



Self-similar Traffic Analysis at Network Layer Level. Part I: Fundamentals

Ginno Millán

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

March 30, 2021

Análisis de Tráfico Autosimilar a Nivel de Capa de Red. Parte I: Fundamentos

Self-similar Traffic Analysis at Network Layer Level. Part I: Fundamentals

Ginno Millán Naveas¹

RESUMEN

Los flujos de tráfico tanto de las fuentes como agregados presentan con frecuencia propiedades de dependencia de largo alcance (LRD). En este trabajo se presentan las bases teóricas que justifican que el comportamiento del tráfico de una red de computadoras de alta velocidad puede ser modelado desde una perspectiva autosimilar acotando su ámbito de análisis al nivel de la capa de red, toda vez que las propiedades más relevantes de los procesos autosimilares son consistentes para su empleo en la formulación de modelos de tráfico cuando se realiza esta distinción.

Palabras clave: Autosimilaridad, capa de red, dependencia de largo alcance, flujos de tráfico, modelos de tráfico.

ABSTRACT

Traffic streams, sources as well as aggregated traffic flows, often exhibit long-range-dependent (LRD) properties. This paper presents the theoretical foundations to justify that the behavior of traffic in a high-speed computer network can be modeled from a self-similar perspective by limiting its scope of analysis at the network layer, given that the most relevant properties of self-similar processes are consistent for use in the formulation of traffic models when performing this specific task.

Keywords: Self-similarity, network layer, long-range-dependent, traffic flows, traffic models.

INTRODUCCIÓN

Arraigada en la génesis del diseño de las actuales redes de computadoras de alta velocidad se encuentra, aun, la tendencia al desarrollo escalable con una base preparada para el soporte primario de aplicaciones de procesamiento que, aunque requieren de un servicio de transporte fiable, no son exigentes en cuanto otros parámetros de calidad de servicio (QoS) como retardo, caudal, latencia, y tasa de pérdidas. Se trata de una realidad subordinada a las justificaciones de índole económica, incapaz de reflejar tanto el comportamiento como la operación de los actuales entornos de redes, caracterizados, en su gran mayoría, ya no tan solo por la escalabilidad y el soporte a servicios y aplicaciones de valor agregado con altas exigencias de ancho de banda y disponibilidad, sino que además, por la convergencia, complementariedad e interoperabilidad de los mismos.

Por otra parte, el desarrollo sostenido en los campos de las tecnologías ópticas, nanométricas y cuánticas, con mayor énfasis, ha permitido la evolución de las redes de computadoras dotándolas de la capacidad necesaria para satisfacer de forma simultánea los requisitos de tráficos de diversas naturalezas, creando el escenario inherente a la aparición de nuevos servicios y aplicaciones para las

cuales esta característica es esencial; se está en presencia de servicios que involucran tráficos en tiempo real y que, por su naturaleza, poseen necesidades exigentes de y hacia el ancho de banda disponible. Así, las nuevas redes de alta velocidad deben ser capaces de brindar un servicio que no tan solo garantice la disponibilidad de los recursos, sino que además, se provean bajo condiciones de calidad de servicio bien definidas, parametrizables, adaptables y dinámicas en su asignación, puesto que los requerimientos de las actuales aplicaciones y servicios de tiempo real no pueden ser satisfechos utilizando los protocolos de alto nivel si las redes portadoras no ofrecen las garantías necesarias. Resulta crucial entonces realizar análisis cuantitativos que evalúen la calidad de servicio ofrecida por las nuevas tecnologías dejando de lado las bases, argumentos y supuestos insustanciales.

El principal problema que se plantea al momento de realizar una evaluación rigurosa de las prestaciones de una red de comunicaciones es el del modelado del tráfico de entrada a la red. De hecho, para numerosos autores, el modelado del tráfico es el más crítico de los problemas relacionados con la evaluación de las prestaciones de las redes de comunicaciones, ya que el éxito de los análisis depende directamente de lo representativos de la realidad que sean los modelos de tráfico utilizados [1].

