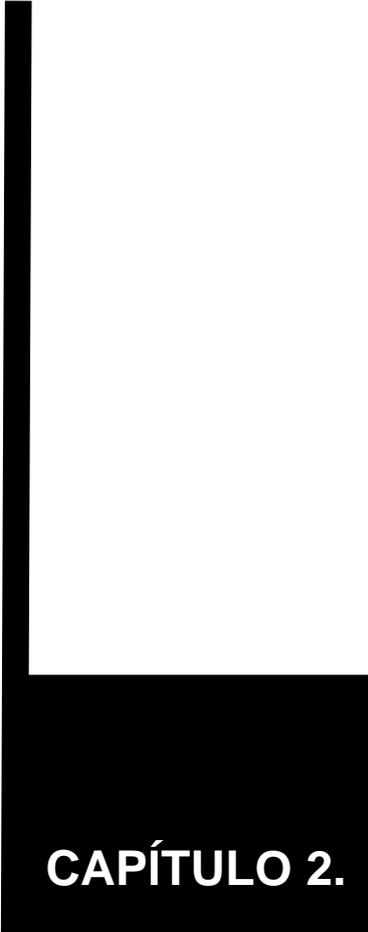
### 1.4. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

Tras este primer apartado de introducción, la memoria se divide en diferentes capítulos que explican los pasos seguidos en la ejecución del TFM. La memoria se completa adicionalmente con la bibliografía y anexos. En el capítulo 2 se presenta una revisión y análisis de las principales herramientas de estimación activas, extremo a extremo que se ajustan a los



requerimientos de la arquitectura RUBENS así como se explican las técnicas de filtrado y procesado de datos analizadas e implementadas y se justifica la elección de las más adecuadas. En el capítulo 3 se explica la metodología de simulación utilizada con objeto de conferir validez a las medidas obtenidas. A continuación, en el capítulo 4 se introduce la estructura del proyecto de simulación y se explica el mecanismo de estimación de ABW y su implementación a partir de OPNET Modeler y MATLAB. Los resultados más relevantes derivados de las simulaciones realizadas se exponen en el capítulo 5. Finalmente, las conclusiones más relevantes y posibles líneas futuras de trabajo abiertas se presentan en el capítulo 6.





**CAPÍTULO 2.**

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL  
ARTE.**

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

### 2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE ANCHO DE BANDA

Existen un gran número de técnicas y mecanismos de estimación del ABW en la literatura. Si bien existen diversas clasificaciones y taxonomías de las mismas, la más aceptada las divide en dos grandes grupos:

**Herramientas pasivas:** Las medidas pasivas utilizan registros de trazas de datos transmitidos a través del enlace (*path*) de interés. A través de la captura de tráfico en determinados nodos de la red es posible obtener estadísticas sobre el ABW y otras métricas de QoS. Sin embargo en entornos reales este tipo de técnicas no resulta viable, dada la elevada inversión en equipos y dispositivos necesarios para capturar, analizar y estimar el ABW en tiempo real. Estas técnicas se conocen con el nombre de *Deep Packet Inspection* (DPI) [7] y si bien los proveedores de red las utilizan en sus infraestructuras, actualmente no se ha planteado como alternativa para la estimación de ABW en el lado de los usuarios finales. Por otro lado, los operadores restringen las funcionalidades de sus *router* por motivos de seguridad resultando imposible controlar las pruebas. Adicionalmente, los algoritmos de control de congestión, los *buffer* y los mecanismos de competición para acceso al medio pueden influenciar la utilización máxima del enlace, alterando la precisión de las medidas [8]. Algunas herramientas de estimación pasiva se asocian a sistemas de gestión como SNMP o a sistemas de análisis como Netflow [9] o IPFIX [10]. También se han realizado algunos estudios [11] basado en captura de tráfico ADSL en los extremos y su posterior análisis, pero que resultan insuficientes para realizar estimaciones medianamente precisas de ABW. Por estos motivos, los trabajos de investigación se han orientado más hacia algoritmos de medida extremo a extremo que introducen tráfico en la red. Son los denominados métodos o herramientas activas.

**Herramientas activas:** Las herramientas activas se caracterizan por realizar la estimación de ABW infiriendo tráfico en la red y observando los efectos que los paquetes de monitorización producen en los nodos intermedios a partir de su captura en el extremo receptor. Las herramientas activas pueden ser **extremo a extremo** en caso de que la estimación se produzca entre los nodos finales de la red o bien *per-hop*, si la estimación se lleva a cabo en cada uno de los saltos intermedios que constituyen el enlace entre los nodos origen y destino que se pretenden verificar.

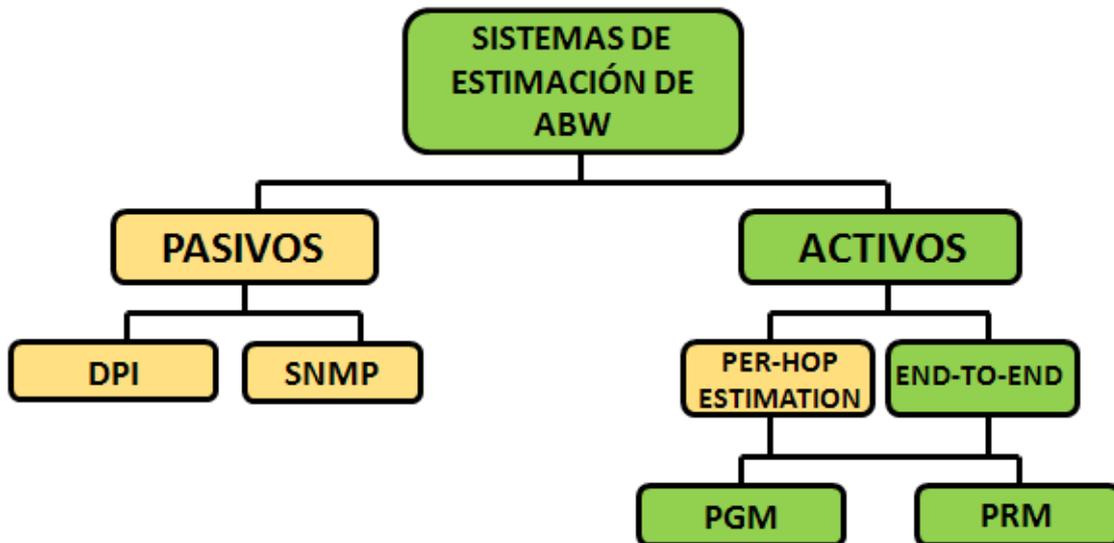


FIG 2: Clasificación de herramientas de estimación de ABW.

A su vez, bien sean extremo a extremo, bien *per-hop*, las herramientas activas se clasifican también en función del tráfico inyectado en la red.

Por un lado encontramos mecanismos basados en la transmisión de pares de paquetes denominados **PGM (Probe Gap Model)**. Los algoritmos PGM basan la estimación del ABW en la dispersión entre dos paquetes consecutivos en el receptor, lo cual está estrechamente relacionado con el volumen de tráfico interferente en el enlace crítico [12]. La figura 3 muestra el concepto de este mecanismo.

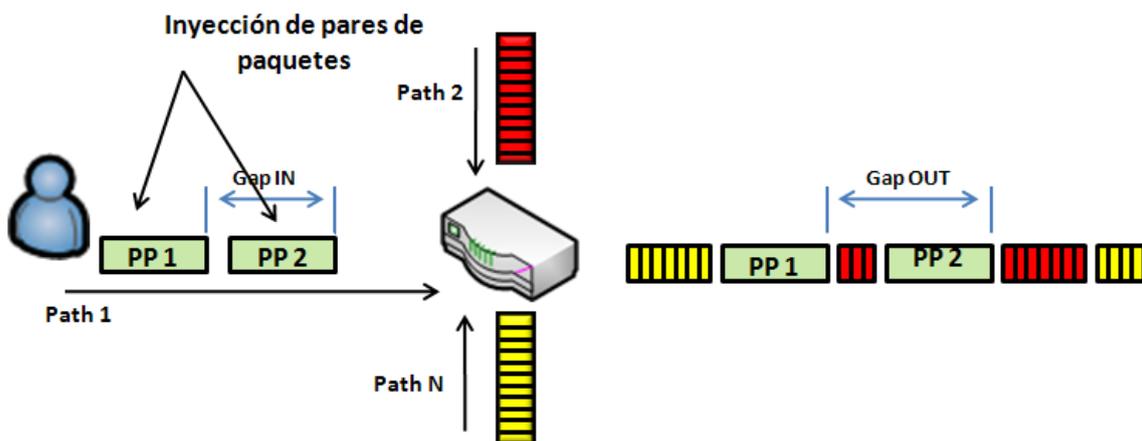


FIG 3: Estimación activa basada en PGM.

Los métodos basados en PGM tienen como principal ventaja el hecho de ser poco intrusivos (el volumen de tráfico inyectado es pequeño en comparación con el tráfico de datos real). Por otro lado este tipo de métodos requieren en general que la capacidad sea un parámetro conocido de antemano y presuponen que el enlace cuello de botella (*narrow link*) y el enlace crítico (*tight link*) son el mismo, lo cual no siempre es cierto [13] especialmente en enlaces de

Internet. Esta suposición puede llevar a error, derivando en resultados que subestiman el ABW en situaciones de enlaces multi-salto. Algunos ejemplos de métodos PGM de referencia son Pathrate [14], SPRUCE [15], IGI [16] y Abing [17].

Otro grupo de métodos activos se denomina **Probe Rate Model (PRM)**. Este tipo de métodos se basan en el concepto de congestión inducida. En el receptor, los retardos de los paquetes de estimación son medidos para determinar el instante en que la congestión se hace patente en el sistema. El ABW coincide con la tasa de monitorización en ese preciso instante [3]. Los métodos basados en PRM tienen dos limitaciones significativas: En primer lugar lo intrusivo que en general resultan para el sistema, dada la ingente cantidad de paquetes inyectados para la estimación. En segundo lugar, son métodos cuya estimación requiere un tiempo de proceso elevado, restando utilidad en situaciones de monitorización de los considerados “*real-time*”. La principal ventaja que presentan con respecto a los métodos PGM reside en una mayor precisión de las medidas [4]. Ejemplos de métodos más actuales en la literatura y basados en PRM son Pathchirp [18] y su evolución e-Pathchirp [19], ASSOLO [4] o FEAT [20]. La tabla 1 resume las principales ventajas y limitaciones de los métodos presentados.

	HERRAMIENTAS PASIVAS	HERRAMIENTAS ACTIVAS	
		PGM	PRM
TIPO DE ANÁLISIS	Microscópico (o por paquete). Macroscópico (o por flujo).	Microscópico	Microscópico Macroscópico
VENTAJAS	Baja intrusividad Condiciones reales de uso Estimaciones rápidas	Baja intrusividad en gnral. Controlables Viabiles E2E	Más precisas que PGM Viabiles E2E.
LIMITACIONES	Volumen de datos No viabiles para E2E Imposible control de pruebas	Menos precisas que PRM. Asunciones poco realistas	Intrusividad elevada.

**TABLA 1: Principales características de las herramientas de estimación.**

En el presente trabajo, se ha realizado un análisis de las propiedades, fortalezas y limitaciones de las herramientas de estimación activas que representan MÉTODologías destacadas y actuales, a fin de establecer su utilidad para los requisitos establecidos por la red RUBENS. Las consideradas más interesantes, han sido reproducidas en escenarios de simulación. El resto han sido descartadas por resultar obsoletas o no cumplir los requisitos exigidos. Estos requerimientos se describen en la siguiente sección.

## 2.2. CARACTERÍSTICAS Y REQUERIMIENTOS DE LAS HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN

A la hora de evaluar herramientas de estimación de ABW, existen 3 métricas fundamentales que determinan la validez y viabilidad de implementación de las mismas. Estas métricas son la **precisión** de las medidas realizadas, el **tiempo** necesario para realizar una estimación y la **intrusividad** de la herramienta en el sistema.

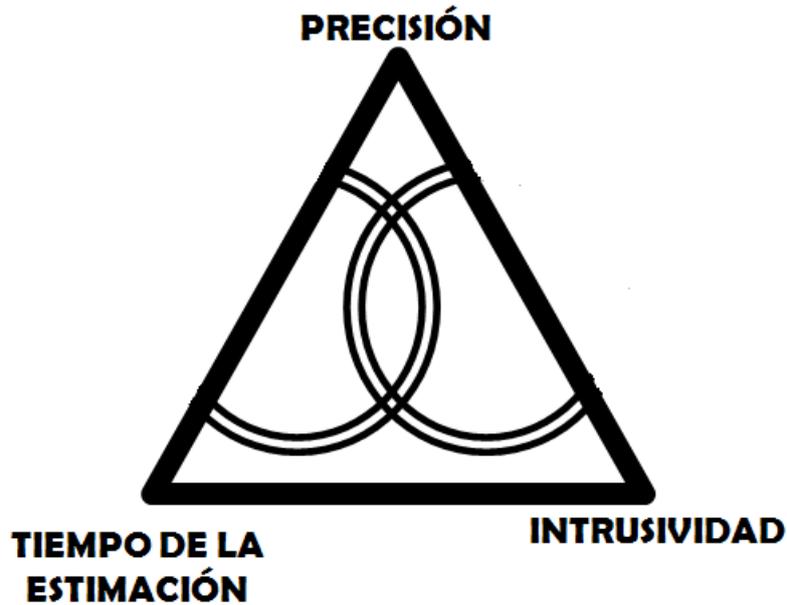


FIG 4: Triángulo de compromiso adoptado por los métodos de estimación de ABW.

La **precisión** facilita un valor cuantitativo que compara la estimación extremo a extremo del ABW con el valor real, supuesto conocido por el evaluador [3]. La precisión viene dada por la estimación del error, o lo que es lo mismo, en cuánto la estimación se desvía del valor actual real en términos porcentuales (error relativo) y absolutos (error relativo).

La **intrusividad** se relaciona con la cantidad de paquetes de prueba que las herramientas inyectan en la red para obtener una estimación [3]. Para la evaluación y validación de la herramienta de estimación que se presenta en este TFM, la intrusividad se define como el porcentaje de tráfico de la herramienta utilizado para obtener una medida con respecto a la capacidad total de enlace más congestionado o *Tight Link*.

El **tiempo de la estimación** es una medida del tiempo requerido por la herramienta para facilitar un valor de ABW. Se mide en segundos [3]. En [33] se sugiere que el tiempo de estimación para aplicaciones multimedia sea inferior a 1 segundo.

Existen adicionalmente dos métricas relacionadas con las métricas técnicas anteriores y que también son fundamentales. Se trata de la fiabilidad y credibilidad de las estimaciones realizadas.

Fiabilidad: La fiabilidad de un sistema se define como la probabilidad de que ese sistema realice una cierta función bajo condiciones fijadas y durante un periodo de tiempo. La fiabilidad de las medidas es una métrica no tenida muy en cuenta en entornos de simulación. La verificación del sistema implementado, la reproducción del mismo y la comparación de resultados es fundamental en el proceso de validación y verificación de la herramienta de estimación de ABW.

Credibilidad: La credibilidad de los trabajos de simulación también debe estar patente. Algunas suposiciones y asunciones no son ciertas o no pueden ser consideradas como válidas para la

validación de los modelos de simulación. La credibilidad es una métrica puesta en tela de juicio a lo largo de los últimos años [34].

De acuerdo con las métricas presentadas, la herramienta ideal sería aquella que presentara un grado de precisión muy alto, sin apenas inyectar tráfico en la red y lo hiciera en un espacio de tiempo inferior a un segundo. Sin embargo, las tres métricas son antagónicas y encontrar esta herramienta ideal es de momento una utopía. Por este motivo en el presente TFM se pretende simular una herramienta que presente un compromiso y permita mantener un equilibrio priorizando unas características frente a otras, en función de los requerimientos de la red que se esté monitorizando y de los servicios que se estén facilitando.

- Por ejemplo, en la aplicación de herramientas de estimación de ABW para la compilación de los SLAs (*Service Level Agreements*), la precisión de las medidas es fundamental para verificar que se están cumpliendo los términos del contrato. Sin embargo, el tiempo de estimación requerido no es tan importante.
- En caso de que la herramienta se utilice para gestionar un sistema CAC y será necesario que el tiempo de estimación sea mínimo para que la red sea capaz de reaccionar frente a cambios bruscos en la red. Adicionalmente es necesario que la herramienta inyecte poco tráfico. Sin embargo, la precisión de las medidas puede considerarse media.
- Como último ejemplo, se presenta el caso en que las herramientas de estimación se utilicen para la detección de ataques de seguridad: En este tipo de aplicación, el tiempo de estimación y la fiabilidad son las métricas fundamentales.

Se presenta a continuación un resumen de las ventajas y limitaciones de las herramientas analizadas y/o testadas. En el anexo III se encuentra una versión extendida de este resumen.

A partir del estudio del impacto las herramientas en términos de intrusividad, precisión y demás métricas comentadas en la sección anterior, se ha propuesto un método de estimación, que no pretende romper con los esquemas ya establecidos, sino aunar las características más favorables de cada uno de ellos a fin de implementar una herramienta optimizada en las métricas de interés para la arquitectura RUBENS.

## 2.3. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES

### 2.3.1. REVISIÓN DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES

#### MÉTODO ENDE

Se trata de una herramienta extremo a extremo para aplicaciones tipo multimedia que sigue la metodología PGM y utiliza como métrica para la estimación los parámetros OWD y RTT [22].

Ventajas:

- Simplicidad del método basada en pares de paquetes de distinto tamaño.
- Presenta una precisión razonable y utilidad en entornos multimedia.

Limitaciones:

- La reproductibilidad de los resultados a partir de la información facilitada es inviable.
- No se expone el escenario de pruebas o el entorno de *test-bed* realizado. No es posible establecer las capacidades de los enlaces sobre los que se han realizado los experimentos.
- No funciona para enlaces multi-salto, salvo que todos presenten la misma capacidad.

