

## **ANEXO I**

## ANEXO I. DEFINICIONES DE INTERÉS

### Capacidad

La Capacidad de un enlace se define como el máximo ancho de banda disponible de aquel salto perteneciente al enlace, que presente una menor ancho de banda.

### ABW (Ancho de banda disponible)

El ancho de banda disponible es la tasa máxima de transmisión que un determinado enlace presenta en un determinado instante de tiempo. Es la diferencia entre la capacidad del salto crítico y la utilización de dicho salto.

### Tráfico interferente

Se define como el tráfico que los distintos nodos de la red se intercambian correspondiente a las sesiones y aplicaciones que los usuarios finales corren en sus terminales. La caracterización de este tipo de tráfico es fundamental para una adecuada estimación del ancho de banda disponible.

### Tráfico de prueba

Tráfico generado por los módulos de estimación para determinar el ancho de banda disponible en un determinado enlace. Este tráfico se configura en el transmisor y se compone de pares de paquetes o trenes de paquetes según sea el método de estimación basado en PGM o PRM respectivamente. A partir de ciertos parámetros temporales de este tipo de tráfico calculados en el extremo receptor es posible obtener una estimación de ABW.

### cuello de botella del enlace ó *Narrow link*

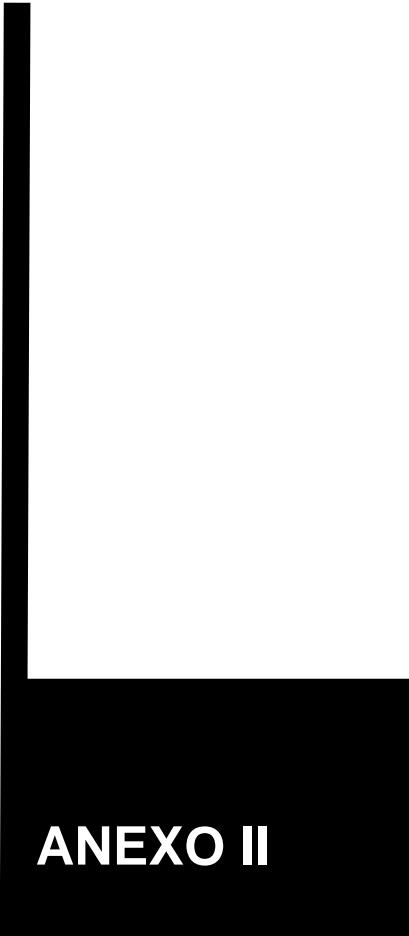
En el contexto de las comunicaciones, se define cuello de botella como el punto de un determinado de una red que presenta una menor capacidad. Este concepto no debe confundirse con el término “enlace más congestionado” o *tight link*.

### Salto crítico del enlace ó *Tight Link*

Se define así al punto del enlace de una red que presenta un mayor grado de congestión debido al tráfico que discurre a través de este punto. El *tight link* y el *narrow link* a menudo tienden a considerarse el mismo enlace, lo cual no es siempre cierto. En este trabajo, se realiza una distinción entre ambos tipos de enlace

### NTT(*Nominal Transmision Time*)

Tiempo necesario para la transmisión de un paquete de tamaño MTU a través de un enlace de una determinada capacidad. El NTT depende por tanto de la capacidad del enlace a través de cuál se envía el tráfico.



## **ANEXO II**

## ANEXO II. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS TEMPORALES. VERSIÓN EXTENDIDA.

### MÉTODO ENDE

Es una herramienta extremo a extremo para aplicaciones tipo multimedia que sigue la MÉTODOlogía PGM y utiliza como métrica para la estimación los parámetros OWD y RTT [22]. Dada su aparente sencillez y a pesar de haber sido propuesto en 2001, se realizó su implementación con OPNET a fin de validar su utilización sobre enlaces de mayor capacidad.

Ventajas:

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

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, 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

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*). El nodo fuente envía paquetes de prueba a una tasa determinada R. Caso de que R sea mayor que el ABW ( $R > A$ ) los paquetes se encolan observando un retardo creciente en su recepción y una tasa menor en recepción. Si  $R < A$ , entonces los paquetes en el receptor no experimentan cambio alguno. Cada test para determinar si  $R > A$  consta de 12 medidas de 100 paquetes equiespaciados en función de la tasa R de emisión configurada. El método concluye el test una vez se alcanza una desviación respecto al valor buscado A inferior a un determinado umbral (4% por defecto) [25].