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile. E-mail: ginno.millan@usach.cl

Históricamente, el modelado de tráfico tiene sus orígenes en los sistemas de telefonía convencional y se ha basado, de forma casi exclusiva, en supuestos de independencia entre tiempos de arribos de tramas sucesivas y duraciones exponenciales en el uso de los recursos. En concreto, la aceptación de ambos supuestos implica una restricción hacia los procesos estocásticos de forma que obedezcan a un universo de procesos o de Poisson o de Markov. Al respecto, no se cuestiona la utilidad en que ha resultado su empleo tanto para diseñadores de redes como para analistas de sistemas a efectos de realizar planificación de capacidades y también para predecir rendimientos [1]. Sin embargo, en una amplia gama de casos del mundo real, se ha verificado que los resultados predichos a partir de análisis de colas difieren de forma significativa de los rendimientos observados en la realidad, y esta acentuada discrepancia tiene sus orígenes en que los procesos de tráfico presentan a menudo variaciones de largo alcance (LRD) en muchas o todas las escalas temporales, en tanto que los modelos de Poisson o de Markov, que no tiene memoria o presentan memoria de corto alcance (SRD), exponen los flujos de tráfico sobre escalas temporales mucho más cortas. Como resultado se tienden a producir previsiones demasiado optimistas sobre el rendimiento producto del uso de distribuciones con varianza finita para la caracterización de los periodos de presencia y de ausencia de ráfagas paquetes.

En completa atención a los argumentos anteriormente expuestos, se plantea la siguiente hipótesis de trabajo:

“Es completamente factible acotar la evolución de un proceso estadísticamente autosimilar a un entorno de aplicación bien definido sin alterar su naturaleza y sus propiedades más relevantes, realizando con ello la validez de sus postulados y añadiendo una mayor plausibilidad a su interpretación física”

En este contexto, la plausibilidad se refiere a la acción de conferir un carácter de admisible, luego atendible, a uno o varios parámetros, componentes de un modelo analítico, cuyas interpretaciones no tan solo constituyen una idealización matemática.

En este trabajo se presenta una detallada discusión sobre las bases teóricas que justifican que el comportamiento del tráfico de una red de computadoras de alta velocidad en presencia de dependencia de largo alcance, puede ser modelado desde una perspectiva autosimilar acotando su ámbito de análisis al nivel de capa de red, destacando que todas las propiedades más relevantes de los procesos autosimilares son consistentes para su utilización en la formulación de modelos de tráfico cuando se realiza esta distinción, toda vez que se justifica la necesidad de su concepto para describir el tráfico que se registra en los entornos de redes de computadoras actuales.

DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA

Desde la publicación de Kleinrock [2], ampliada luego en [3], que establece la teoría matemática que gobierna a las redes con conmutación de paquetes, la existencia de dependencias temporales en los comportamientos de los diferentes tipos de flujos de tráfico de datos, se ha convertido en un área de investigación apasionante con innumerables descubrimientos a su haber, destacándose, entre todos ellos, el del enorme impacto e influencia que éstas poseen sobre las prestaciones de los sistemas de colas. A raíz de este último hecho, se explican tanto la existencia como coexistencia actuales, de una amplia variedad de modelos de tráfico de entrada, que exhiben estructuras con correlaciones más o menos complejas, y que son aplicados a casos en los cuales los modelos de los sistemas de comunicaciones bajo estudio permiten mantener un manejo analítico adecuado. En cualquier caso, estos modelos, fundamentalmente Markovianos, desprecian las correlaciones temporales a partir de una determinada separación temporal, aún cuando pueda ser esta aumentada arbitrariamente a costa de complicar los modelos con parámetros adicionales.