### Conclusión

Del análisis realizado de esta herramienta y su implementación y simulación, se concluye que no es útil para redes de alta capacidad y que la implementación a partir de los datos proporcionados no es posible. Fue una de las primeras herramientas testadas y tras un largo proceso de verificación de la implementación, fue descartada.

### **MÉTODO PATHLOAD**

El método Pathload representa un clásico ejemplo de herramienta basada en PRM. La idea básica consiste en utilizar el principio de congestión auto inducida y OWD (*One Way Delay*) [14]. El método se caracteriza por las siguientes ventajas y limitaciones:

Ventajas:

- El grado de precisión de la herramienta es configurable. Por defecto se ha establecido un error máximo entorno al 4% del ABW real si bien la sub-estimación es también característica.
- En redes de baja capacidad la intrusividad se reduce al 10% del ABW.

Limitaciones:

- Claramente es un método muy intrusivo. En función del error relativo configurado, el número de ráfagas enviadas a distintas tasas  $R_i$  puede ser muy elevado hasta que se produzca la convergencia.
- Además la intrusividad es proporcional al ABW, luego en situaciones de baja congestión en redes de alta velocidad (por encima de enlaces OC-12 [21]) en las que el ABW es mayor, el método definitivamente alterará las condiciones de la red.
- El tiempo de la estimación también es variable en función de las tasas  $R_i$  y el ajuste en el error relativo.
- Necesita los dos extremos de la comunicación para completar la estimación.

### Conclusión

El método es muy intrusivo si se pretende una precisión elevada en las medidas. Para una menor intrusividad se requiere que los trenes de paquetes sean de menor tamaño y más espaciados, pero en estas circunstancias y de acuerdo con [21], la varianza de la medida se

vería incrementada. El tiempo de estimación también es una circunstancia que hace que no se adecue a las necesidades establecidas.

### **MÉTODO SPRUCE**

Técnica de estimación PGM basada en el concepto de “Prueba Directa” o *Direct-Probing* [15].

Ventajas:

- Para una estimación de un enlace de un solo salto, el método es exacto.
- No es intrusivo (máximo 5% de la capacidad del cuello de botella).
- Es más preciso que IGI y Pathrate y más sencillo (por eso se escogió su estudio en un principio).

Limitaciones:

- Limitaciones en enlaces de alta capacidad. Para capacidades superiores a un OC-3 (155 Mbps) presenta subestimaciones importantes en la medida.
- Asume que cuello de botella es el más congestionado y su capacidad es un parámetro para la simulación.
- Las simulaciones realizadas muestran que no existe precisión en enlaces multi-salto.
- La separación inicial de los paquetes  $\Delta_{in}$  puede tener limitaciones en situaciones reales, dado que por ejemplo para un OC-12 de tasa nominal, se requiere un  $\Delta_{in}$  del orden de nanosegundos, lo cual roza los límites de lo factible.

### Conclusión

De su implementación y análisis realizado y de la implementación del sistema, se desprende que no es útil en situaciones multi-salto extremo a extremo. La precisión es prácticamente nula, amén de que se pueden obtener estimaciones de  $ABW < 0$ , lo cual debería ser imposible. En definitiva tampoco se ajusta a los requisitos exigidos.

### **MÉTODO ABwE**

Se trata de un método basado en pares de paquetes (PGM) que tiene como objetivo determinar el ABW en un tiempo de estimación reducido sin ser intrusivo. Está basado en el cálculo del retardo  $T_d$  que los paquetes de prueba (denominados PP1 y PP2) presentan en el extremo receptor [23].

Ventajas:

- Al ser PGM es poco intrusivo.
- Posibilidad de ser implementado en redes del orden de Gbps.
- El tiempo de respuesta es reducido.

Limitaciones:

- La caracterización del tráfico está restringida a las circunstancias de los enlaces medidos. Por lo tanto la generalidad del método queda en entredicho.

- Necesita los dos extremos para realizar la estimación.

### Conclusión

A pesar de las limitaciones que la herramienta presenta, este algoritmo se ha considerado como una de las alternativas. El método en combinación con técnicas de filtrado constituye una de las herramientas utilizadas en la implementación del método planteado en el TFM.

### **MÉTODO FEAT**

Método basado en PRM que tiene como elemento diferenciador el hecho de que la tasa de prueba empleada para las estimaciones es variable (VBR) [20].

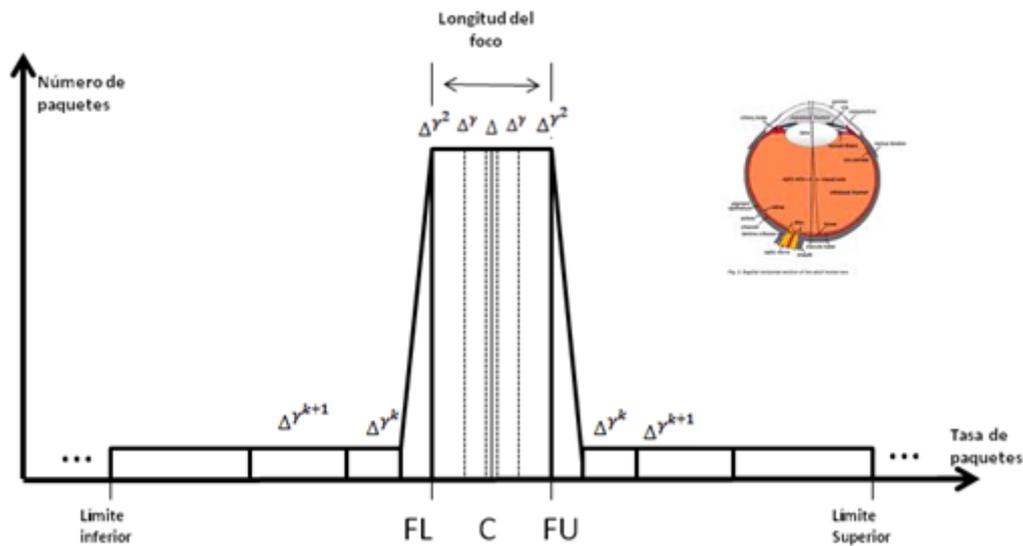


FIG 5: *Fish-eye* como posible tasa de pruebas. Analogía con la forma del ojo.

### Ventajas:

- Interesante característica del *Fish-eye* (tasa de estimación variable).
- Tiempo de estimación reducido.
- Comparado con otras técnicas basadas en PRM, presenta una intrusividad razonable.
- La precisión que presenta en el *test-bed* es alta.

### Limitaciones:

- El Test-bed realizado sobre un enlace de 2Mbps, no da referencias sobre su implementación en redes de alta capacidad no permitiendo de este modo obtener conclusiones más generales sobre la herramienta.

### Conclusión

A pesar de que el trabajo analizado respecto a este algoritmo está diseñado sobre un test-bed que no permite sacar conclusiones en redes de alta capacidad, el hecho de utilizar una tasa de pruebas variable, es un concepto atractivo. Por este motivo, se ha tenido en cuenta este modelo de estimación para el posterior desarrollo del mecanismo planteado en este TFM.

### 2.3.2. OTRAS TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES

Adicionalmente, se han revisado otros trabajos de estimación activos extremo a extremo cuya implementación no se ha llevado a cabo por diversas razones. En [23] se plantea un método cuya métrica de inferencia es el RTT (*Road Trip Time*). Los resultados presentados adolecen de precisión para enlaces a partir de 100 Mbps amén de que hay un vacío de muestreo en el rango de valores de ancho de banda entre 100 Mbps a 1 Gbps que no permite conocer la bondad de la herramienta. Otra limitación del método reside en el tiempo necesario para la estimación, que se sitúa en torno a los 25 segundos de media. Por último, la asunción de considerar el RTT como dos veces el OWD (*One Way Delay*) no es realista, dada la asimetría que presentan muchos enlaces. En [18] se propone un método PRM basado también en el cálculo del OWD. Esta herramienta utiliza un particular tipo de tren de paquetes denominado *Chirp* cuya separación se ve exponencialmente reducida. Cada “par de paquetes” de prueba son inyectados con una tasa creciente, de manera que en un instante determinado se empiezan a encolar en el cuello de botella observando en la recepción un incremento del retardo denominado “excursión”. En otras palabras, las excursiones indican una situación de congestión auto-inducida que permiten calcular el ABW. La figura 6 muestra un ejemplo del encolamiento y generación de excursiones observada en el receptor.

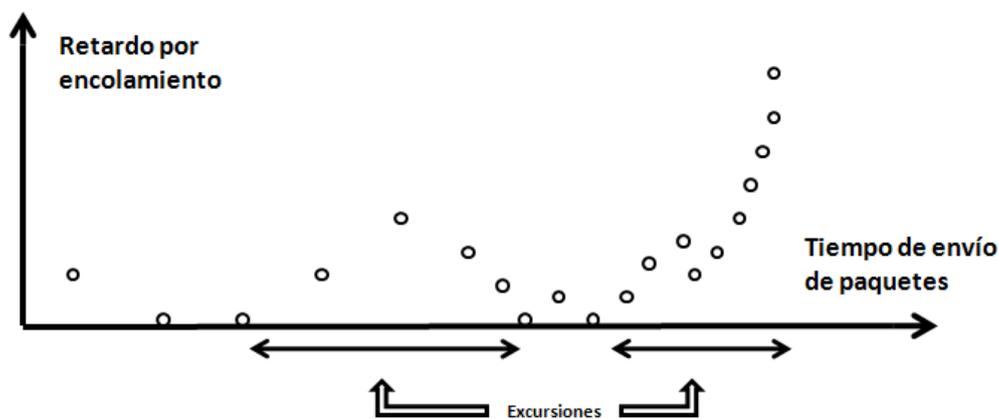


FIG 6: Retardo de encolamiento de un tren de paquetes *chirp*. Cortesía de [18].

Pathchirp es una de las herramientas más aceptadas en la literatura actual, si bien presenta una serie de limitaciones especialmente relacionadas con la intrusividad: En primer lugar los *chirp* se solapan en las colas de los nodos y se producen errores en la estimación. Además caso de reducir la tasa media de prueba, el proceso se ralentiza mucho y no por ello se reduce la cantidad de tráfico de prueba ni el impacto de los *chirp* en las colas [25]. Esta herramienta presenta una tendencia natural hacia las sub-estimaciones y en caso de que el ABW no esté situado cerca de la tasa inicial con que los trenes de *chirps* son inyectados en el enlace de interés, el método resulta poca utilidad [4].

Finalmente, otras técnicas como ASSOLO [4], Probegap [26], IGI [16] o Yaz [27] los cuales no han sido implementados. A partir de su estudio se deriva que son intrusivas y poco precisas o han quedado obsoletas para los requerimientos de la arquitectura RUBENS.

## 2.4. REVISIÓN DE TÉCNICAS DE FILTRADO Y PROCESADO DE DATOS PARA LA OBTENCIÓN DEL ABW

La segunda parte fundamental de que se compone la implementación de un sistema de estimación de ABW, consiste en la traslación de los parámetros temporales obtenidos a partir de los métodos previamente comentados en medidas efectivas de ABW que permitan posteriormente establecer el error cometido (relativo y absoluto), la intrusividad y el tiempo necesario para la estimación. Las técnicas de filtrado permiten acotar el impacto de las patologías que los sistemas extremo a extremo presentan (e.g. sincronización de sistemas, utilización del *host destino*, etc) [28]. La integración de los métodos de estimación con estas técnicas de filtrado y procesado permite mejorar la precisión y estabilidad de los resultados [4].

En la literatura y también ligados a algunos de los métodos de estimación anteriores se han encontrado diversas propuestas que han sido objeto de estudio. En esta sección se presentan las ventajas y limitaciones más relevantes derivadas de su estudio. En el anexo IV se describen detalles adicionales de la implementación y características de los métodos.

### PROCESADO BASADO EN FILTROS DE KALMAN

El filtrado de Kalman es un método numérico que permite actualizar secuencialmente la estimación del estado de un sistema. Algunos trabajos [29], [30] han utilizado este tipo de filtrado para afianzar la estabilidad de las medidas y minimizar los errores cometidos en el proceso de estimación. Las principales características que presentan son:

Ventajas:

- Evita la influencia de posibles cambios estructurales en la estimación. La estimación recursiva parte de una muestra inicial y actualiza las estimaciones incorporando sucesivamente una nueva observación hasta cubrir la totalidad de los datos. Lo anterior lleva a que la estimación más reciente de los coeficientes esté afectada por la historia lejana de la serie, lo cual en presencia de cambios estructurales podría sesgarla. Este sesgo se puede corregir con las estimaciones secuenciales pero al costo de un mayor error estándar. Así el filtro de Kalman, como los métodos recursivos, utiliza toda la historia de la serie pero con la ventaja de que intenta estimar una trayectoria estocástica de los coeficientes en lugar de una determinística, con lo que soluciona el posible sesgo de la estimación ante la presencia de cambios estructurales [31].
- El filtro se distingue por su habilidad para predecir el estado de un modelo en el pasado, presente y futuro, aún cuando la naturaleza precisa del sistema modelado es desconocida [31].

#### Limitaciones:

- Complejidad en la determinación de las condiciones iniciales: El filtrado Kalman requiere condiciones iniciales de la media y varianza del vector estado para iniciar el algoritmo recursivo. Sobre la forma de determinar estas condiciones iniciales no existe consenso. Por ejemplo, en un enfoque bayesiano este filtro requiere que se especifiquen a priori valores de los coeficientes iniciales y de sus respectivas varianzas. Una forma puede ser obtener esa información a partir de la estimación de un modelo similar al deseado pero con coeficientes fijos para un sub periodo muestral.
- Cuando se desarrolla para modelos autorregresivos los resultados están condicionados a la información pasada de la variable en cuestión. En este sentido el pronóstico con series de tiempo representa la fuerza o inercia que actualmente presenta el sistema y son eficientes únicamente en el corto plazo.

#### Conclusión

El procesado de datos basado en filtros de Kalman, ha resultado ser efectivo en entornos muy concretos, en los que se tiene un control total sobre el tráfico interferente y se han determinado claramente las condiciones iniciales. Sin embargo, esta situación es poco realista en escenarios más generales, y la determinación de estas condiciones iniciales adolece de una complejidad muy a tener en cuenta. El método permite obtener medidas de ABW a partir de muestras estimadas anteriores y una sola medida adicional actual. Sin embargo esta ventaja resulta útil en el caso de que se pretenda estimar el ABW en cada instante de tiempo, lo cual no es necesario. La estimación debe realizarse con una frecuencia variable y en función de la congestión que se produzca en el enlace de interés. Por lo tanto aunque en un primer momento sus ventajas parecen significativas, su aplicación a escenarios generales queda condicionada por la complejidad de su implementación.

#### **PROCESADO BASADO EN REGRESIÓN LINEAL**

La regresión lineal simple es un método estadístico heredado del mundo de los negocios y que se basa en identificar y cuantificar la relación funcional entre 2 ó más variables, dónde una variable es función de la otra. Una de las variable se considera independiente (variable explicativa o regresor) y la otra es la variable que se pretende explicar y predecir (también llamada regresando o variable de respuesta). En la aplicación de la regresión lineal en el ámbito de la estimación del ABW, la variable independiente es la medida de la estimación de la utilización de un determinado enlace y la variable que se pretende explicar a partir de ésta, es naturalmente el ancho de banda disponible. Es decir, existe una relación lineal entre la utilización del enlace y el ABW del enlace de interés [32].

#### Ventajas:

- La estimación de la utilización y posterior cálculo del ABW ha demostrado ser eficiente en entornos de congestión media/alta (por encima del 70% en el nodo más congestionado).

- La fiabilidad de los resultados viene refrendado por el modelo matemático, los intervalos de confianza y el parámetro “R” que indica el poder explicatorio que la variable independiente tiene sobre la variable dependiente.

Limitaciones:

- Al ser un método PRM, puede ser altamente intrusivo. Su aplicación en entornos de congestión elevada (entorno al 90% de utilización del enlace más congestionado) carece de cierta fiabilidad en las medidas.

### Conclusión

El método de procesamiento de datos para un proceso de estimación basado en la utilización del enlace, muestra un comportamiento más que aceptable en entornos de congestión media/elevada. Su aplicación en el entorno que nos ocupa es adecuada y las medidas gozan de total fiabilidad, por lo que su implementación ligada a herramientas de obtención de datos temporales, ha sido llevada a cabo.

### **PROCESADO EWMA (EXPONENTIAL WEIGHTED MOVING AVERAGE)**

Se trata de una técnica de filtrado basado en el tamaño de la ventana de filtrado  $M$  (siendo  $M$  las últimas observaciones del proceso de estimación) y una métrica  $\alpha$  (peso ó *weight* comprendido entre 0 y 1) y de cuyo valor depende la eficacia del proceso de filtrado: un valor de  $\alpha$  cercano a 0.1 proporciona una medida en un tiempo de estimación pequeño, sacrificando la estabilidad del mecanismo. Sin embargo, un valor cercano a 0.9 mejora la estabilidad, pero al darle mayor peso a las observaciones finales, el proceso se ralentiza. Algunas técnicas de estimación utilizan este tipo de filtrado para suavizar las estimaciones. Así por ejemplo Abing [17] establece un valor de  $\alpha$  de 0.75 mientras que Yaz [27] configura  $\alpha$  entorno a 0.3. Cada nueva estimación se calcula:

$$E_i = \alpha * E_{i-1} + (1 - \alpha)O_i \quad (1)$$

Siendo  $O_i$  cada una de las observaciones disponibles. Este método no se ha considerado, al considerar una mejora del mismo, denominada VHF.