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 [30]) 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 dos extremos 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 [30], 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.

### **SPRUCE**

Técnica de estimación PGM basada en el concepto de *Direct-Probing*. Un par de paquetes es enviado a una tasa  $R_i$  igual a la capacidad del enlace cuello de botella (supuesta conocida) con una separación entre paquetes  $\Delta_{in}$  de manera que a partir de la separación de los mismos observada en la salida  $\Delta_{out}$  se puede calcular el ABW como:

$$ABW = C \times \left(1 - \frac{\Delta_{out} - \Delta_{in}}{\Delta_{in}}\right)$$

La medida se obtiene a partir de la media de 100 medidas [24].

A priori, la poca intrusividad que presenta el método, ha servido de motivación para tratar de realizar una adaptación para enlaces que comprendan varios saltos. PRUCE ha sido considerado como una posible base en el desarrollo del método y se ha realizado su implementación sobre OPNET.

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 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  $\Delta_{in}$  de los paquetes puede tener limitaciones en situaciones reales, dado que por ejemplo para un OC-12 de tasa nominal, se requiere un  $\Delta_{in} = \mu s$ , lo cual roza los límites de lo factible.

### Conclusión

Del 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 es imposible. En definitiva tampoco se ajusta a los requisitos exigidos.

## **MÉTODO ABwE**

Se trata de un método basado en PGM que tiene como objetivo determinar el ABW e un tiempo de estimación reducido y sin ser intrusivo. Está basado el cálculo del retardo  $T_d$  que los paquetes de prueba (denominados PP1 y PP2) presentan en el extremo receptor. Mediante un análisis y caracterización del tipo de tráfico y su influencia en los métodos basados en dispersión de paquetes y la determinación de un factor denominado QDF (*Queuing Delay Factor*), el método establece el ABW. Más información sobre este método puede encontrarse en [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 de dos extremos para realizar la estimación.

### Conclusión

Este método ha sido implementado y los resultados obtenidos con la simulación, muestra resultados muy esperanzadores. Este método en combinación con otras técnicas de filtrado constituye una de las técnicas utilizadas en la implementación del método aquí planteado.

## 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). Los paquetes que conforman los trenes se caracterizan por tener una separación inicial entre ellos  $\Delta_{in}$  variable que conforman la denominada “*Fish-eye Stream*”. Este *stream* o tren de paquetes, cubre una serie de rangos de tasas de prueba focalizados en torno a una región en la cual las tasas de prueba son generadas con mayor frecuencia y el número de paquetes utilizado es mayor. Este hecho crea el efecto “*fish-eye*” que permite mejorar la precisión de las estimaciones. En [20] se describe el mecanismo completo. La figura 5 muestra el concepto de la tasa de prueba variable *Fish-eye*.

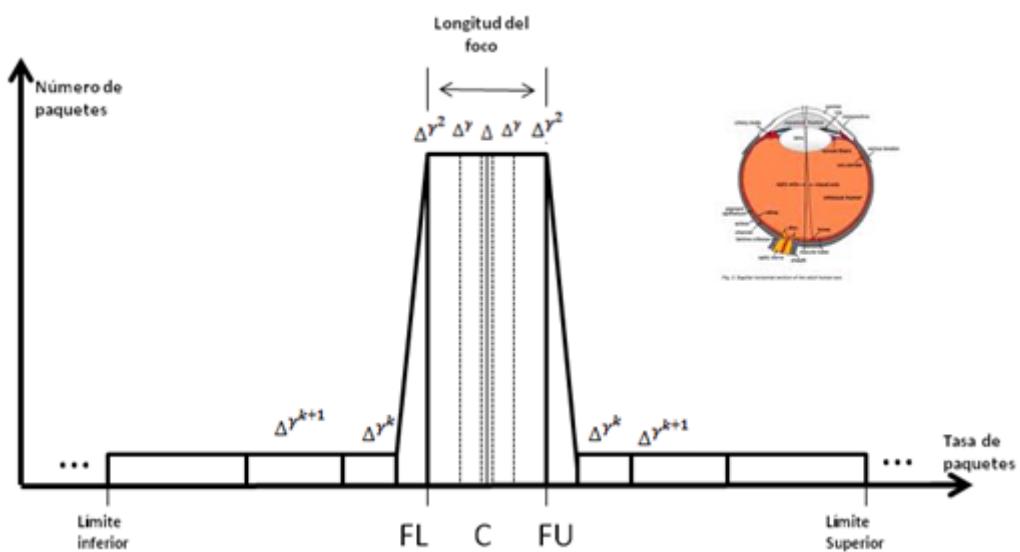


FIG 5: *Fish-eye* como posible tasa de pruebas. Analogía con la forma del ojo.