Desde 1993, un creciente número de estudios publicados en la literatura han documentado que el patrón de tráfico de datos se modela bien mediante procesos autosimilares en una amplia gama de situaciones del mundo real y de las redes [1], encontrando su referente máximo y trabajo fundacional en la investigación de Leland, Willinger, Taqu y Wilson [4], presentada originalmente en ACM SIGCOMM '93, y luego corregida y aumentada en [5]. No obstante la existencia de un cierto número de trabajos anteriores que aportan descripciones informales sobre este comportamiento como [6]-[8], y de una excepción obra del propio Mandelbrot [9], nadie había presentado la noción de autosimilitud aplicada al análisis del tráfico de datos en si, y este trabajo hizo añicos la ilusión de que un simple análisis de colas, basado en la suposición de que el tráfico fuera de Poisson pudiera adecuadamente modelar todo el tráfico de red [1], demostrando que el tráfico en Ethernet posee naturaleza autosimilar o fractal y requiere por tanto de nuevos planteamientos tanto de modelado como de análisis. Al respecto, la metodología seguida por los autores acusa una masiva recopilación de muestras de tráfico entre los años 1898 y 1992, desde distintas LAN Ethernet del centro de investigaciones e ingeniería de Bellcore en Morristown, USA [5], la cual se plasma en una detallada colección de alta resolución temporal totalizando más de 100 millones de paquetes con precisiones de 10 μ s, agrupados en cuatro conjuntos de medidas disponibles en [10], y en la aplicación de un riguroso y exhaustivo análisis estadístico, basado en el modelado de las fuentes de tráfico usando distribuciones de cola hiperbólica, en particular de Pareto, comparando los resultados obtenidos con el comportamiento de los

flujos de tráfico de las trazas reales, y en la observación del valor estimado para el parámetro de Hurst (H) para cada uno de los cuatro conjuntos de muestras de tráfico, expresados para su procesamiento como series de pares ordenados de datos compuestos por el tiempo de arribo y el tamaño del paquete Ethernet, como así mismo para cada nivel de agregación temporal de tráfico considerado. Un completo análisis tanto del planteamiento como de la metodología seguida por los autores se encuentra en [11] y [12], y sus demostraciones en [13].

En concreto, esta investigación demuestra que:

- Es posible modelar el tráfico de Ethernet produciendo resultados similares a los del tráfico real de Ethernet requiriendo pocos parámetros (parsimonia), y con el añadido fundamental de ser físicamente plausibles.
- El tráfico LAN Ethernet puede ser modelado a través de la superposición de muchas fuentes que oscilan entre un estado de transmisión de ráfagas y uno de inactividad, empleando, para sus caracterizaciones, distribuciones de varianza infinita. En particular se comprueba utilizando una distribución de Pareto.
- El tráfico Ethernet es estadísticamente autosimilar con independencia del lugar y el momento en que se realice su comprobación.
- El grado de autosimilaridad medido en términos del parámetro de Hurst (H), es una función del factor de utilización de Ethernet y puede ser empleado para dimensionar las ráfagas de tráfico.
- Los modelos tradicionales de tráfico no son capaces de capturar la propiedad de autosimilaridad.

Estos resultados y sus profundas implicancias, como es de argüir de los párrafos precederos, desencadenan una vorágine en los investigadores en pos de observar este mismo comportamiento asociado a los más diversos tipos de escenarios de comunicaciones y de aplicaciones.

A continuación se procede con la entrega de un reporte exhaustivo de resultados de investigaciones, en atención a su ámbito de aplicación, que abordan el tratamiento de sistemas de comunicaciones y de aplicaciones desde una perspectiva autosimilar. Cabe señalar que el ánimo radica no tan solo en mostrar el empleo de esta visión, sino que además en exponer resultados que disienten de ella.

En [14]-[18] se demuestra el comportamiento autosimilar o fractal del tráfico en redes WAN evidenciando el fallo de los modelos de Poisson para representar las fuertes correlaciones existentes a diferentes escalas temporales. En [19]-[25] se aportan evidencias y conclusiones de

sobre este comportamiento en el tráfico debido al WWW considerando tanto escenarios de interconexión como patrones de tráfico en navegadores. Por su parte, [26] y [27] colocan de manifiesto la naturaleza fractal del flujo de datos de los protocolos que componen el sistema de señalización 7 (SS7) en redes de señalización de canal común [28], demostrando que los métodos tradicionales no resultan adecuados para interpretar su comportamiento y la duración de las llamadas queda mejor caracterizada si se emplean distribuciones de cola hiperbólica.