### **VHF (VERTICAL HORIZONTAL FILTER)**

Se trata de una técnica basada en EWMA extraída del mundo financiero y que pretende disminuir el impacto de las estimaciones ruidosas. Los principios fundamentales en los que se basa son el tamaño de la ventana  $M$  (siendo  $M$  las últimas observaciones del proceso de estimación) y una métrica  $\alpha$  (*weight* comprendido entre 0 y 1) que a diferencia de EWMA establece de forma dinámica el valor de  $\alpha$ , en función de las  $M$  observaciones consideradas:

$$\alpha_i = \beta * \frac{\Delta_{max}}{\sum_{j=i-M}^j |O_j - O_{j-1}|} \quad (2)$$

Siendo  $\beta = 0.33$ . Cada nueva estimación se calcula a partir de la expresión del método EWMA. Una explicación más detallada del método puede encontrarse en [28].

Ventajas:

- El impacto del filtro VHF en observaciones ruidosas estabiliza las observaciones más que otros métodos anteriores.

Limitaciones:

- La utilidad del filtro queda limitada a situaciones en que la variación de las observaciones es acusada dado que suaviza esta variación. Caso de que las estimaciones no presenten un ruido medio-elevado consecuencia de los efectos que se producen en la red, su efecto, tal y como se ha comprobado experimentalmente, es prácticamente nulo.

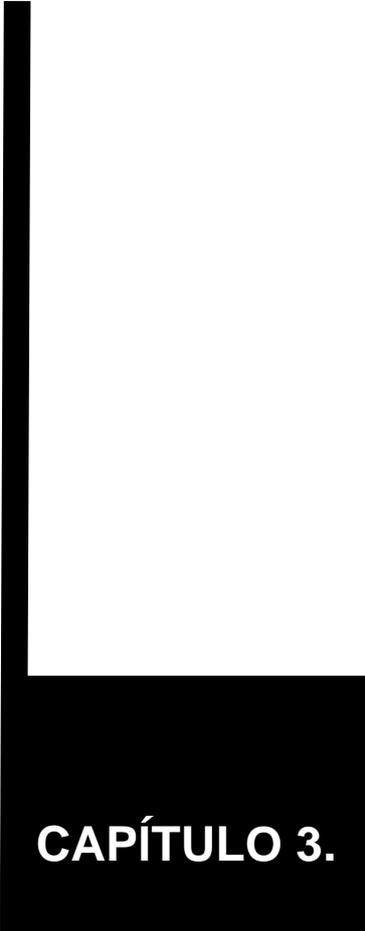
### Conclusión

Las condiciones del método, la sencillez de su implementación y la novedad de su introducción en el ámbito de la estimación del ABW, fueron a priori las claves para implementarlo sobre OPNET y estudiar su comportamiento ligado al método de estimación seleccionado.

## **2.5. CONCLUSIONES RELATIVAS AL ESTADO DEL ARTE**

Se ha realizado un exhaustivo análisis de las herramientas de estimación de ABW activas y extremo a extremo más actual de la literatura analizando los aspectos más ventajosos así como las limitaciones que presentan siempre en términos de las principales métricas que rigen el análisis, a saber: precisión, intrusividad y tiempo de estimación de las medidas. Este análisis no ha sido una mera revisión del estado del arte. La implementación de algunos de los métodos que a priori resultaban más esperanzadores en lo que a mantener el triángulo de compromiso se refiere, han presentado en general carencias importantes especialmente en términos de intrusividad y credibilidad debido a las asunciones adoptadas.

Tal y como se ha señalado en la sección 2.2, el objetivo no persigue optimizar las tres métricas dadas las restricciones actuales; por este motivo y dado que ninguna satisface las necesidades de las redes y servicios actuales (reflejadas en RUBENS) se ha propuesto el desarrollo e implementación de sistema de monitorización de ABW activo y basado en medidas activas que pretende aunar las características más ventajosas de las herramientas ya existentes y omitir aquellas partes que suponen una limitación y de este modo acercar las variables del triángulo de compromiso, mejorar las herramientas ya existentes en alguna de las métricas de interés y facilitar a la arquitectura RUBENS una funcionalidad que permita estimar de forma adecuada el ABW. En el capítulo 4 se detalla el proceso de implementación e integración de las herramientas seleccionadas para la obtención de un método de estimación de ABW.



**CAPÍTULO 3.**

**MÉTODOLÓGÍA DE  
SIMULACIÓN**

## CAPÍTULO 3. MÉTODOLÓGÍA DE SIMULACIÓN

### 3.1. MOTIVACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SIMULACIÓN

Una simulación sólo puede ser tan buena como lo sea el modelo de simulación. Esta máxima, puede considerarse uno de los pilares sobre los que se asientan los modelos de simulación. La simulación consiste en una imitación de los procesos que tienen lugar en el mundo real o los sistemas a través del tiempo. Un modelo de simulación considera un modelo de sistema y un entorno concreto en lugar del sistema físico real.

¿En qué consiste un modelo de sistema? Un modelo de sistema es una abstracción de un sistema real en el que se produce una simplificación con respecto al entorno real a través de la asunción de una serie de circunstancias y que permite capturar el comportamiento que se pretende en la simulación. Las salidas (*output*) del modelo de simulación representan una estimación del comportamiento del sistema físico.

Una pregunta fundamental es la siguiente: **¿Cuándo un modelo de simulación es adecuado?**. En primer lugar cuando la simulación permite acceder a partes del sistema que de otro modo no sería posible. El hecho de que las medidas realizadas permitan comprender el comportamiento de un sistema y permita identificar **qué** variables son las más importantes y **cómo** afectan e interactúan en el sistema, es otra razón de peso. La posibilidad de realizar pruebas sin necesidad de acceder a equipos reales supone otra ventaja de utilizar sistemas de simulación. Todas estas circunstancias, hacen que plantear un modelo de simulación en este trabajo sea adecuado.

Estudiar sistemas reales a través de sistemas de simulación lleva implícito una serie de ventajas y limitaciones que se enuncian a continuación [12]:

#### Ventajas

- Simular mejoras sin afectar a los sistemas en funcionamiento.
- Comprobar el rendimiento de nuevos sistemas sin tener que invertir previamente.
- Posibilidad de modificar la escala temporal y de observar las variables internas de funcionamiento.
- Llevar a cabo un estudio del comportamiento: Cuellos de botella, rendimiento, etc.

#### Limitaciones

- Construir modelos de simulación puede requerir tiempos de aprendizaje altos debido a la complejidad de la herramienta utilizada (curva de aprendizaje).
- El grado de fidelidad de las simulaciones está condicionado por el sistema simulado y las asunciones realizadas.
- Análisis de los resultados: La falta de relaciones analíticas o la posibilidad de extrapolar los resultados para verificar la escalabilidad del sistema, puede limitar la validez.

En cualquier caso la simulación constituye un paso previo a la implementación real de los sistemas, caso de que éstos pretendan tener relevancia y validez.

### 3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMA DE SIMULACIONES

La siguiente imagen muestra una posible clasificación de los sistemas de simulación. Siguiendo la progresión en verde, en este TFM se ha realizado un sistema dinámico discreto, por ser la herramienta de simulación seleccionada, OPNET, un software que se rige por estas características.

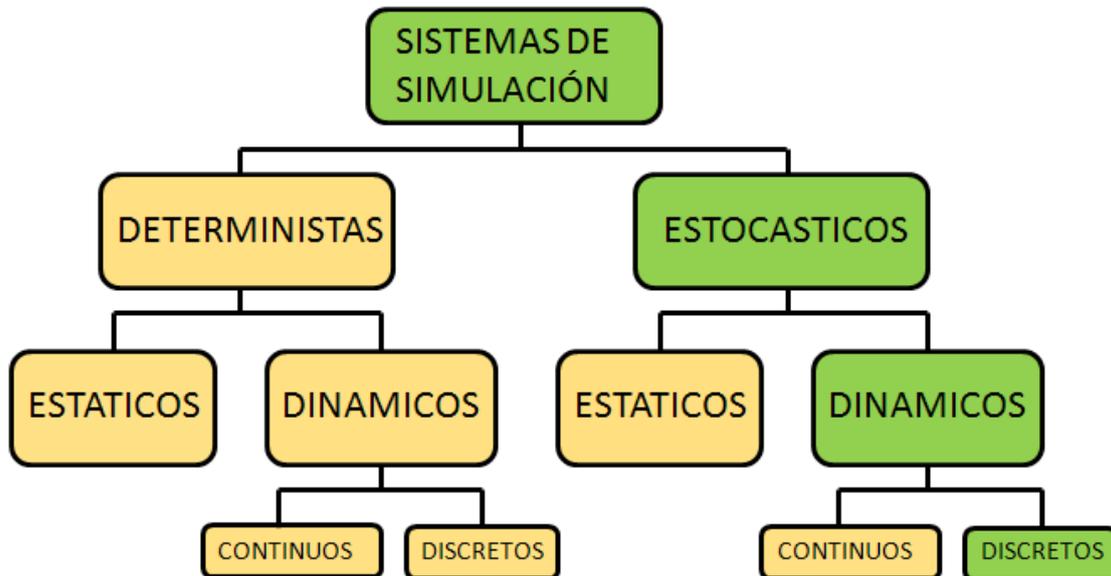


FIG 7: Clasificación de los sistemas de simulación.

### 3.3.- MÉTODOLÓGÍA DEL ESTUDIO DE SIMULACIÓN

Como se ha indicado anteriormente, uno de los aspectos fundamentales en la realización de un sistema de simulación consiste en ser metódico y seguir una serie de pasos que garanticen la fiabilidad y credibilidad de las medidas. A continuación se propone el diagrama en que se ha basado el estudio de simulación realizado para las herramientas testadas.

La definición del problema y planteamiento de los objetivos ha sido definida en el contexto de los objetivos fundamentales del TFM: Implementar una herramienta de estimación de ABW activa, extremo a extremo y que permita adaptarse de forma dinámica al estado de la congestión de la red manteniendo un compromiso entre la precisión, intrusividad y complejidad de las estimaciones. El diagrama de la figura 8 resume la metodología seguida en el estudio de simulación; en ella se aprecian las tareas clave llevadas a cabo:

El primer paso ha consistido en determinar el problema, en este caso la necesidad de una herramienta de estimación de ABW extremo a extremo. A partir de la definición del problema, el objetivo ha consistido en realizar una implementación que mantenga el equilibrio entre las métricas de interés en la medida de lo posible y se ha realizado una aproximación basada en objetivos más específicos y concretos a fin de conocer los requerimientos del sistema de simulación.

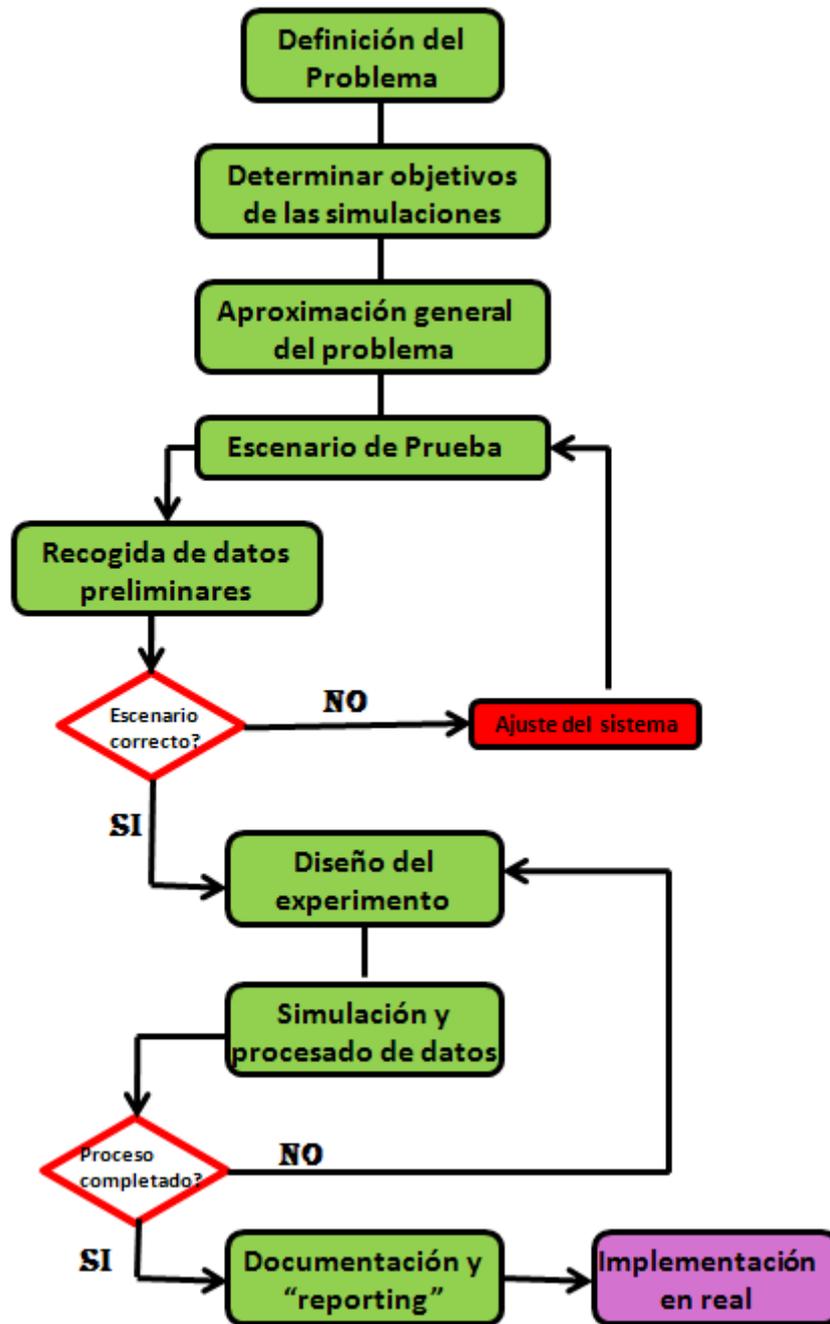


FIG 8: Metodología general del estudio de simulación.

A partir de estos requerimientos, se ha profundizado en los trabajos realizados en esta materia. Se han implementado algunas de las alternativas estudiadas en escenarios de prueba y caso de presentar un buen comportamiento se han adoptado aquellas características del método más destacables y se ha realizado un experimento sobre un escenario más completo. Completado el experimento se han analizado y procesado los resultados obtenidos y se han realizado los ajustes necesarios para optimizar el funcionamiento del sistema de simulación. Se ha comprobado así mismo la fiabilidad de las medidas realizadas. Finalmente, caso de que los resultados hayan sido satisfactorios, las características de los métodos han sido incorporadas a



la herramienta de estimación en el sistema de simulación. El paso siguiente lógico, consistiría en la implementación en real del mecanismo de estimación de ABW.

El esquema presentado es un diagrama global y generalizado, que sin embargo ha resultado de gran utilidad en la organización del trabajo a realizar. Para cada una de las herramientas testadas e implementadas se ha seguido este proceso adaptado a las circunstancias de cada herramienta particular para finalmente, incorporar al sistema sus características o descartarlas. En el siguiente capítulo se explican los sistemas de simulación implementados, las configuraciones de parámetros más importantes y el proceso de integración de todas las partes para la consecución de la herramienta de estimación de ABW.





## **CAPÍTULO 4.**

# **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ESTIMACIÓN DE ABW.**

## CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MECANISMO DE ESTIMACIÓN DE ABW, BASADO EN MEDIDAS ACTIVAS Y EXTREMO A EXTREMO.

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha ofrecido una amplia perspectiva del abanico de herramientas y algoritmos de estimación de ABW. Se han analizado sus ventajas y sus limitaciones y se han obtenido conclusiones derivadas de su análisis y en algunos casos de su implementación. De todo el estudio realizado se ha concluido, que no es posible implementar una herramienta capaz de optimizar los tres vértices del triángulo de compromiso (precisión, intrusividad y tiempo de la estimación) en redes de alta capacidad. Por este motivo, no se ha planteado el diseño de una herramienta que pretenda resolver esta limitación, sino que se han escogido las mejores características de algunos de los métodos estudiados para su integración en una nueva herramienta de estimación de ABW que cumpla los requisitos en el ámbito de la arquitectura RUBENS (i.e. buen funcionamiento en redes de alta capacidad y limitación de la intrusividad en situaciones de congestión elevada).

De acuerdo a la metodología explicada en el capítulo anterior y las características exigibles a una herramienta de estimación, se ha diseñado una herramienta donde la **fiabilidad y credibilidad** de las medidas vengan refrendadas por los métodos de procesado y filtrado de datos. Así mismo, se ha evitado realizar hipótesis que supongan una limitación implícita en la validación de las herramientas.

### 4.2. OPNET Y MATLAB COMO HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

El entorno de simulación utilizado para la realización de los escenarios, ha sido la herramienta OPNET Modeler 14.0. Sobre OPNET se han implementado y configurado distintos nodos de la red necesarios para la validación de la herramienta, tales como *router*, nodos generadores de tráfico interferente, nodos de estimación de ABW, etc. Las tareas relativas al análisis microscópico (por paquete) para la obtención de los datos temporales, han sido realizadas sobre OPNET también. La figura 9 muestra un escenario genérico de red OPNET con sus distintos niveles de actuación: Nivel de red, nivel de nodo, nivel de proceso y nivel de código. Más información sobre la herramienta OPNET puede encontrarse en [35].