Si bien el trabajo publicado no está muy bien explicado y en el test bed desplegado se utilizan enlaces de 2 Megas (lo dual no representa enlaces de alta capacidad) el concepto de utilizar tasas de prueba variables es interesante y ha sido objeto de estudio e implementación a fin de estudiar su incorporación a la herramienta que se pretende implementar en este TFM.

Ventajas:

- Interesantes características del *Fish-eye*.
- La estimación es rápida [20]
- Comparado con otras técnicas basadas en PRM, presenta una intrusividad razonable.
- La precisión que presenta en el test-bed es alta.

Limitaciones:

- Test bed sobre un enlace de 2Mbps, no da referencias sobre su implementación en redes de alta capacidad.

## Conclusión

A pesar de que la publicación relativa a este método está diseñada 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 trabajo.

Adicionalmente, se han revisado otros trabajos de estimación activos extremo a extremo cuya implementación no se ha llevado a cabo por diversas razones. Así 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 en el margen de 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 injectados 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 una ejemplo del encolamiento y generación de excursiones observada en el receptor.

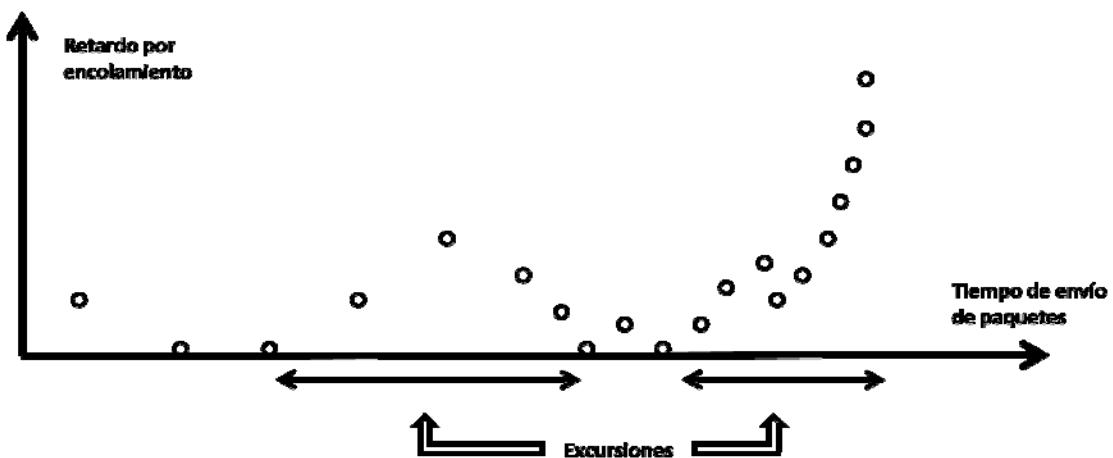


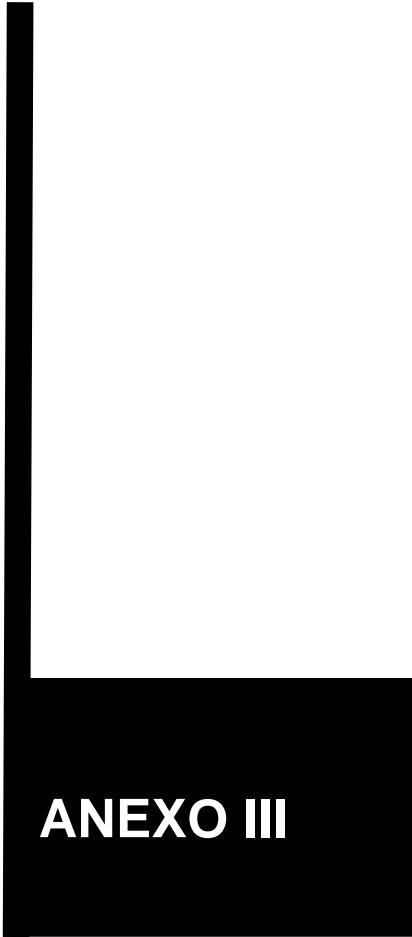
FIG 6: Retardo de encolamiento de un tren de paquetes *chirp*. Cortesía de [18].