En otro ámbito, [9] y [29]-[33] demuestran que la LRD es una característica inherente del tráfico de video VBR que no guarda relación alguna con el tipo de codec o la cantidad de efectos especiales que contengan las escenas grabadas. Específicamente, estudian los flujos de tráfico de video VBR transmitidos a través de redes B-ISDN, ATM e Internet, demostrando que el comportamiento de la cola de la distribución que representa al ancho de banda marginal puede ser descrito con exactitud si se emplean distribuciones de cola hiperbólica (como Pareto); que la función de autocorrelación de las secuencias de vídeo decae hiperbólicamente (esto equivale a la dependencia de largo alcance) y que puede ser modelada empleando procesos autosimilares, y, finalmente, que el empleo de modelos que tan solo capturen la dependencia de corto alcance (SRD) resulta inapropiado para caracterizar este tipo de tráfico debido a que sobrestiman el rendimiento conduciendo a asignaciones insuficientes de recursos, lo cual deriva, finalmente, en malas percepciones por parte de los usuarios de las redes al presentarse dificultades para lograr la calidad de servicio por ellos esperada.

En el campo de las comunicaciones inalámbricas, en [34] se demuestra que el tráfico en las redes CDPD presenta un comportamiento con dependencia de largo alcance. Empleando los métodos R/S y Varianza-Tiempo, estima valores para el parámetro de Hurst de $H = 0,8$ y $H = 0,9$, respectivamente, desestimando así el uso de modelos predictivos basados en procesos de arribos de Poisson. En [35] se investiga el impacto de la movilidad sobre el tráfico agregado en las redes inalámbricas de la ciudad de Bristol, UK, y si en conjunto las aplicaciones de voz y datos producen tráfico autosimilar. Se concluye que el tráfico agregado generado por los usuarios móviles que emplean en conjunto servicios de voz y datos exhibe un comportamiento autosimilar LRD que no guarda relación con la tasa de penetración de los servicios. Se advierte sobre los drásticos cambios que deben experimentar las implementaciones de servicios multimedia inalámbricos en términos de los perfiles de tráfico empleados en sus modelos para lograr capturar esta característica. Desde otra perspectiva, en [36] se demuestra que el tráfico en redes inalámbricas con topología ad hoc es autosimilar y pronosticable como una consecuencia de que las series temporales autosimilares subyacentes son, en esencia, pronosticables. Los datos necesarios son capturados

empleando una red inalámbrica de prueba con topología ad hoc. En [37] se aborda el análisis de tráfico y el diseño de redes inalámbricas IP describiendo el tráfico TCP como dominante en la Internet actual e indicando que su naturaleza estadística exhibe el mismo comportamiento sobre todas las escalas temporales. Expone, además, un análisis de trazas de tráfico con el cual se demuestra la naturaleza estadísticamente autosimilar de los tráficos debidos a la WWW y al video VBR sobre este tipo de redes. En [38] se desarrolla un nuevo modelo para el tráfico en redes inalámbricas que tiene su origen en los procesos con renovación fractal alternantes (AFRP) propuestos como modelos de tráfico en [15], y en el modelo para tráfico de redes de banda ancha empleando procesos con renovación fractal alternantes extendidos (EARFP) propuesto en [39]. Con la incorporación de una tasa límite para la alternancia entre los dos estados, llamada tasa límite extendida, se formula el modelo Rate-Limited EARFP, que supone un avance respecto a los modelos wireline tradicionalmente empleados para modelar tráfico en redes inalámbricas, por cuanto atiende sus dos principales deficiencias: la omisión de los efectos de las correlaciones temporales LRD, y la incapacidad para realizar pronósticos confiables de rendimiento como producto de la alta dependencia con procesos de corto alcance. En [40] se trata extensamente el problema del modelado del tráfico de datos que fluye desde y hacia las redes inalámbricas con respecto a Internet, atendiendo a estructuras de comunicaciones inalámbricas de gran escala. Sobre la base de la metodología expuesta en [41] y probada extensamente en [42]-[44], se concluye que la circulación de los flujos de tráfico no puede ser tratada empleando modelos de Poisson, y que su comportamiento es estadísticamente autosimilar. En [45] se proponen dos soluciones para crear un puente de interconexión entre enlaces WiMAX y WiFi. La primera se basa en el mantenimiento de un cierto nivel de QoS de extremo a extremo independiente de las tecnologías inalámbricas utilizadas, mientras que la segunda apunta a la reducción de la complejidad en su implementación física a costa de no brindar ninguna garantía de QoS. En ambos casos se compara el rendimiento del sistema con simulaciones por computadora que consideran tráfico de tiempo real con dependencia de largo alcance, que se manifiesta a través del decaimiento de tipo polinómico de la función de autocorrelación. Para modelar el tráfico generado por los múltiples terminales dentro de la WLAN se recurre a la metodología On/Off presentada en [15], apoyando sus fundamentos en [46]. Finalmente en el mismo contexto, pero en otro campo de aplicación, en [47] se trata el uso de la geometría fractal en el proceso de diseño de antenas, mientras que en [48] se propone una metodología de síntesis general que abarca el diseño eficiente de antenas fractales y sus aplicaciones para WiMAX.