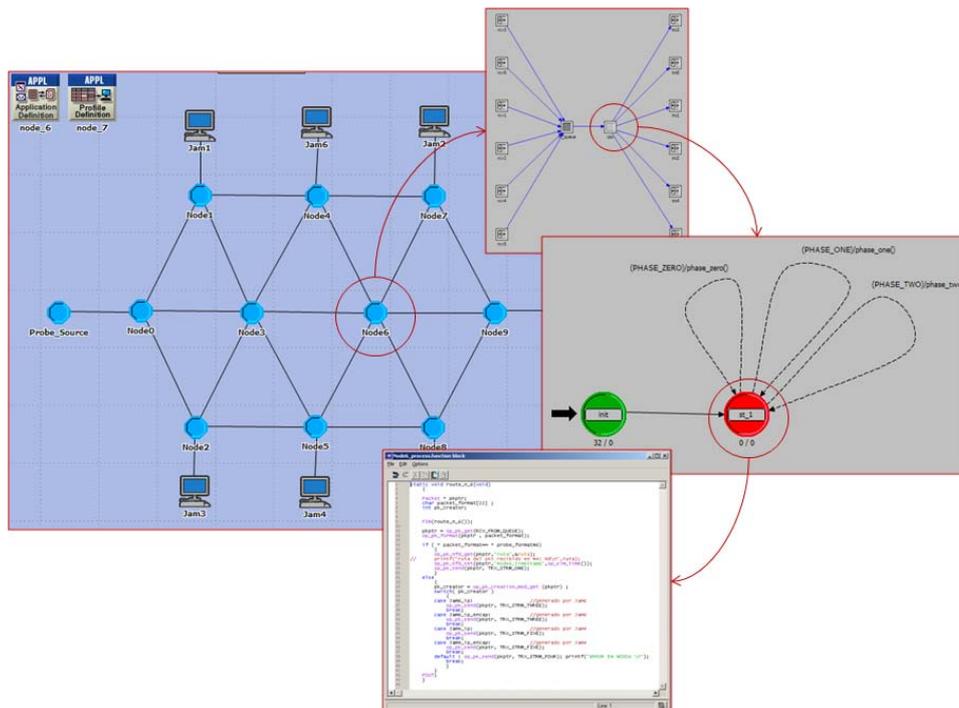


FIG 9: Implementación genérica de un escenario de red en OPNET. Cortesía de [41].

Una de las principales ventajas que ofrece OPNET es su **modularidad** en el diseño. Si bien es cierto que la curva de aprendizaje y utilización de la herramienta es elevada, la posibilidad de construir un escenario común sobre el que se puedan insertar y extraer los mecanismos de estimación de los datos temporales, apenas variando algunos bloques concretos, dota de gran potencia y efectividad a las simulaciones. La variación de parámetros y variables concretas del escenario, también se gestiona de forma eficiente gracias a la modularidad de los sistemas implementados.

El procesado, filtrado y traslación de parámetros temporales en medidas de ABW, se ha llevado a cabo con la herramienta MATLAB 7.04. Los diversos scripts implementados toman como datos de entrada los registros temporales proporcionados por OPNET en formato “\*.txt” y devuelven las estimaciones de ABW realizadas. Información adicional sobre la herramienta puede ser consultada en [36].

### 4.3. ESCENARIO DE SIMULACIÓN. HERRAMIENTA OPNET

En esta sección se describe el escenario final implementado en el cual se integran los algoritmos de estimación de ABW (ver figura 10). Se trata de un escenario de red compuesto por usuarios finales los cuales establecen sesiones entre pares (a partir de la definición de perfiles y aplicaciones facilitados por la herramienta) congestionando los nodos intermedios de la red. Los *Access Gateway* (AGWi) son los puntos de acceso que los usuarios tienen hacia la red de acceso, la cual se compone de diversos *router* a través de los cuales se transmite tanto el tráfico interferente como el tráfico propio de las estimaciones de ABW.

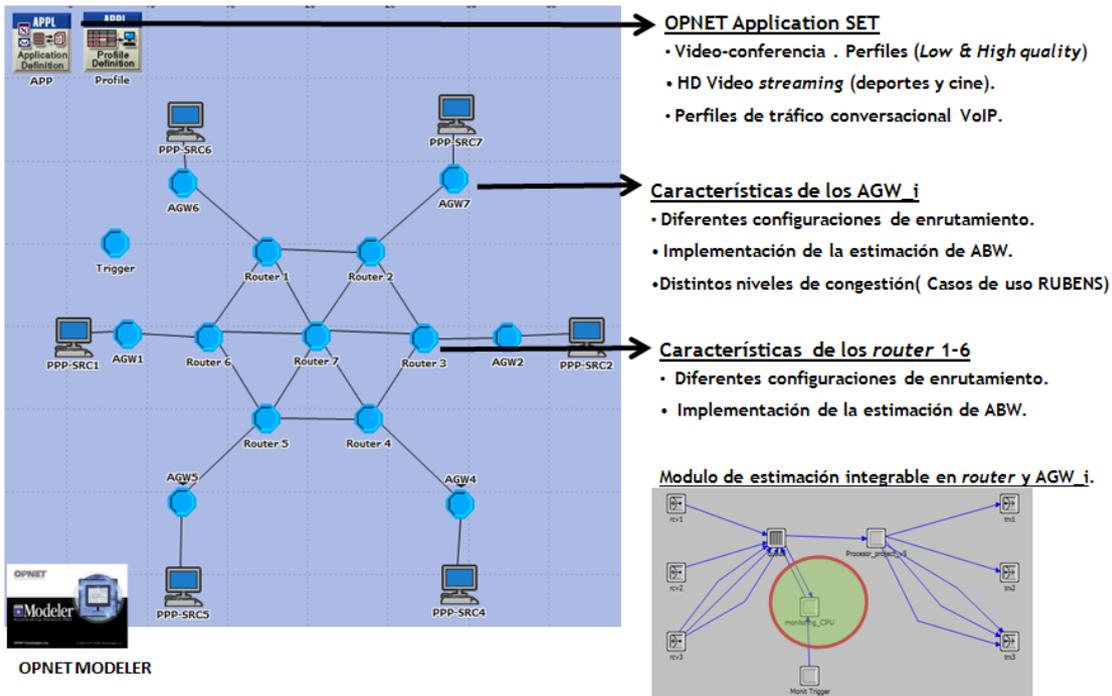


FIG 10: Escenario implementado y sus características para la realización de simulaciones.

#### 4.3.1. DESCRIPCIÓN Y COMPONENTES DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN

Una de las características más potentes de OPNET es la posibilidad que ofrece de realizar un diseño modular y desarrollar aquellas funcionalidades concretas, necesarias para la estimación de ABW. A continuación se detallan las funcionalidades más relevantes implementadas en los componentes del escenario:

- *Application-SET*: No todos los componentes del escenario han sido implementados sino que también se ha hecho uso de las librerías proporcionadas por la herramienta. Las sesiones de VoIP y video han sido configuradas a través de los módulos de creación de perfiles para usuarios y definición de las aplicaciones que suponen dichos perfiles.
- PPP-SRC $i$ : Representan a los usuarios finales. Este componente es propio de la librería OPNET y lo que se ha hecho ha sido configurar perfiles con diversas aplicaciones de video y audio, de manera que se establezcan sesiones entre pares a través de la red creando tráfico interferente.
- *Access Gateway* (AGW $i$ ): Son el punto de salida de las sesiones de usuario hacia la red. Dentro de este componente se han implementado dos funciones fundamentales:
  - Enrutamiento: El algoritmo de enrutamiento tiene como principal característica la posibilidad de configurarlo de forma estática (para realizar simulaciones de forma controlada) o de forma dinámica en función de la métrica que se elija (en este caso enrutamiento basado en el ABW disponible en los *router* de la red). Como el enrutamiento no es el objetivo principal del TFM, se ha configurado la opción estática por defecto.
  - Niveles de congestión: Se han simulado diversos niveles de congestión en el salto PPP-SRC $i$  y su AGW $i$  correspondiente. Con esto se pretende simular una

situación muy habitual en entornos reales: La congestión que se produce en la última milla.

- *Router*: Es uno de los módulos fundamentales del sistema. Los nodos R1-R6 son considerados nodos de acceso. Las funcionalidades que se han implementado en este tipo de nodos son:
  - Enrutamiento: Las características son las mismas que las definidas para el enrutamiento de los AGWi.
  - Estimación de ABW: Los algoritmos de estimación de ABW (en concreto el mecanismo de estimación y obtención de medidas temporales) se ha integrado en los nodos de acceso dado que la estimación de ABW se realiza extremo a extremo. Tal y como se muestra en la figura anterior, se trata de un módulo que se puede reemplazar de forma rápida y eficaz en función del algoritmo de estimación utilizado.
- El *router* R7 es considerado un nodo interno de la red al cual no se tiene acceso. En él se ha configurado únicamente la función de enrutamiento.

Las funcionalidades implementadas permiten realizar una estimación de los parámetros temporales (paso 1 de la herramienta de estimación de ABW completa) teniendo en cuenta las hipótesis de partida asumidas en la sección 4.4. La modularidad del sistema permite que cualquiera de los R1-6 realice la estimación de ABW para cualquiera de las rutas definidas entre dos nodos extremos del sistema.

## 4.4. IMPLEMENTACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE OBTENCIÓN DE DATOS TEMPORALES

### 4.4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

El modelado de las colas de los *router*, la caracterización del tráfico interferente y el tamaño de los paquetes de monitorización son características comunes a los escenarios de simulación que se comentan a continuación

#### MODELO DE COLAS FIFO

Asumir que las colas de todos los *router* presentes en una red es una hipótesis con la que trabajan todos los estudios sobre estimación de ABW, puesto que en caso de considerar políticas de servicio en la gestión de colas, cualquier trabajo basado en la estimación de medidas temporales (especialmente de retardos entre paquetes de estimación) no tendría sentido.

#### CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO INTERFERENTE

La definición y caracterización del tráfico interferente que circula por la red es una parte fundamental del escenario. Hay que tener en cuenta que la implementación del mecanismo de estimación de ABW conlleva un análisis microscópico (o por paquete), por lo que la interacción entre los paquetes de estimación y de tráfico interferente determina en gran medida los resultados derivados de la estimación.

En definitiva, es necesario dotar de la mayor generalidad posible a la estructura del tráfico interferente, admitiendo que no está claro que dicha generalización sea adecuada para las particularidades que cada red concreta pueda presentar. Es decir, el tipo de datos y su estructura no será la misma en una red dedicada a la provisión de contenidos multimedia que una red doméstica dedicada al intercambio de ficheros vía FTP, por ejemplo.

El modelo de tráfico escogido ha sido utilizado en trabajos recientes [37]. Este modelo asume que paquetes de un determinado y restringido número de tamaños representan la mayoría de los paquetes característicos de internet. A partir de un estudio realizado en [38] puede observarse que la mayoría de los paquetes son de 40, 576 y 1500 bytes. La PFM (*Probability Mass function*) para los paquetes de 40 bytes es del 50%, del 10% para los paquetes de 576 bytes y del 40% para los paquetes de MTU o 1500 bytes. A partir de esta PFM y estos tamaños de paquete se configuran las tasas de tráfico interferente que saturan el enlace de estudio.

#### COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO INTERFERENTE

La mayoría de los paquetes de tráfico interferente sólo comparten un salto, del total de los saltos del enlace, con los paquetes de estimación. Esta hipótesis es importante dado que concuerda con la situación que se produce en la mayoría de las redes de comunicaciones.

#### TAMAÑO DE LOS PAQUETES DE LA ESTIMACIÓN

Otra característica fundamental en el proceso de estimación consiste en determinar el tamaño de los paquetes de estimación. El tamaño del paquete no debe superar en ningún momento el valor del MTU soportado por esa tecnología, pues en caso contrario las estimaciones serían erróneas dado que se produciría una fragmentación de los mismos. Para nuestro estudio se ha escogido por defecto el MTU que utilizan la mayoría de las redes de área local Ethernet, 1500 bytes tanto para mecanismos basados en PRM como para los basados en PGM.

Una vez enumeradas las características comunes a los mecanismos de estimación, se explicarán las características particulares de los sistemas PRM (Utilización + FEAT) y PGM (ABwE + VHF) implementados.

#### **4.4.2. MÉTODO BASADO EN PRM**

La implementación de una herramienta basada en PRM tiene como objetivo principal la precisión de las medidas, minimizando en la medida de lo posible el impacto producido por la intrusividad. A partir del estudio y análisis de la literatura realizado en el capítulo 2, se han observado dos métodos con determinadas características que potencian la obtención de una buena estimación. Estas características son:

- Característica 1: La relación entre la utilización del enlace que se pretende monitorizar y el ABW es lineal [30]. Se hará uso de esta característica en el procesado de los paquetes de estimación.
- Característica 2: Los trenes de paquetes conformados por sectores (figura 11), permiten el envío de ráfagas en un rango de tasas de prueba de mayor o menor carga en función del sector al que pertenezcan (tasa de prueba variable). Se han configurado

diversas estrategias de conformación de sectores, entre las que cabe destacar las dos siguientes:

- Sectores internos doble paquetes: El número de paquetes por tren configurado en los sectores internos es el doble que el número de paquetes configurado en los sectores externos.
- Sectores externos doble paquetes: El número de paquetes por tren configurado en los sectores externos es el doble que el número de paquetes configurado en los sectores internos.

Además de configurar el número de paquetes por tren, también es preciso configurar la separación entre los paquetes de un mismo sector. Esta separación viene determinada por los valores  $\Delta$  y  $\gamma$ . En la figura se observa una configuración en la que el número de paquetes en los sectores internos es mayor que para los sectores externos y como la separación entre paquetes viene exponencialmente determinada por  $\Delta$  y  $\gamma$ . En [20] se encuentra la explicación completa del método de envío de paquetes de prueba al enlace.

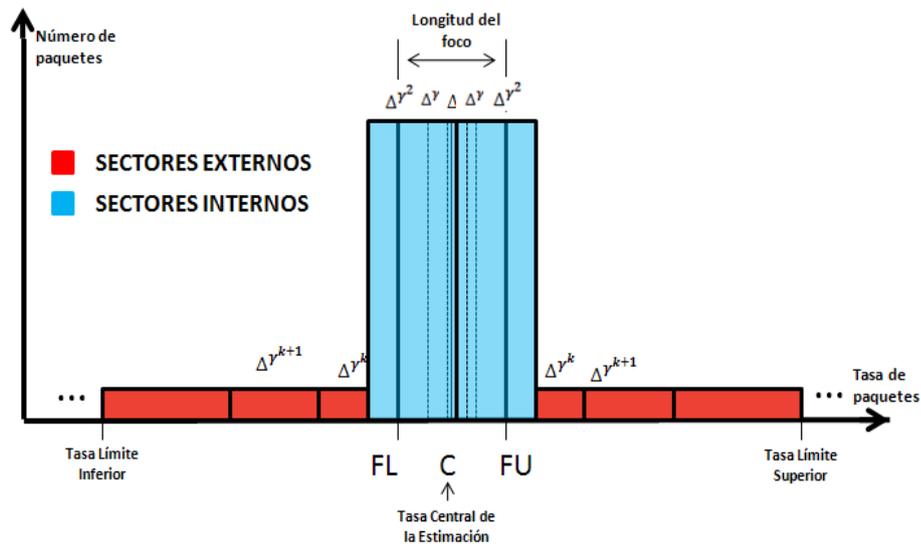


FIG 11: Sectorización de las tasas configuradas para los paquetes de un tren de estimación.

A partir de la integración de ambas características se ha implementado un método activo, PRM y extremo a extremo que envía ráfagas de paquetes para estudiar la utilización de las colas de los *router* del enlace de interés (característica 1). Para el envío se ha considerado un conformado del tren uniforme y posteriormente un conformado sectorizado (característica 2). A partir de la integración de ambas partes se han llevado a cabo el siguiente grupo de simulaciones:

TRAFICO DE ESTIMACIÓN	MODO DE SECTORIZACIÓN	GRADO CONGESTIÓN DEL ESCENARIO
CONFORMADO UNIFORME	—	MEDIO/ALTO
CONFORMADO UNIFORME	—	ALTO
CONFORMADO SECTORIZADO	SECTORES EXTERNOS DOBLE DE PAQUETES	MEDIO/ALTO
CONFORMADO SECTORIZADO	SECTORES EXTERNOS DOBLE DE PAQUETES	ALTO
CONFORMADO SECTORIZADO	SECTORES INTERNOS DOBLE DE PAQUETES	MEDIO/ALTO
CONFORMADO SECTORIZADO	SECTORES INTERNOS DOBLE DE PAQUETES	ALTO

**TABLA 2: Resumen de simulaciones más relevantes para la validación del método PRM.**

Cada una de las simulaciones anteriores, comprende a su vez un sub-conjunto de simulaciones, dado que además de variar el “modo de sectorización” existen otras variables del algoritmo modificables que permiten de ajustar los parámetros para un funcionamiento adecuado. Estas variables son el número de paquetes por tren y el rango de variación de las tasa de prueba configuradas. A partir de las simulaciones realizadas, se han determinado los valores de estos parámetros y se han llevado a cabo las simulaciones de la tabla anterior.

#### 4.4.3. MÉTODO BASADO EN PGM

En situaciones de congestión elevada, la intrusividad originada por una herramienta de estimación de ABW es un factor crítico. Por este motivo se ha diseñado un método basado en pares de paquetes (PGM) cuya intrusividad es muy pequeña en comparación al método PRM anterior y será utilizado en situaciones de congestión elevada. Para ello se ha revisado el estado del arte de este tipo de mecanismos de estimación y determinar las características que a priori puedan prestar un mejor servicio en la implementación de una herramienta PGM.

La simplicidad de los métodos basados en el envío de paquetes, deja un margen estrecho de características y parámetros a considerar. En este trabajo se ha optado por simular parte del algoritmo presentado en [23]. El método asume que los pares de paquetes de estimación enviados al enlace de interés (denominados PP1 y PP2) sufren dos tipos fundamentales de dispersión (lineal y no lineal) originada por distintas causas:

- La dispersión lineal es consecuencia directa de la inserción de paquetes de tráfico interferente entre los paquetes PP1 y PP2 del par de la estimación. En esta situación, el tiempo entre PP1 y PP2 (denominado  $Td$ ) en recepción, se incrementa de forma discreta y lineal en función del número y el tamaño de los paquetes de tráfico interferente.
- La dispersión no lineal es consecuencia del ratio “ensanchado” y “contracción” de los paquetes PP1 y PP2 consecuencia de la diferencia entre las capacidades de entrada y salida de un determinado salto. Así, el efecto de pasar de un enlace de capacidad de salida,  $C_{salida}$ , mayor que la capacidad del enlace de entrada  $C_{entrada}$  se traduce en una “contracción” del par de paquetes, mientras que en caso de que  $C_{salida} < C_{entrada}$ , se producirá el efecto contrario, es decir, un ensanchamiento en tiempo

de los paquetes de estimación. La “contracción” y “ensanchamiento” de los pares de paquetes, origina que también se absorban paquetes de tráfico interferente.