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 si bien a partir de su análisis se concluye que son intrusivas y poco precisas o se han quedado obsoletas para los requerimientos de la arquitectura RUBENS.





## **ANEXO III**

## **ANEXO III. REVISIÓN DE TÉCNICAS DE FILTRADO Y PROCESADO DE DATOS PARA LA OBTENCIÓN DEL ABW. VERSIÓN EXTENDIDA.**

### **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. El filtro de Kalman utiliza el método de mínimos cuadrados para generar recursivamente un estimador del estado al momento  $k$ , que es lineal, no sesgado y de varianza mínima. El filtro está en línea con el teorema de *Gauss-Markov* y esto le da al filtro de Kalman su enorme poder, para resolver un amplio rango de problemas en inferencia estadística [31].

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 algunos entornos muy controlados, 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 variables 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].

Si se transmite tráfico de prueba o *Cross-traffic* a través del enlace cuyo ABW queremos estimar a una tasa “r”, la utilización del enlace puede expresarse como:

$$U_i(r) = \min(1, U_i + \frac{r}{C_i})$$

Siendo  $C_i$  la capacidad del enlace “i”. Para un escenario en el que enlace de interés comprende varios saltos y de acuerdo con [41], la expresión anterior admite una aproximación de primer orden de la forma:

$$U_i(r) = \min(1, ar + b)$$

Donde “a” y “b” son constantes. Esta ecuación establece que hay una relación lineal entre la utilización del enlace y la tasa de prueba enviada. La siguiente figura muestra como a medida que la tasa de prueba se incrementa, también lo hace la utilización, de manera que la el ABW del enlace es “ $r_{ab}$ ” [30].

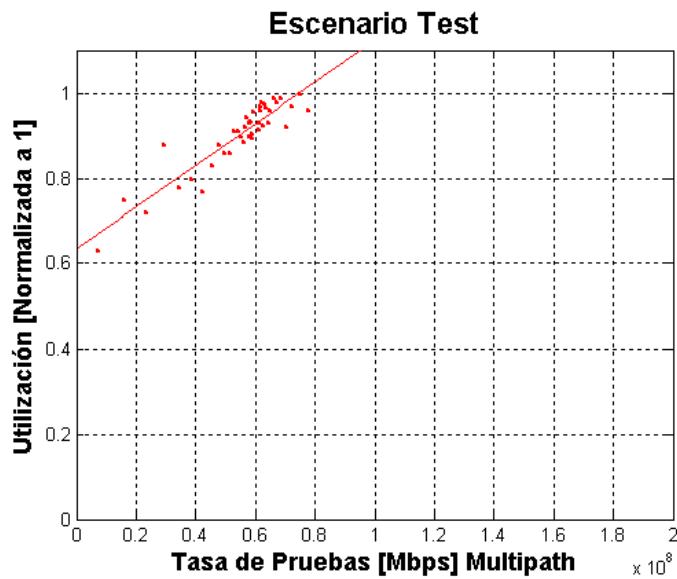


FIG APP1: Modelo lineal de la herramienta. A partir de la utilización es posible conocer el ABW.

Esto significa que una vez que la expresión anterior (la utilización del enlace) es calculada, el ABW puede ser estimado como el punto en que la recta alcanza el valor de utilización “1”:

$$AB = \frac{1 - \bar{b}}{\bar{a}}$$

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 procesado de datos para un proceso de estimación basado en la utilización del enlace, muestra un comportamiento más que aceptable en entornos de congestión media/alta. Su aplicación en el entorno que nos ocupa es adecuado y las medidas gozan de total fiabilidad, por lo que su implementación junto con algunas herramientas de obtención y toma de datos, 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  $\alpha$  (*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:

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

Siendo  $O_i$  cada una de las observaciones disponibles.

### 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:

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

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. Sin embargo, a posteriori se ha comprobado que el impacto real (en situaciones de tráfico interferente CBR al menos) no produce una mejora sustancial de las observaciones.