En el campo de las redes ópticas, [49] trata extensamente el uso de modelos de tráfico autosimilares, en particular el propuesto en [16], como única vía para representar

fielmente la realidad y evaluar el rendimiento en redes Ethernet ópticas pasivas (EPON). En [50] se propone un nuevo protocolo para conmutación etiquetada en redes ópticas con conmutación óptica de ráfagas (OBS), con un etiquetado temporal y espacial que permite mantener siempre unidas las señalizaciones con las funciones de direccionamiento. Los resultados obtenidos se fundan en simulaciones sobre la premisa de aceptar la autosimilitud del tráfico en las redes con multiplexación por longitud de onda (WDM). Finalmente en [51] se reporta sobre las implicancias de reducir la autosimilaridad del tráfico IP por parte de los algoritmos de ensamblaje de OBS.

El volumen de literatura existente sobre tráfico de datos autosimilares es muy amplio, y aquí sólo se mencionan unos pocos artículos que sustentan la posición de esta investigación respecto a su uso. Se insta al lector a que, para mayores referencias, consulte [52] y [53] para una síntesis de los principales tipos de modelos de tráfico existentes, [54] y [55]: dos recopilaciones notables de capítulos de distintos autores que exponen un exhaustivo informe del tema, [56]: una completa exposición teórica sobre procesos autosimilares, [57]-[61]: para explorar en el concepto de las fractales y sus usos.

No obstante todos los argumentos anteriores que colocan de manifiesto las bondades y ventajas que la utilización de modelos parsimoniosos y que confieren, además, una interpretación física plausible a sus parámetros, implica, surge el cuestionamiento sobre el grado de prevalencia de estos patrones de tráfico autosimilares, y de cuáles son las condiciones en que el análisis de rendimientos depende críticamente de considerar la autosimilaridad. En este sentido es válido preguntarse no tan solo por el origen de los datos que han sido analizados con respecto a las trazas sintéticas generadas, sino que además, cuál es el contexto o el ámbito en el cual estas comparaciones han sido realizadas, y hacia dónde se orientan los resultados obtenidos. No menos cierto es que, a la luz de todas las investigaciones presentadas, parece incluso irrelevante pensar en un análisis de colas tradicional para representar los flujos de tráfico de datos en las actuales redes de alta velocidad. Pero esto no es tajante ni taxativo; no puede subestimarse esta metodología de plano, ni tampoco es adecuado pensar que la primera es la solución unificada con tan solo argumentar su ubicuidad en todas las escalas temporales, puesto que esto último, analizado desde una perspectiva superior, y a pesar de que la presencia de la correlación en el tráfico no está bajo discusión, conlleva al cuestionamiento de si la sola estructura de correlación es suficiente para caracterizar el tráfico sobre procesos autosimilares. El contexto así descrito es muy amplio y, por lo tanto los resultados necesitan y deben ser acotados. Existe un cierto número de investigaciones que colocan de manifiesto la falta de consenso acerca del ámbito de aplicación de los modelos autosimilares y del impacto que posee la dependencia de largo alcance (LRD) sobre