Ambas situaciones producen el mismo efecto en recepción: los pares de paquetes PP llegan al receptor con un retardo modificado respecto a su configuración inicial en el transmisor como consecuencia de la inserción uno, dos o más paquetes de tráfico interferente entre PP1 y PP2. En esta situación, el retardo entre paquetes estará muy cercano al tiempo necesario para transmitir los paquetes de tráfico interferente que se han introducido entre PP1 y PP2. Este término es la característica en cuestión y se denomina factor QFD (*Queuing Delay Factor*). Los paquetes de tráfico interferente de menos tamaño (40 bytes) ocasionan una mínima dispersión del retardo  $T_d$ , mientras que los paquetes de mayor tamaño 576 y 1500 bytes (más próximos al tamaño de los paquetes de estimación) originará que  $T_d$  se vea afectado por un factor 2, 3, etc. correspondiente a la inserción de 1, 2, etc. paquetes de tráfico interferente. A partir de la determinación de este factor QFD, es posible determinar el ABW del enlace.

En enlaces de alta capacidad, la determinación del factor QFD adolece de cierta imprecisión como se ha podido comprobar en las simulaciones realizadas. Dada la baja intrusividad de la herramienta, el método se ha simulado con distinto número de pares de paquetes con objeto de afinar el ajuste. De los N pares de paquetes se extraen N valores de QFD cuyo valor medio se da como válido para el posterior procesado y obtención del ABW.

El factor QFD se obtiene a partir de la expresión:

$$QFD = (T_{d_{ij}} - T_{d_{min}}) / N_{TT} \quad (3)$$

Donde  $T_{d_{ij}}$  es el retardo experimentado por uno de los N pares de paquetes del proceso de estimación,  $T_{d_{min}}$  es el mínimo de los  $T_{d_{ij}}$  de los N pares y  $N_{TT}$  (*Nominal Transmission Time*) es el tiempo nominal de transmisión. Todos los datos son conocidos o pueden ser calculados.

A partir del valor QFD se calcula el ABW como:

$$ABW = (L_{pp} + QFD * L_{CT}) / T_{d_{ij}} \quad (4)$$

Donde  $L_{pp}$  es el tamaño de los paquetes de la estimación PP1 y PP2 y  $L_{CT}$  es el tamaño de los paquetes de tráfico interferente.

Al igual que sucedía con el método basado en PRM, existen diversos parámetros cuya configuración resulta fundamental para un adecuado funcionamiento de la herramienta. Se detallan a continuación estos parámetros y las implicaciones de su configuración a partir de las simulaciones realizadas.

#### CONFIGURACIÓN DEL PARÁMETRO $L_{CT}$

La elección de  $L_{CT}$  es un aspecto importante en la configuración del sistema. Empíricamente, se ha comprobado que un valor que se ajusta bien viene dado por la media del tamaño de los paquetes de tráfico interferente:

$$L_{CT} = \frac{8 \cdot (576 + 1500)}{2} \quad (5)$$

Sin embargo, es importante dejar claro que el valor de  $L_{CT}$  escogido es función directa de la caracterización del tráfico interferente aceptada como válida. Caso de realizar una caracterización del tráfico interferente distinta a la propuesta en este TFM, sería necesario adaptar.

#### SEPARACIÓN TEMPORAL DE LOS PAQUETES DE UN MISMO PAR

Se han considerado diversas opciones a la hora de configurar el tiempo entre paquetes de un mismo par:

- Opción 1: Sin separación temporal entre paquetes: Esta opción en principio cómoda fue considerada en un primer momento. Sin embargo desde un punto de vista de aplicabilidad práctica no es eficiente por dos motivos fundamentales: En primer lugar por la imposibilidad de mandar dos paquetes exactamente en el mismo instante temporal (con una resolución de nano o pico segundos). En un entorno de simulación es posible implementar esta opción, no así con máquinas reales. Por otro lado, si se realizan el envío de paquetes de un mismo test sin establecer una separación entre ambos, no se “cuelan” paquetes de tráfico interferente, lo cual se traduce en que la estimación de ABW da como resultado una estimación de la capacidad del cuello de botella.
- Opción 2: Separación entre paquetes en función de la capacidad del enlace más débil: Este método se divide en dos pasos: Primero, se realiza un test para determinar la capacidad del enlace de interés, haciendo que la separación de los paquetes de estimación sea tan pequeña como sea posible (en un sistema real hay limitaciones de resolución temporal) o en una plataforma de simulación, no dejando separación entre los paquetes. Estimada la capacidad del enlace, se calcula el NTT para el tamaño de paquete de estimación seleccionado y se configura como separación temporal entre paquetes de un mismo par. Esta segunda opción es la que se ha implementado.

#### SEPARACIÓN TEMPORAL ENTRE PARES DE PAQUETES

La pregunta que se plantea a la hora de establecer este parámetro es: “¿Se produce algún tipo de interferencia entre pares consecutivos de paquetes que puedan falsear las medidas de ABW?”. Simulaciones realizadas variando este parámetro, demuestran que la precisión de las medidas no se ve afectada por este parámetro. Por lo tanto, se ha establecido un valor relativamente bajo (para optimizar el tiempo de la estimación).

#### NÚMERO DE PARES DE PAQUETES PARA LA OBTENCIÓN DE UNA MEDIDA

En [23] se propone la utilización 20 pares de paquetes para obtener una medida de ABW. Igual que en el caso anterior, se han realizado simulaciones para establecer si ese número de paquetes era el adecuado. El sentido común hace pensar que cuanto mayor sea el número de pares de paquetes para realizar la estimación, mayor precisión se logrará en las medidas. La precisión de los resultados obtenidos debido a la variación de este parámetro muestra que no

existe una relación significativa, por lo que escogeremos número de pares de paquetes pequeño a fin de evitar que sea un sistema intrusivo.

La tabla siguiente resume los parámetros cuya configuración han requerido de un análisis previo y los valores que se han tomado para la realización de las simulaciones.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN DE $L_{CT}$ [BITS]	TIEMPO ENTRE PAQUETES DE UN PAR [s]	TIEMPO ENTRE PARES DE PAQUETES [s]			#PARES DE PAQUETES POR ESTIMACIÓN [#]
OPCIONES CONSIDERADAS	12000	0	0.02	0.04	0.06	20 40 60
	8304	0.0000192	0.08	0.1	0.12	80 100 120
OPCIÓN ESCOGIDA	8304 Bits	19.2 $\mu$ s	0.12 s			80 Pares

TABLA 3: Resumen de la configuración de parámetros para el mecanismo basado en PGM.

En esta sección se han presentado las características más atractivas para la implementación de un algoritmo de estimación de ABW. Se han presentado alternativas tanto para métodos PRM como PRM y se ha especificado razonada y empíricamente la configuración de los parámetros necesarios para un adecuado funcionamiento de la herramienta. En la siguiente sección se especifican las características escogidas para la traslación de datos temporales a datos de ABW.

#### 4.5. IMPLEMENTACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE FILTRADO, PROCESADO Y TRASLACIÓN DE DATOS.

Los métodos de procesado de datos que se presentan a continuación pueden interpretarse como una caja negra, la cual toma como entrada un archivo de texto que contiene los datos de las medidas temporales realizadas bien por el método PRM, bien por el método PGM. La caja negra en cuestión, consiste en el procesado de datos, el cual se ha llevado a cabo a través de la implementación de *scripts* en MATLAB.

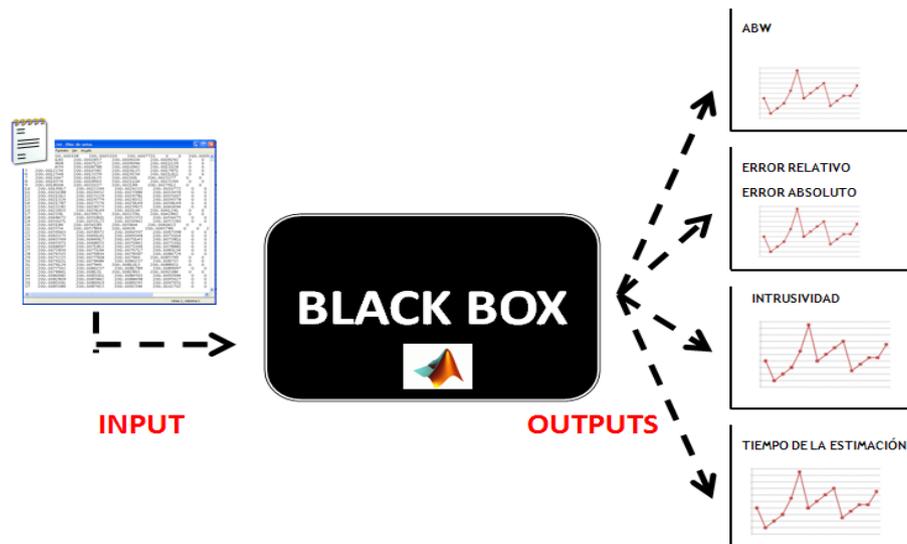


FIG 12: Simplificación del procesado de datos: Traslación de tiempo a ABW y métricas.

#### 4.5.1. PROCESADO DE DATOS BASADO EN REGRESIÓN LINEAL

La regresión lineal y su aplicación al ámbito de la estimación del ABW han sido revisadas en el capítulo 2. El método PRM basado en la estimación de la utilización del enlace, supone un número de medidas que permite utilizar la técnica de regresión lineal para estimar de forma precisa el ABW.

El procesado por regresión lineal simple sigue los siguientes pasos:

- 1.- En primer lugar se configuran los parámetros necesarios de acuerdo con la tabla 2.
- 2.- Se lee el fichero de texto que contiene los datos temporales y se detectan posibles pérdidas de paquetes. Caso de que se detecte la pérdida de un paquete de un tren, la ráfaga completa correspondiente a ese tren de paquetes es descartado y es necesario repetir la medida.
- 3.- Para cada uno de los trenes de paquetes enviados se calcula la utilización “U” del enlace. En función de la tasa configurada para cada tren, la utilización calculada varía y su resultado se sitúa sobre la recta que permite el cálculo del ABW a partir del proceso de regresión lineal.
- 4.- Se realiza un filtrado y ajuste de la recta. Esta recta refleja la relación directa que existe entre la utilización del enlace y la tasa de estimación utilizada.
- 5.- Se determina la existencia o no de posibles puntos marginales u *outliers*. En caso de haber *outliers* que representen errores en la estimación estos son eliminados de la recta de regresión a fin de evitar alteraciones en la medida.
- 6.- Cálculo de los intervalos de confianza y los intervalos de predicción al 95%.
- 7.- Cálculo del factor  $R^2$  ó coeficiente de determinación: este factor mide el poder explicatorio del modelo lineal [39]. Es decir, indica la influencia que en el modelo lineal, la variable independiente (tasa de prueba configurada para cada tren) tiene sobre la variable dependiente (utilización del enlace). Este factor es importante, pero no mide la fiabilidad de la medida.

8.- Validación del modelo a partir del índice de reducción de validación cruzada. Consiste en dividir aleatoriamente la muestra en dos grupos y utilizarlos para obtener dos modelos con el fin compararlos para comprobar si se obtienen similares resultados. A partir de la diferencia entre el cuadrado de ambos coeficientes  $RC = (Ra^2 - Rb^2)$  correspondientes a los dos grupos muestrales, se determina el validez de la aplicación del modelo regresión lineal a los datos seleccionados. Valores de este índice inferiores a 0.1 indican que el modelo es muy fiable mientras que valores superiores a 0.9 corresponden a modelos muy poco fiables [40].

9.- Validado el modelo de regresión lineal a partir de los pasos 7 y 8, se determina el valor de ABW a partir de la tasa de pruebas que supone un valor de utilización de "1". El siguiente esquema resume el proceso de cálculo del ABW a partir de la recta de regresión lineal.

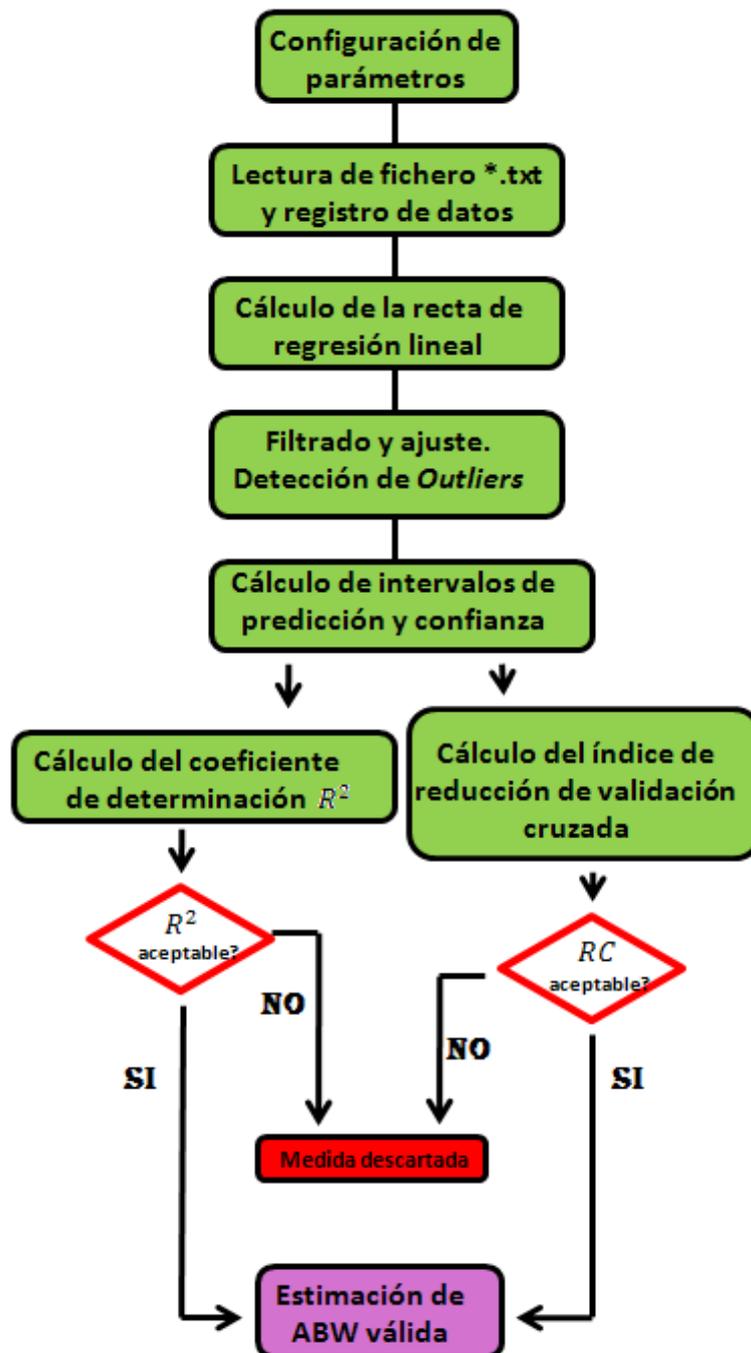


FIG 13: Procesado y obtención de la medida de ABW a partir del método basado en regresión lineal.

#### 4.5.2. PROCESADO DE DATOS BASADO EN VHF

Tal y como se presentó en el capítulo 2, VHF (*Vertical Horizontal Filter*) es una técnica de filtrado evolución de EWMA y heredada del ámbito financiero. En estudios anteriores esta técnica ha demostrado reducir el impacto de las observaciones ruidosas y mostrando una buena estabilidad de las medidas. La idea fundamental que se persigue la aplicación del filtro, es detectar los cambios bruscos y no persistentes. Caso de que la medida  $ABW_i$  presente una variación significativa respecto a la medida  $ABW_{i-1}$  y las medidas siguientes mantengan aproximadamente el valor de la medida  $ABW_i$ , el filtro convergerá hacia este valor. En caso contrario (si la variación no es persistente) la medida se mantiene en torno al valor de  $ABW_{i-1}$ . En definitiva, se trata de un filtrado insensible a variaciones bruscas e instantáneas de ABW.

La implementación de VHF se ha realizado a partir del trabajo descrito en [28]. Se ha realizado un estudio empírico para determinar el ajuste de parámetros adecuado al escenario de simulación propuesto. Estos parámetros son el valor del umbral  $\beta$  y el tamaño  $M$  de la muestra de medidas de ABW que se toman. Se han llevado a cabo varias simulaciones variando el parámetro  $\beta$  entre 0 y 1 uniformemente a intervalos de 0.1. también se han realizado simulaciones para determinar el valor adecuado de  $M$ . Los resultados muestran los valores escogidos en [28] se adecuan al escenario simulado, lo cual constituye una ventaja adicional dada la generalización que presenta el método en los que ha configuración de parámetros se refiere.

En este trabajo se ha considerado aplicar el método VHF sobre el modelo de estimación de datos temporales basado en pares de paquetes PGM. Su estudio y aplicabilidad sobre el método basado en PRM queda como posible línea de trabajo futuro.

El proceso de filtrado se realiza al final del proceso de estimación de ABW. De forma similar al método anterior, comprende los siguientes pasos:

- 1.- Configuración de los parámetros  $\beta$  y  $M$ .
- 2.- Lectura del fichero de texto con los datos temporales. Detección de posibles pérdidas de paquetes. Caso de que se detecte la pérdida de un paquete de un par, el par es descartado de cara a la estimación media del ABW.
- 3.- Identificación del valor QDF medio a partir de la expresión (3) y del valor de ABW medio a partir de la expresión (4).
- 4.- A partir de  $M$  medidas, aplicación del filtrado VHF.
- 5.- Determinación de los intervalos de confianza para las medidas de ABW obtenidas.

En este caso no es necesario validar la utilización del filtro VHF. EL método basado en regresión lineal sí es preciso validarlo dado que su aplicabilidad depende de la determinación de la recta de utilización y existen situaciones (en condiciones de congestión elevada) en las que si bien la medida de ABW presenta un alto grado de precisión, los parámetros  $RC$  y  $R^2$  indican que el método no tiene validez haciendo que la medida carezca de validez. Sin embargo, la aplicación

del filtrado VHF, propone suavizar las estimaciones realizadas y estabilizar la medida de ABW, no necesitando de su validación.

#### 4.6. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA Y SIMULACIONES

En secciones anteriores de este capítulo, se han descrito los algoritmos de estimación de parámetros temporales (métodos PRM y método PGM) así como las técnicas de filtrado, procesado y traslación de las medidas temporales a estimaciones de ABW. El objetivo principal de este trabajo pretende, a partir de estas características, construir una herramienta de estimación de ABW.

Por un lado se ha considerado la estimación de los parámetros temporales a partir de la generación de trenes de paquetes y el procesado de estos datos basado en regresión lineal simple. Los trenes de paquetes configurados a diversas tasas de prueba permiten establecer una relación lineal entre la utilización y el ABW del enlace, del cual se deriva el ABW a partir de la aplicación del método basado en regresión lineal.

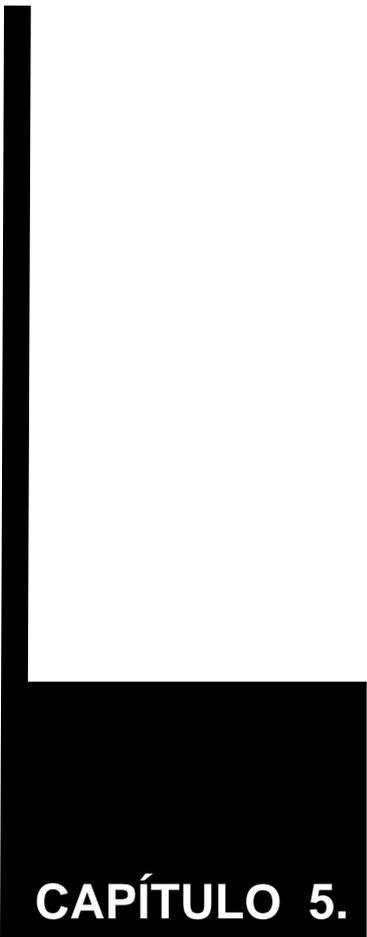
Por otro lado, se ha considerado un método de estimación de los parámetros temporales menos intrusivo, basado en el envío de pares de paquetes. Los métodos basados en PGM adolecen sin embargo de imprecisión en las medidas. Por esta razón y a diferencia de otros métodos basados en PGM, se ha optado por estimar el enlace utilizando más de un par de paquetes en cada medida. A partir de la media ponderada de las medidas obtenidas para cada par de paquetes, se pretende estudiar si mejora la precisión, sin por ello incrementar la intrusividad significativamente. La configuración de los pares de paquetes no permite realizar un procesado basado en regresión lineal dado que el número de muestras no es suficiente para establecer una relación lineal de las medidas. Se ha optado por aplicar un filtro VHF a fin de obtener las estimaciones de ABW.

En definitiva, se ha realizado la implementación de 2 herramientas:

- Herramienta basada en PRM + Procesado mediante regresión lineal.
- Herramienta basada en PGM + filtrado VHF.

Ambas herramientas se han configurado en el escenario previamente presentado. Se han realizado simulaciones que permitan determinar las métricas descritas en el capítulo 2 y validar o no las herramientas de estimación de ABW.





## **CAPÍTULO 5.**

## **RESULTADOS DE SIMULACIÓN**

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presentan los resultados más relevantes que han permitido validar o descartar los métodos implementados. La evaluación se ha llevado a cabo a partir de las métricas explicadas en el capítulo 2: Estimación del ABW, precisión de la medida, intrusividad y tiempo de la estimación.

En la plataforma de simulación se han configurado ambas herramientas (PRM y PGM) de estimación de ABW con sus parámetros, variando el ratio de congestión de los saltos de los enlaces para estudiar su comportamiento en situaciones de congestión nula, congestión media y congestión elevada. La siguiente tabla muestra el resumen de simulaciones realizado.

		SALTO 1	SALTO 2	SALTO 3	SALTO 4	ABW REAL
<b>HERRAMIENTA</b>	<b># SIM</b>	<b>1000 Mbps</b>	<b>4976 Mbps</b>	<b>622 Mbps</b>	<b>100Mbps</b>	
PRM uniforme	SIM 0	0	0	0	0	100 Mbps
PRM uniforme	SIM 1	0.1	0.2	0.1	0.2	80Mbps
PRM uniforme	SIM 2	0.95	0.2	0.1	0.1	50 Mbps
PRM sectores ext.	SIM 3	0	0	0	0	100 Mbps
PRM sectores ext.	SIM 4	0.1	0.2	0.1	0.2	80Mbps
PRM sectores ext.	⊗	0.95	0.2	0.1	0.1	50 Mbps
PRM sectores int.						100 Mbps
PRM sectores int.	SIM 5	0.1	0.2	0.1	0.2	80Mbps
PRM sectores int.	SIM 6	0.95	0.2	0.1	0.1	50 Mbps
PGM	SIM 7	0	0	0	0	100 Mbps
PGM	SIM 8	0.1	0.2	0.1	0.2	80Mbps
PGM	SIM 9	0.95	0.2	0.1	0.1	50 Mbps

TABLA 4: Resumen de simulaciones realizadas para el análisis de las herramientas de estimación de ABW.

### 5.2. RESULTADOS PARA EL MÉTODO BASADO EN PRM

El método basado en PRM tiene como característica fundamental una relación lineal entre la tasa de prueba y la utilización del enlace, a partir de la cual es posible determinar el ABW. El hecho de utilizar la regresión lineal hace necesario que además de obtener medidas de ABW, intrusividad, precisión y tiempo de la estimación, éstas tengan validez en contexto de la regresión lineal. Es decir, es necesario evaluar y validar la adopción de la regresión lineal como requisito para validar los resultados de las métricas de interés. Por este motivo, también se han obtenido resultados relativos a los parámetros factor  $R^2$  ó coeficiente de determinación y el índice de reducción de validación cruzada.

### 5.2.1. ESTIMACIÓN DE ABW Y CÁLCULO DEL ERROR RELATIVO PARA CONGESTIONES MEDIA Y ALTA

La figura 14 muestra los resultados de la estimación de ABW obtenidos a partir del método PRM y procesado basado en regresión lineal para una situación de congestión media. Los trenes de paquetes han sido configurados con conformado uniforme (traza azul en la figura) y sectorizado interno y externo (trazas verde y negra respectivamente). Las estadísticas se han obtenido para trenes de paquetes de estimación de distinto tamaño (eje de abscisas). El ABW del salto crítico real es de 80Mbps (traza roja).

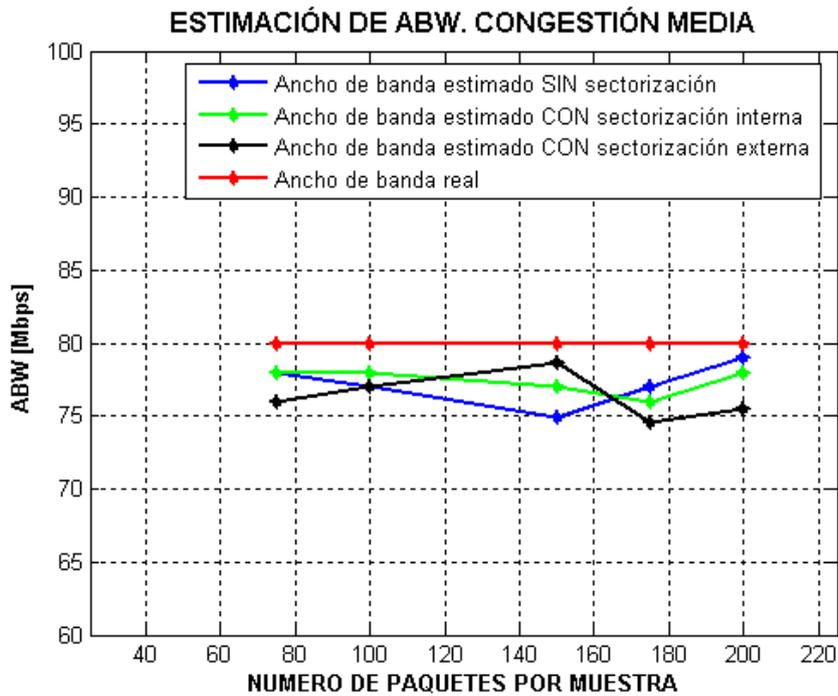


FIG 14: Estimación de ABW para una situación de congestión media. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.

Las principales conclusiones que se obtienen del análisis de la estimación del ABW son las siguientes:

- Independientemente del conformado utilizado, el número de paquetes por tren que mejor comportamiento presenta es 200. Cuanto mayor sea el número de paquetes enviado en cada tren a una tasa determinada, más precisión lograremos en la estimación de la utilización y consecuentemente en la medida de ABW. Sin embargo los tres tipos de trenes (trazas verde, azul y negra) presentan una buena precisión en la medida para situaciones de congestión media para todas las configuraciones de paquetes por muestra.
- Realizar un conformado uniforme, o sectorizado no resulta determinante para una situación de congestión media. Por simplicidad, sería entonces apropiado realizar un conformado uniforme de los trenes de paquetes a la hora de realizar la estimación.

- Es significativo el hecho de que la estimación del ABW para los tres tipos de conformado presenta un ligera subestimación en las medidas.

La figura 15 muestra la estimación de ABW para el mismo escenario que el presentado en la figura anterior, con la diferencia de que el salto que presenta congestión alta (ABW de 50Mbps). De nuevo se han obtenido estimaciones para distintos conformados de trenes de paquetes variando el número de paquetes por muestra o tren. El conformado con sectorización externa no tiene sentido en situaciones de congestión elevada: la sectorización externa concentra los trenes con mayor número de paquetes en los extremos de la ventana de estimación, lo que en situaciones de congestión elevada, supone una saturación total del enlace haciendo que esta configuración no tenga sentido en esta situación.

- En primer lugar se puede observar como de nuevo son los trenes con mayor número de paquetes (175, 200) los que presentan una mayor precisión en la medida. Los motivos son los mismos que los explicados en la figura 14.
- El conformado sectorizado presenta una ligera mejora con respecto al uniforme, si bien no es significativa para los tamaños de paquete mencionados. En términos de estimación de ABW se puede concluir que no se obtienen beneficios importantes del hecho de utilizar trenes sectorizados.
- Es importante señalar que la estimación de ABW presenta buenas prestaciones también para situaciones de congestión elevada. Para trenes de 175 y 200 paquetes apenas se produce una desviación en la medida respecto al ABW real.

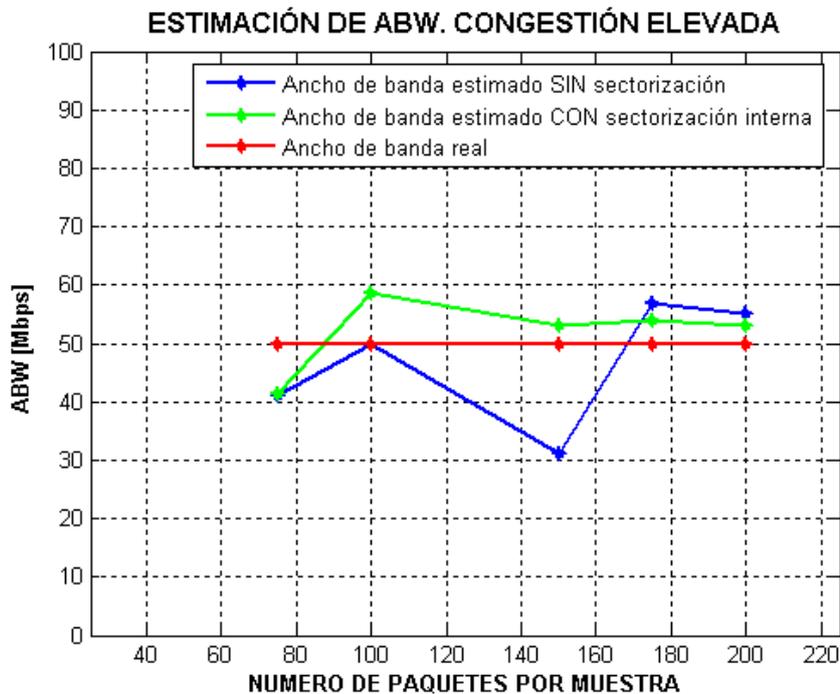


FIG 15: Estimación de ABW para una situación de congestión elevada. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.

La siguiente figura muestra el error relativo calculado a partir de la estimación de ABW de las dos figuras anteriores, para las situaciones de congestión media y congestión elevada. En ambas situaciones y para trenes de 175 y 200 paquetes el error relativo cometido es inferior al 10% con una confianza en las medidas del 95%. Se puede establecer que la precisión de las medidas es adecuada para los intereses que el método persigue.

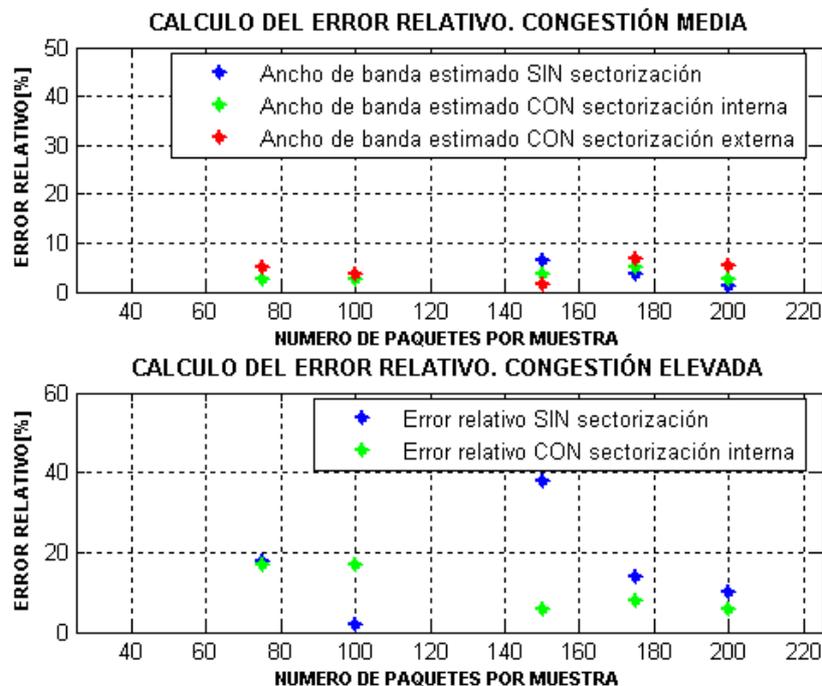


FIG 16: Cálculo del error relativo cometido en la estimación de ABW en situaciones de congestión media y elevada. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.

Adicionalmente se han realizado simulaciones (SIM 0) en ausencia de tráfico interferente. Las gráficas no han sido incluidas en la memoria. Los resultados muestran un error relativo cometido en la estimación inferior al 5%.

### 5.2.3. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DERIVADOS DEL ESTUDIO DE INTRUSIVIDAD

La intrusividad del método es evidente. Es el precio derivado de la precisión de las medidas. El método introduce una media de 35Mbps en cada medida lo que supone un nivel muy elevado de intrusividad. El efecto es menos acusado en redes de alta capacidad, tal y como muestra la tabla 5, pero puede resultar engañoso: En un escenario de congestión media el salto más congestionado (y que determina la intrusividad del método) tiene una capacidad de 1Gbps. 35 Mbps frente a 1 Gbps no representa un volumen de tráfico significativo. Sin embargo, el problema reside en que 35 Mbps constituyen un volumen importante de recursos en términos de ancho de banda independientemente de que el enlace más congestionado tenga 1 ó 10 Gbps. Estos recursos bien podrían ser utilizados, por ejemplo, para la provisión de un contenido de video en formato *Blue-ray* con codificación H264 (servicio que requiere alrededor de 40 Mbps). A pesar de que la estimación no es necesario realizarla de forma continuada en el tiempo, la intrusividad del método es elevada.

ESCENARIO (CONGESTIÓN)	TIGHT LINK	INTRUSIVIDAD [%]
MEDIA	1000 Mbps	3.532
ALTA	100 Mbps	35.32

TABLA 5: Principales características de las herramientas de estimación.

#### 5.2.4. ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ESTIMACIÓN

Otra de las métricas relevantes en el análisis de la herramienta utilizada es el tiempo requerido para obtener una medida. El tiempo necesario para realizar la medida se sitúa en torno a los 2.3011343 segundos. Este tiempo se ha obtenido como media ponderada de varias simulaciones realizadas. El resultado es bastante óptimo y se adecua bien a los requerimientos de la arquitectura RUBENS. Las aplicaciones en tiempo real requieren unos tiempos de respuesta mínimos en caso de que se detecten problemas en la provisión de servicios y esta herramienta es capaz de proveer de una medida en un margen de tiempo aceptable.

Hasta aquí se han estudiado las principales métricas que componen el triángulo de compromiso. Ha quedado patente que el método presenta una precisión y un tiempo de estimación óptimo para situaciones de congestión media y elevada, siendo la intrusividad el parámetro sacrificado. Sin embargo, es necesario analizar el factor  $R^2$  y el índice de reducción de validación cruzada que otorga validez al procesado basado en regresión lineal.