el rendimiento de los sistemas de comunicaciones, y aun cuando su número es bastante más limitado que aquellos cuyos resultados fundamentan precisamente lo contrario, sus conclusiones deben ser analizadas con detención por cuanto evidencian, en lo esencial, una cuestión crítica y fundamental en común: “dado que los modelos de colas tradicionales son incapaces de evidenciar la característica de autosimilaridad, su validez para predecir rendimientos sería apoyada si se demuestra que la autosimilaridad no posee un impacto medible en el rendimiento”. Y más aún si se demuestra que los modelos cuya base radica en procesos estocásticos autosimilares, fallan al considerar el impacto de parámetros característicos importantes en cada caso particular de red.

Precisamente sobre la base de este último punto, en [62] se expone un detallado análisis de un fallo detectado en modelos autosimilares al considerarse que son incapaces de reflejar el impacto del rango de escalas temporales de interés para la evaluación del rendimiento y la predicción de problemas, y los estadísticos de primer orden tales como la distribución marginal del proceso. Sobre la base de trazas generadas por un codificador JPEG de un canal de televisión NTSC y las trazas de [6] se reporta que:

- Existe un horizonte de correlación de modo que la tasa de pérdidas no afecta al rendimiento más allá del mismo.
- El nivel de correlación considerado para evaluar el rendimiento depende no tan solo de la estructura de la correlación del tráfico fuente, sino que además de las escalas temporales propias del sistema bajo estudio.
- El factor de escala considerado posee un impacto considerablemente mayor sobre la tasa de pérdidas que el parámetro de Hurst o el tamaño de los buffers.
- Aumentar el tamaño de los buffers ayuda a reducir la tasa de pérdida solo si se trata de tráfico SRD. Para tráfico LRD, no posee impacto considerable.

El análisis en profundidad de este trabajo evidencia que el impacto de la LRD se trata sobre las prestaciones del modelo de servidor único en relación con el tamaño del buffer de entrada utilizando para ello un modelo de fluido [59], [63], [64] que presenta una caída hiperbólica hasta un coeficiente de corte determinado a partir del cual cae a cero. Basados en los resultados obtenidos tras numerosos experimentos de simulación, empleando tanto las trazas de video como las trazas Ethernet para distintos valores del parámetro de Hurst, diferentes coeficientes de corte y tamaños de buffer, y una amplia gama de distribuciones marginales, los autores descubren la existencia de un coeficiente de corte crítico que denominan “horizonte de correlación”, tal que la tasa de pérdidas no se ve afectada

si el coeficiente de corte se incrementa por encima de él. Así, el horizonte de correlación separa los coeficientes de correlación relevantes de los irrelevantes con respecto a la tasa de pérdidas.

Finalmente, en sus conclusiones los autores argumentan que al existir un horizonte de corte finito (que para el caso de los buffers finitos es una función del tamaño de los mismos), cualquier modelo que capture la estructura de correlación hasta dicho horizonte será válido para representar el sistema. Por contrapartida, si el horizonte de correlación es infinito (lo cual tiene explicación para sistemas que presentan buffers infinitos o si la escala temporal relevante), es decir la escala de tiempos propia del sistema no puede ser determinada de forma clara, entonces deben utilizarse modelos autosimilares.

Sobre la base del último punto anterior, en [65] se pone de manifiesto que en el caso de considerarse un buffer finito, los efectos de la LRD son apreciables sólo si esta provoca que los períodos de ocupación se tornen lo suficientemente largos, ya que el comportamiento de su cola es afectado mayoritariamente por las características del tráfico que llega durante estos períodos. Al respecto, esta apreciación tiene sus fundamentos en [66], donde, a través de la definición del concepto de “escala temporal relevante” como la duración típica sobre la cual todas las llegadas a una cola interactúan e influyen colectivamente en su comportamiento, se deduce que para los buffers grandes el tamaño de la cola puede ser grande, por tanto interactúan muchas llegadas en la cola y provocan que la correlación de largo alcance cause más pérdidas que las predichas por aquellos modelos que no son capaces de contemplarla o no la contemplan. Sin embargo, para el caso de los buffers pequeños, donde interactúan pocas llegadas, el efecto de la LRD es imperceptible. Luego, la postura sobre la apreciabilidad de los efectos de la LRD en términos de su impacto sobre los períodos ocupados, los autores la plasman a través del concepto de “Reset Effect”, el cual involucra que al vaciarse el buffer en cuestión, el sistema se olvida de todo. De esta forma, en el caso de servidores de video VBR, como son sensibles al retardo y a la pérdida de tramas, la intensidad del flujo de tráfico no será muy alta, dando lugar a períodos de ocupación cortos y a un Reset Effect muy acusado en las regiones de operación práctica, efecto que además se verá reforzado en el caso de los buffers finitos, por el efecto de truncamiento propio de este tipo de buffers. Esto último debido se debe a que un período ocupado en el que se produce un desbordamiento es más corto que el correspondiente en un modelo de buffer infinito, o de forma equivalente, pueden producirse varios períodos ocupados en la versión de buffer finito antes que finalice el correspondiente período de ocupación en la versión de buffer infinito. Luego, a través del uso de modelos de Markov, los autores reportan finalmente que cuando la SRD es fuerte y el parámetro H es moderado, la LRD no

tiene impacto sobre la ocupación del buffer y por lo tanto sus modelos dan lugar a buenas estimaciones, y para el caso en que la SRD presente un comportamiento poco acusado y el parámetro H un valor elevado, el efecto de truncamiento es lo suficientemente fuerte para que sus modelos estimen bien la tasa de pérdidas, aun cuando se reconoce que para una intensidad de tráfico elevada y un tamaño de buffer grande, la estimación del tamaño medio de la cola es mala.

En [67], una investigación de características similares a la anterior, se introduce el concepto de “escala temporal crítica (CTS)” como sigue. Dados el tamaño del buffer y la distribución marginal de tamaños de tramas, se define la CTS de una fuente de video VBR como el número de correlaciones de tramas que contribuyen efectivamente con la tasa de pérdida de celdas. Utilizando modelos de las trazas de video de [9], los autores exponen que tanto para modelos Markovianos, como con LRD, la CTS es finita y decrece con el tamaño del buffer. Consecuencia de ello, y bajo el supuesto de que el tamaño del buffer requerido para multiplexar una gran cantidad de fuentes de video VBR es típicamente pequeño producto de las restricciones propias de las aplicaciones de tiempo real, se concluye que para escenarios de dimensionamiento de buffers en redes ATM, no es necesario capturar las correlaciones con LRD de una fuente de video aunque el tráfico presenta acusadamente este comportamiento, puesto que para todos los casos prácticos, la SRD tiene un impacto dominante. Sin esperar, caben los siguientes cuestionamientos con respecto a esta última conclusión y a la investigación en general:

- El resultado se funda en un análisis completamente basado en distribuciones Gaussianas marginales, que aun cuando puede ser explicado desde la perspectiva de mantener un tratamiento analítico adecuado, no es suficiente para validar generalizaciones absolutas del tipo “en todos los casos”, ni tampoco para atenuar el hecho de trabajar con distribuciones independizadas del comportamiento de otras.
- No se reporta el comportamiento de los modelos si se emplean distribuciones de cola hiperbólica o si se prueban con distribuciones sin márgenes.