#### 5.2.5. CÁLCULO DE LOS FACTORES $R^2$ E ÍNDICE DE REDUCCIÓN DE VALIDACIÓN CRUZADA. FIABILIDAD DE LAS MEDIDAS.

Determinar los coeficientes  $R^2$  y el índice de reducción de validación cruzada (o bondad del ajuste lineal realizado) es fundamental para determinar la fiabilidad de las medidas.  $R^2$  indica la proporción de la variación total que está siendo explicada por la regresión. Además ofrece una idea de la calidad del ajuste del modelo a los datos. Valores de  $R^2$  por encima de 0.75 se consideran válidos. La bondad del ajuste, evalúa el modelo de regresión y la fiabilidad de las medidas realizadas. Valores de este índice inferiores a 0.1 indican que el modelo es muy fiable mientras que valores superiores a 0.9 corresponden a modelos muy poco fiables.

La figuras 17 y 18 muestran los coeficientes  $R^2$  y la bondad de la aplicación del método de regresión lineal respectivamente. En la figura 17 se observan los valores de  $R^2$  para los niveles de congestión media y elevada para los dos tipos de conformado de trenes y distinto número de paquetes. En el caso de congestión media, la sectorización interna es la que presenta el mejor comportamiento con un valor de 0.8 para trenes de 175 paquetes y 0.84 para trenes de 200 paquetes. Para el caso de sectorización externa, los valores de  $R^2$  correspondientes a 175 y 200 paquetes por tren son de 0.715 y 0.7841 respectivamente, lo cual significa que la medida realizada con 175 paquetes sería descartada por no alcanzar el umbral mínimo fijado en 0.75. Por último, para el caso de conformado uniforme, se obtienen unos valores de  $R^2$  de 0.76 y 0.84 para trenes de 175 y 200 paquetes respectivamente.

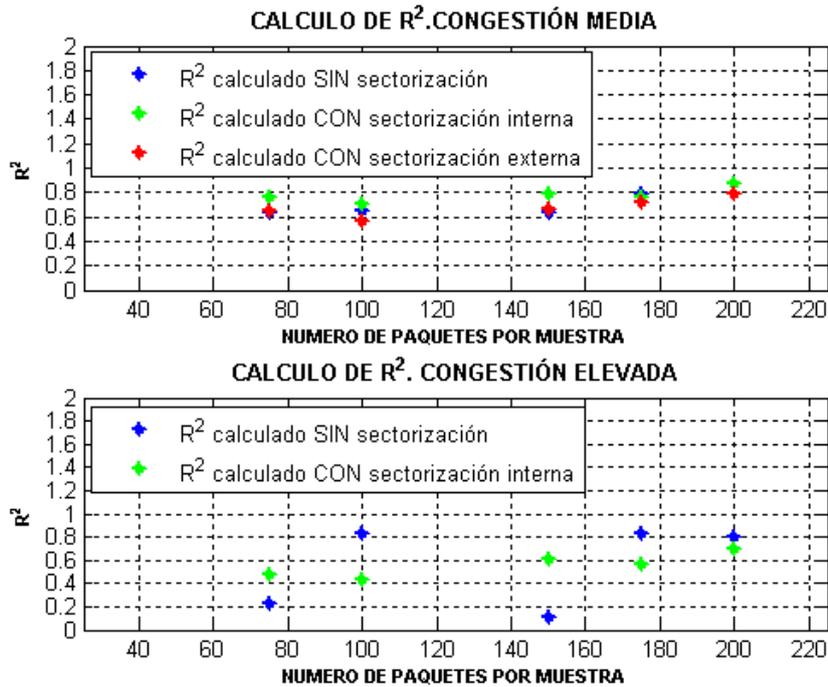


FIG 17: Cálculo de  $R^2$  en situaciones de congestión media y elevada. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.

La principal conclusión es que la tasa de prueba generada a través de los trenes de paquetes (variable independiente) explica la utilización del enlace cuyo ABW se estima a través de una relación lineal en más de un 75% e para valores de 175 y 200 paquetes por tren. El otro 15% no explicado se debe a diversos efectos que se producen en el enlace, tales como el conformado del tráfico interferente o el modelo de gestión de colas. El modelo de regresión lineal se ajusta adecuadamente para las simulaciones realizadas con trenes de 200 paquetes. Esta generalización no se puede aplicar al resto de tamaños de trenes de paquetes.

Se analiza por último la bondad del ajuste (figura 18), parámetro que permite determinar la fiabilidad de las medidas obtenidas. Para una mayor garantía del resultado se ha realizado la media ponderada de varias medidas de este parámetro.

Tal y como se aprecia en la figura, en una situación de congestión media el ajuste es bueno (valores por debajo de 0.1) para trenes de 200 paquetes. Para trenes de 150 y 175 paquetes, la bondad del ajuste lineal entorno a 0.2 en el peor caso, también es aceptable otorgando fiabilidad a las medidas.

Para la situación de congestión elevada, la fiabilidad de las medidas queda reducida a trenes de 200 paquetes para todos los conformados de tráfico y a trenes de 175 paquetes para el caso de conformado uniforme. El resto de casos se desvía a valores por encima de 0.2 haciendo que la estimación de ABW no presente la misma fiabilidad. El hecho de que en alta congestión no haya tanta fiabilidad se debe al número de muestras que componen la recta de regresión lineal: Al haber sólo 50 Mbps de ABW real, el barrido con trenes de paquetes en esa

región es muy estrecho, lo que conlleva que el número de muestras de la recta sea pequeño y por lo tanto, dudosa la relación lineal entre la tasa de pruebas y la utilización.

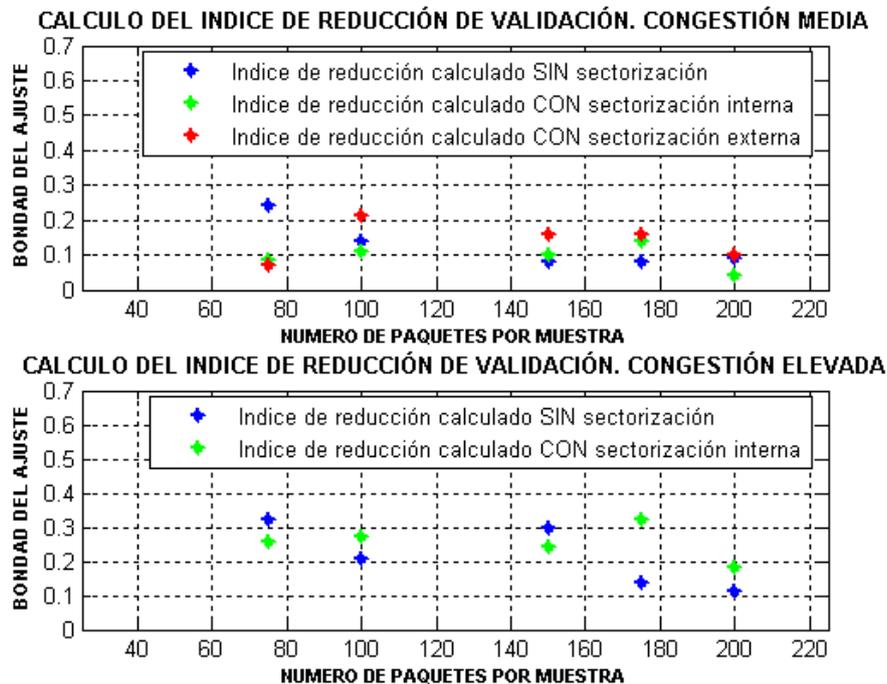


FIG 18: Bondad del ajuste con regresión lineal en situaciones de congestión media y elevada. Estadísticas para distintos conformados del tren y distinto número de paquetes por tren. Método PRM.

### 5.2.6. CONCLUSIONES DEL MÉTODO PRM

El método PRM, basado en la estimación del ABW a través de trenes de paquetes y regresión lineal ha sido analizado en sus tres métricas fundamentales. Adicionalmente, se aporta el estudio y verificación de la fiabilidad de las medidas realizadas a partir del parámetro  $R^2$  y el estudio de la bondad del ajuste.

Dado el escaso margen de beneficio que supone la conformación de trenes sectorizados con respecto al conformado de trenes uniformes y la mayor complejidad de implementación que la sectorización supone, se propone que la implementación del método PRM se base en **trenes de paquetes uniformemente distribuidos obviando la distribución temporal sectorizada, propuesta en un principio.**

La **precisión y tiempo de estimación** del ABW presentan un **buen comportamiento** refrendado por la **fiabilidad y credibilidad** de las medidas para trenes de **200** paquetes. Sin embargo, el sistema es **intrusivo**. Por tanto aplicabilidad de este método queda restringida a situaciones la estimación de ABW en redes de alta capacidad dónde los niveles de congestión sean tales, que la intrusividad de este método no suponga un gasto importante de recursos, o que las medidas realizadas se espacien considerablemente en el tiempo.

### 5.3. RESULTADOS PARA EL MÉTODO BASADO EN PGM

El análisis realizado para el método basado en la estimación del ABW mediante PGM, no se ha realizado en función del conformado o número de paquetes dado que se envían únicamente series de pares de paquetes al enlace de interés. Se ha optado por realizar una estimación muestreando diversos instantes temporales durante el periodo de la simulación (aproximadamente 15 minutos). Tal y como se muestra a continuación, el método PGM no se adapta a redes de alta capacidad haciendo descartando su aplicabilidad.

#### 5.3.1. ABW ESTIMADO PARA NIVELES DE CONGESTIÓN MEDIA Y ALTA

La figura 19 (izquierda), muestra la estimación de ABW en una situación de congestión media del enlace, siendo el salto crítico (ABW = 80Mbps) el número 4 (C= 100Mbps). La figura 19(derecha) presenta la estimación del ABW de una situación de con congestión elevada (ABW = 50 Mbps) siendo el salto conflictivo el primero de ellos (C= 1000Mbps). Ambas figuras presentan un muestreo periódico. La traza azul representa la estimación realizada. La traza roja, se corresponde con el ABW real. Los intervalos de confianza calculados están calculados al 95% y presentan una variación de 1.46 Mbps respecto al valor medio calculado.

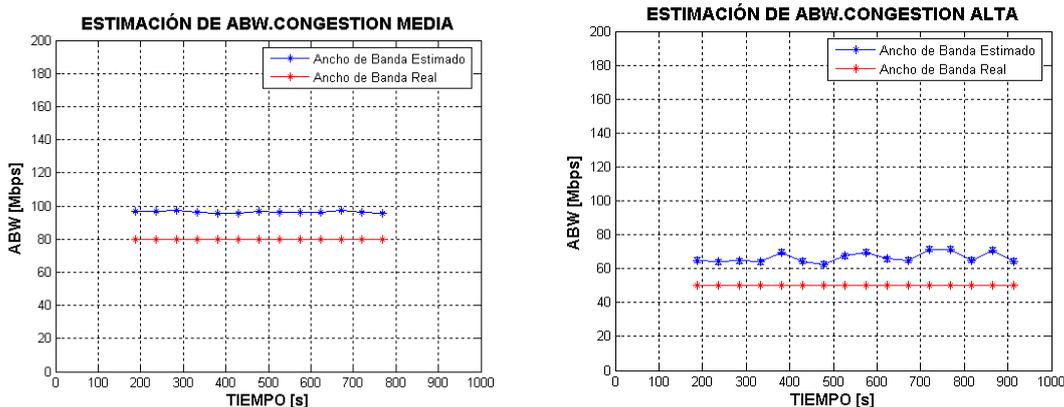


FIG 19: Estimación de ABW para situaciones de congestión media (izquierda) y congestión elevada (derecha). Método PGM.

Ambas simulaciones presentan característica común: Se produce una sobre-estimación importante del ABW. ¿A qué se debe la baja precisión que presenta esta alternativa en las medidas? Un análisis detallado a nivel de paquete permite responder a esta pregunta. El problema estriba en la capacidad de los saltos del enlace analizado (ver tabla 4) y que se puede resumir en dos comportamientos fundamentales:

- Caso de que el salto crítico (*tight link*) del enlace se sitúe en una posición anterior a un enlace de mayor capacidad y menor grado de congestión, se produce un ensanchamiento temporal de los paquetes de estimación PP1 y PP2 en el salto crítico. Sin embargo, este ensanchamiento se verá “enmascarado” por los sucesivos saltos que tengan mayor capacidad, produciendo un estrechamiento temporal de los paquetes y

falseando la medida. En esta situación, no se obtiene el ABW sino la capacidad del último salto situado en el enlace. Esta situación es la que se produce en la SIM 7 de la tabla 4, siendo el valor de ABW obtenido cercano a 100Mbps (Capacidad nominal del último salto). El efecto se ve además agravado en situaciones de congestión media. La siguiente figura muestra resume esta situación:

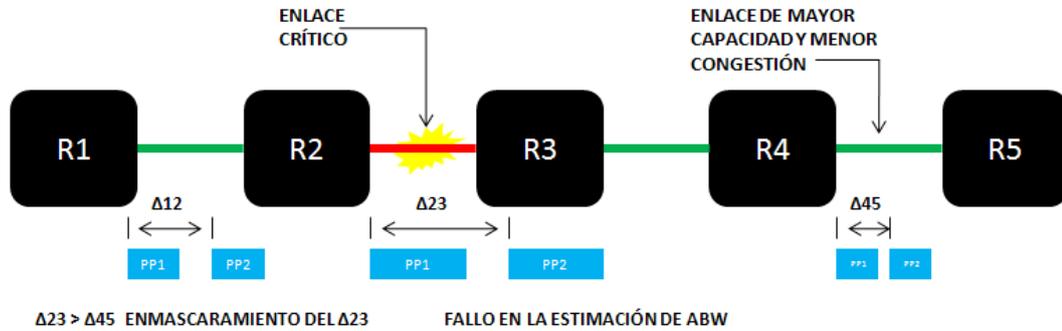


FIG 20: Diagrama de la situación de enmascaramiento y error en la estimación con el método PGM.

- Caso de que el salto crítico sea posterior a otros saltos de mayor capacidad y menor grado de congestión, los paquetes de estimación PP1 y PP2 llegan al salto crítico con una tasa de envío mayor que la que el salto crítico puede gestionar. Esto se traduce en una separación temporal de los paquetes en el momento de llegar al salto crítico inferior (condición que se agrava en enlaces con saltos de alta capacidad) al NTT con que los paquetes son enviados tras el encolamiento en el *router* de entrada del enlace crítico. Este efecto produce que la probabilidad de que se intercalen paquetes de tráfico interferente entre los paquetes PP1 y PP2 sea prácticamente nula, calculando de este modo la Capacidad del salto crítico y no su ABW. En situaciones de congestión elevada el efecto se ve ligeramente mitigado, por la intercalación de paquetes interferentes en saltos previos del enlace, tal y como sucede en la figura 19(derecha). La figura 21 ejemplifica esta situación:

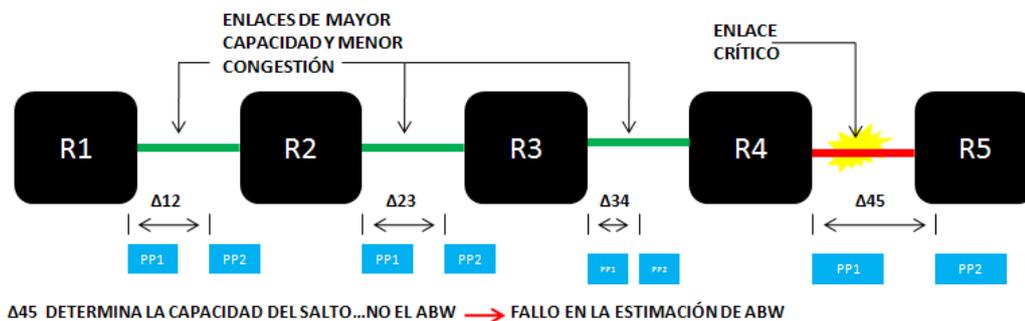


FIG 21: Diagrama de la situación de estimación de la capacidad y no del ABW. Fallo en la estimación.

Por último, se han realizado también simulaciones en ausencia de tráfico interferente (SIM 7). El error cometido en esta ocasión es nulo, dado que el método siempre estima la Capacidad del salto conflictivo, esto es, el ABW en una situación de congestión nula del enlace.

Se puede concluir que los métodos basados en pares de paquetes, no se adecuan a las exigencias de los enlaces de alta capacidad. No se puede determinar el ABW a partir del envío de pares de paquetes, dado que el comportamiento de los mismos depende del estado de la red y no del tráfico interferente. A continuación se presentan los resultados derivados de la intrusividad del método y el tiempo de estimación requerido, si bien la fiabilidad de las medidas es nula tal y como se ha explicado.

### 5.3.2. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DERIVADOS DEL ESTUDIO DE INTRUSIVIDAD

Una de las características más importantes de los métodos estimación basados en pares de paquetes PGM, reside en el bajo nivel de intrusividad que presentan. En este trabajo, se ha pretendido dotar a las medidas de precisión y fiabilidad; por este motivo en vez de lanzar la estimación con un solo par de paquetes, se ha optado por enviar varios pares y realizar una media ponderada de las medidas obtenidas para la totalidad de los pares, sin por ello elevar el nivel de intrusividad a valores que hagan perder al método PGM su principal característica. Como hemos comentado en el capítulo 4, el método presenta una buena estimación a partir del envío de 40 pares de paquetes de tamaño 1500 Bytes. Para estos valores, la tasa de estimación obtenida es de 200 Kbps. A partir de la definición de intrusividad que se encuentra en [3] se obtienen los siguientes niveles de intrusividad:

ESCENARIO (CONGESTIÓN)	TIGHT LINK	INTRUSIVIDAD [%]
MEDIA/ALTA	1000 Mbps	0.02
ALTA	100 Mbps	0.2

TABLA 6: Intrusividad del método basado en PGM para los escenarios de congestión media y alta.

Como se puede comprobar, los porcentajes de intrusividad son ínfimos en comparación con las capacidades los enlaces más congestionados en cada simulación, aún en presencia de un elevado grado de congestión. En términos de intrusividad se puede concluir que el método es adecuado.

### 5.3.3. ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ESTIMACIÓN

El tiempo de la estimación viene dado por el tiempo necesario para la transmisión y recepción de los 40 pares de paquetes en OPNET más el tiempo de procesado que requiere la herramienta MATLAB para facilitar un resultado. En la figura 22 se observa el tiempo de estimación requerido por 16 medidas realizadas sobre un enlace del sistema para las dos situaciones de congestión (media/alta y alta) que se han estudiado. Los valores se mantienen relativamente constantes en torno a los 23.4 segundos. El tiempo de procesado de MATLAB es despreciable (inferior a 100 milisegundos) en comparación con el tiempo que transcurre para el envío de los 40 pares de paquetes.

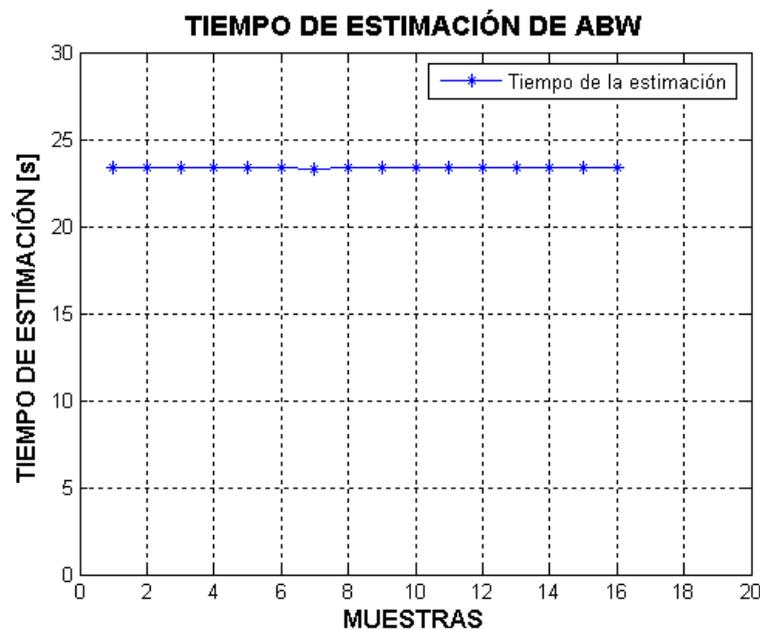


FIG 22: Tiempo de estimación de una muestra de ABW requerido por el método basado en PGM.

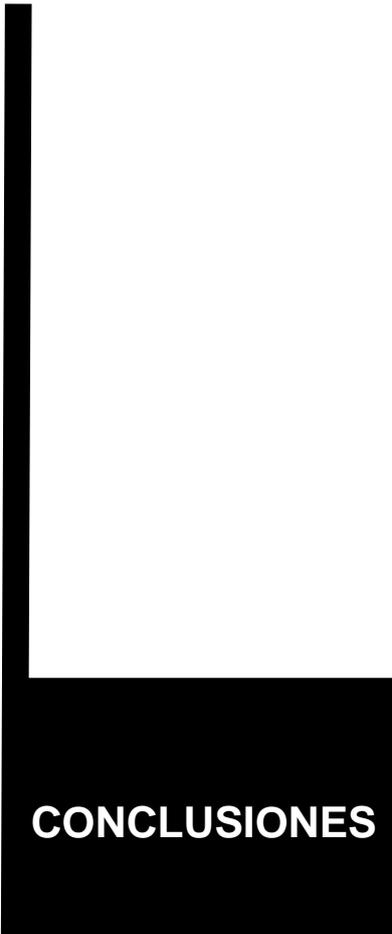
La lectura de los resultados obtenidos en términos de tiempos de estimación varía en función de la aplicabilidad del método, tal y como se ha explicado en el capítulo 2. En el caso que nos ocupa y en ámbito de la arquitectura del proyecto RUBENS, la utilidad de la estimación del ABW reside en la posibilidad de poder reaccionar ante situaciones en las que las que un determinado usuario final está experimentando una mala calidad en la recepción de contenidos (especialmente contenidos multimedia). Es decir, es necesario que el tiempo de la estimación sea pequeño y por tanto este resultado ha resultado ser no muy favorable. Este hecho añade una limitación además de la relativa a la precisión de las medidas.

#### 5.3.4. FIABILIDAD DEL SISTEMA DE SIMULACIÓN Y LAS MEDIDAS OBTENIDAS

Todas las medidas realizadas para la obtención del ABW han provisto un resultado. Caso de que se produzca un fallo en la recepción de los paquetes de prueba, éste es detectado descartando automáticamente la medida.

#### 5.3.6. CONCLUSIONES DEL MÉTODO PGM

El método de estimación basado en el envío de pares de paquetes ha resultado no adecuarse a las exigencias de la red RUBENS en concreto ni a enlaces de alta capacidad en general dadas las bajas prestaciones que ofrece en términos de precisión y tiempo de estimación de las medidas. Por este motivo, se descarta su implementación e incorporación a la arquitectura RUBENS.



## **CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO ABIERTAS.**

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO ABIERTAS

### 6.1. CONCLUSIONES

A través de los capítulos anteriores, se ha presentado de forma clara y concisa los pasos requeridos para desarrollar el objetivo principal del proyecto: Simular un mecanismo de estimación de ABW activo y extremo a extremo que permita preservar el compromiso entre la precisión de las medidas, la intrusividad del método y el tiempo de estimación requerido a fin de incluirlo en la arquitectura del proyecto RUBENS.

En el capítulo uno, la motivación y objetivos del TFM fueron introducidos. En el capítulo 2 se ha presentado una detallada descripción del estado del arte y se han evaluado las herramientas de estimación. Adicionalmente se han presentado las métricas evaluadas. El capítulo 3 muestra la metodología de simulación seguida. La implementación e integración de los mecanismos junto con una descripción de los parámetros de simulación se han explicado en el capítulo 4. Finalmente, los resultados derivados de las simulaciones se argumentan en el capítulo 5.

La principal conclusión que se extrae del trabajo realizado, es que todavía se está lejos de implementar una herramienta de estimación de ABW apropiada que se ajuste tanto a las tecnologías como a los nuevos servicios y aplicaciones que hoy en día se están desplegando. Se han realizado muchos estudios en esta materia particularizados en *test-bed* concretos que sin embargo no permiten dotar a las herramientas de generalidad.

De los métodos aquí propuestos, el **método basado en pares de paquetes** ha sido descartado dadas las limitaciones que presenta. El análisis realizado a nivel de paquete demuestra que realizar estimaciones de ABW a partir de pares de paquetes parece de momento una utopía. Además, las hipótesis de partida que se adoptan, son poco realistas por lo que una revisión profunda de este tipo de métodos debe llevarse a cabo.

Con respecto al **método basado en PRM**, se han obtenido buenos resultados en términos de precisión y tiempo de la estimación, si bien la intrusividad es el vértice del triángulo que mayor impacta el sistema de simulación. La sectorización de la tasa de prueba no ha demostrado mejoras significativas respecto a un conformado uniforme como en un principio se pensaba. La aplicabilidad de este método queda restringida a situaciones la estimación de ABW en redes de alta capacidad dónde los niveles de congestión sean tales, que la intrusividad de este método no suponga un gasto importante de recursos, o que las medidas realizadas se espacien considerablemente en el tiempo. Aunque no ha sido directamente analizada, la escalabilidad del método (varios usuarios de una red ejecutando la aplicación de estimación de ABW simultáneamente) es también una limitación intrínseca de ésta y todas las demás herramientas basadas en trenes de paquetes.

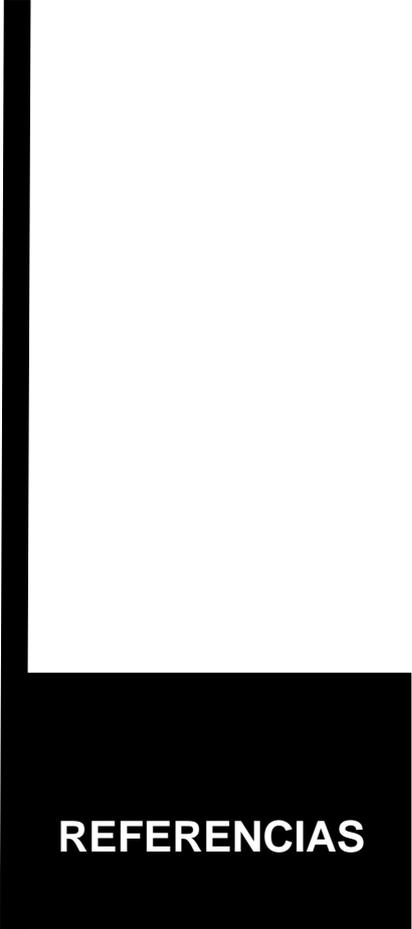
A pesar de los esperanzadores resultados del método PRM, bajo mi personal punto de vista y a partir el trabajo realizado, queda **mucho por hacer** y muchas preguntas por resolver para obtener una herramienta de estimación de ABW óptima y que pueda adaptarse y ser utilizada para las distintas tecnologías de red tanto de acceso fijo como celular inalámbrico.

## 6.2. LÍNEAS DE TRABAJO ABIERTAS

El trabajo realizado ha permitido obtener interesantes conclusiones sobre el estado actual de las herramientas de estimación de ABW basadas en PGM y PRM. Se ha propuesto un mecanismo de cada tipo validado o descartado de acuerdo a una estricta metodología de simulación. Si bien los resultados no son óptimos, son esperanzadores e indican el camino hacia una herramienta óptima. Algunas de las líneas futuras que se plantean en esta dirección son las siguientes:

- Automatización del proceso de estimación: La estimación se realiza en base a la coordinación de diversas herramientas. La automatización de la comunicación entre estas herramientas así como la creación de un interfaz de visualización y monitorización de los resultados hará más atractiva la herramienta de estimación.
- Una posible alternativa a estudiar para evitar la intrusividad de los métodos PRM, podría consistir en insertar los paquetes de estimación en modo *piggy back* en flujos de datos, esto es, insertar en los flujos de tráfico real las ráfagas de estimación de ABW.
- La utilización de la cabecera IP (campo *Timestamp*) para la gestión de las estimaciones: Esta posibilidad permitiría realizar la estimación en cada salto del enlace de interés, afinando más la estimación del ABW global del enlace y minimizar la intrusividad. El principal inconveniente reside en la imposibilidad de acceder a dicha facilidad en la mayoría de los nodos intermedios de la red, dado que los operadores la restringen por motivos de seguridad en sistemas y comunicaciones.
- Seguir investigando diversas alternativas que permitan mejorar los métodos actuales, sin caer en hipótesis de partida poco realistas o que no se ajustan a las tecnologías de red y servicios actuales.
- Implementación en real del método PRM y despliegue sobre una red. La simulación debe ser entendida como un paso inicial y preliminar al desarrollo experimental de la herramienta.





**REFERENCIAS**

**BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] [http://wiki-rubens.celtic-initiative.org/index.php/Image:ALU\\_20100214\\_D3.2\\_FR.doc](http://wiki-rubens.celtic-initiative.org/index.php/Image:ALU_20100214_D3.2_FR.doc)
- [2] Documento Confidencial.  
[http://wiki-rubens.celtic-initiative.org/index.php/Main\\_Page](http://wiki-rubens.celtic-initiative.org/index.php/Main_Page)
- [3] C. D. Guerrero, M. A. Labrador, "On the Applicability of Available bandwidth estimation techniques and tools," *Computer Communications*. Vol 33, pp. 11 – 22, 2010
- [4] E. Goldoni, G. Rossi, A. Torelli, "ASSOLO: an Efficient Tool for Active End-to-end Available Bandwidth Estimation," *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, vol. 2, no. 4, 2009.
- [5] J. Lafuente Martinez, I. García Muñoz, J. Fernández Navajas. "QoS Estimators for Client-Side Dynamic Server Selection: Limitations and Keys," *The Ninth IEEE Symposium on Computers and Communications*. Alexandria, Egypt. June 29-July 1. 2004.
- [6] M. Jain, C. Dovrolis, "Path selection using available bandwidth estimation in overlay-based video streaming," *International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, vol.52, no. 12, 2008.
- [7] Documento Confidencial.  
[http://wiki-rubens.celtic-initiative.org/index.php/Image:ALU\\_20100215\\_D4.2\\_FR.pdf](http://wiki-rubens.celtic-initiative.org/index.php/Image:ALU_20100215_D4.2_FR.pdf)
- [8] M. Jain, C. Dovrolis, "End-to-end available bandwidth: measurement methodology, dynamics, and relation with tcp throughput," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol 11, no. 4, pp 537-549, August 2003.
- [9] C. Estan, K. Keys, D. Moore, and G. Varghese, "Building a better NetFlow," Technical report, 2004.
- [10] <http://datatracker.ietf.org/wg/ipfix/charter/>
- [11] D. Collange, J. L. Costeux, "Pasive Estimation of Quality of Experience," *Journal of Universal Computer Science*, vol 14, no. 5, pp. 625-641, Mach 2008.
- [12] A. Ferro, F. Liberal, Asignatura "QoS en Redes Móviles". Máster en Tecnologías de la Información y Comunicaciones en Redes Móviles. Documento web disponible en: <http://www.ticrm.es/>
- [13] M. Jain, C. Dovrolis, "Ten Fallacies and Pitfalls on End-to-End Available Bandwidth Estimation," *IMC*, October 2004.
- [14] M. Jain and C. Dovrolis. "Pathload: A measurement tool for end-to-end available bandwidth," *In Proceedings of Passive and Active Measurements (PAM) Workshop*, Mar. 2002.
- [15] J. Strauss, D. Katabi, F. Kaashoek, "A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation Tools," in *IMC'03 Florida*, October 2003.

- [16] N. Hu, P. Steenkiste, "Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques, IEEE JSAC, vol. 21, no.6, 2003.
- [17] J. Navratil and R. L. Cottrell, "Abwe: A practical approach to available bandwidth, "In Proc. Of 4<sup>th</sup> PAM Workshop, San Diego, April 2003.
- [18] V. J. Ribeiro et Al, "pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths, "In Passive and Active Measurement Workshop, April 2003.
- [19] S. Suthaharan, S. Kumar, " Measuring Available Bandwidth: pathChirp's Chirp Train Structure Remodeled, SOURCE MISSING. 2008.
- [20] Q. Wang, L. Cheng, "FEAT: Improving Accuracy in End-to-end Available Bandwidth Measurement," GLOBECOM 2006.
- [21] J. Sommers, P. Barford, "An active measurement system for shared environments, "In: ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement (IMC), October 2007.
- [22] I. Yeom and A. L. Narasimha, " ENDE: An End-to-end Network Delay Emulator Tool for Multimedia Protocol Development," Multimedia Tools and Applications vol. 14, no. 3, October 2001.
- [23] J. Navratil, R. Les. Cottrell, "ABwE: A Practical Approach to Available Bandwidth Estimation, "In Passive and Active Measurement (PAM) Workshop, 2003.
- [24] D. Croce, M. Mellia, E. Leonardi, " The Quest for Bandwidth Estimation Techniques for Large-Scale Distributed Systems, " HOTMETRICS 2009.
- [25] K. Lakshiminarayanan, V. N. Padmanabhan, and J. Padhye, "Bandwidth Estimation in Broadband Access Networks," in IMC, 2004.
- [26] J. Sommers, P. Barford, W. Willinger, " A Proposed Framework for Calibration of Available Bandwidth Estimation Tools, " In Proceedings of the 11th IEEE Symposium on Computers and Communications ISCC, 2006.
- [27] E. Goldoni and G. F. Rossi, "Improving available bandwidth estimation using averaging filtering techniques," Technical report, University of Pavia, 2008.
- [28] S. Ekelin et al, "Real-time measurement of end-to-end available bandwidth using Kalman filtering, " In NOMS Symposium 2006, 10th. IEEE/IFIP, 2006.
- [29] A. Cabellos, F. J. García, J. Domingo, "A Novel Available Bandwidth Estimation and Tracking Algorithm," NOMS Workshops 2008
- [30] A. Solera, "El Filtro de Kalman, "Nota Técnica del Departamento de Investigaciones Económicas del Banco Central de Costa Rica, Julio 2003.
- [31] M. Y. Rincón. Documento web disponible en:  
<http://www.monografias.com/trabajos27/regresion-simple/regresion-simple.shtml>



- [32] T. Tunali, K. Anar, "Adaptative available bandwidth estimation for internet video streaming," Special Issue on Image and Video Quality Assessment vol. 25, no.7, 2010.
- [33] K. Pawliskowski et Al, "On credibility of simulation studies of telecommunication networks," IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 1, 2002.
- [34] <http://www.opnet.com/>
- [35] <http://www.mathworks.com/>
- [36] Y. Cheng et Al, "New Exploration of Packet-Pair Probing for Available Bandwidth Estimation and Traffic Characterization," ICC 2007.
- [37] Cooperative Association for Internet Data Analysis, "NASA Ames Internet Exchange Packet Length Distributions," disponible en:  
[http://www.caida.org/research/trafficanalysis/AIX/plen\\_hist/](http://www.caida.org/research/trafficanalysis/AIX/plen_hist/)
- [38] [http://www.hrc.es/bioest/Reglin\\_8.html](http://www.hrc.es/bioest/Reglin_8.html)
- [39] <http://www.seh-lelha.org/regresion1.htm>
- [40] D. Remón, "Herramientas de Estimación de la Capacidad en Redes de Nueva Generación," Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza, CPS, Junio 2010.
- [41] M. Neiginhal et al, "Measuring Bandwidth Signatures of Network Paths," IFIP NETWORKING, 2007.