Una versión extendida de esta investigación es [68]. En ella no tan solo se asumen estas dos consideraciones, sino que además, se vuelca la atención hacia la relevancia de la SRD y la LRD en el tráfico de video VBR de tiempo real en las redes de banda ancha (particularmente ATM) y los servicios integrados en Internet, y a través de un enfoque teórico y simulaciones, los autores abordan la problemática de determinar rangos admisibles para la probabilidad de pérdida de celdas y su relación con el tamaño de los buffers en términos del retardo máximo. Conviene señalar que esta investigación se desarrolla en

el contexto de validar el uso de modelos Markovianos y SRD para aplicaciones de video, y con este objetivo los autores demuestran fundamentalmente que:

- Las correlaciones de largo plazo no tienen impacto sobre la probabilidad de pérdida de celdas.
- Un modelo de Markov adecuadamente implementado que capture el rango relevante de correlación provee buenas predicciones del rendimiento.
- La captura de la dependencia de largo alcance por si sola (sin considerar la SRD) si puede conducir a una subestimación de los recursos necesarios en la red.
- La CTS explica la fuerte relación existente entre la probabilidad de pérdida de celdas en ATM y la SRD en desmedro de la LRD. Es decir para las aplicaciones de interés, la CTS es pequeña y más sensible a las correlaciones de tráfico a corto que a largo plazo”.
- Son factibles modelos Markovianos analíticamente simples y con capacidad de armonizar distribuciones marginales y correlaciones sobre una determinada escala temporal crítica.

Como último ejemplo de esta ya mencionada falta de consenso llevada al campo del tráfico de video, en [80] se presenta un modelo de fuente para tráfico VBR que emplea cadenas de Markov de estados finitos, donde se expone que si bien el modelo original presentado en [34] es bueno en término de su parsimonia, no se presta de manera adecuada para estudios analíticos.

Recapitulando, hasta el momento se han presentado seis investigaciones con un común denominador: disentir acerca de la aplicabilidad ciega del modelo autosimilar y sus implicancias en el rendimiento, considerando para sus ejemplos sistemas que involucran tráfico de video, principalmente del tipo VBR. Pero como es de esperar, este no es el único campo en el cual las discrepancias aparecen, y de forma más aguda y en directa relación con la hipótesis de trabajo planteada, existe un cierto número de investigaciones que cuestionan la validez de la utilización del parámetro de Hurst como descriptor único para caracterizar la LRD de un proceso estocástico autosimilar. Pero antes de tratar este tema se informa un sobre un último grupo de investigaciones que manifiestan una postura crítica hacia los modelos autosimilares en ámbitos diferentes al del tráfico de video.

En el campo de las redes inalámbricas y sus tecnologías asociadas, en [70] se estudia el comportamiento de la característica de autosimilitud del tráfico cuando este se propaga desde una red cableada hacia una inalámbrica a través de un gateway, concluyéndose que el dispositivo

puede cambiar el grado de autosimilitud del tráfico como consecuencia directa de las operaciones de re-ensamblaje y re-paquetización sobre el tráfico autosimilar de entrada, llegando, inclusive, a su anulación. En [71] se reafirma el comportamiento anterior considerando el estudio de la influencia del mecanismo de MAC de IEEE 802.3e sobre el tráfico LRD cuando éste atraviesa uno o varios enlaces, sugiriendo que el tráfico transportado a través de una interfaz WLAN es objeto de profundos cambios estructurales en su modelo estadístico, y evidenciando que el modelo de tráfico Gaussiano fraccional resulta inadecuado para describir su comportamiento.

Finalmente, en el campo de las redes OBS, [72] informa el desarrollo de un algoritmo para ensamblaje de ráfagas que tiene por objetivo reducir el grado de autosimilitud del tráfico IP. Se reconoce que esta es una característica inherente al tráfico WWW, pero su presencia redundante en una importante desventaja en términos del rendimiento de las colas, por lo que debe ser reducida en favor de un tráfico SRD aleatorio.

En el primer párrafo de la presente página se menciona la existencia de un cierto número de investigaciones que cuestionan uso del parámetro de Hurst como indicador único para capturar la característica de autosimilaridad de un proceso estocástico que se precie de tal, además de recalcar la importancia que este hecho reviste para la demostración de la hipótesis de trabajo planteada. Al respecto, y recordando el planteamiento de la misma, se acota que el ánimo no recae en validar exhaustivamente el parámetro de autosimilaridad o parámetro de Hurst, sino que solo en obtener un indicador de la presencia de la característica en series representativas de tráfico. Considérese la siguiente definición:

El proceso real valuado $\{X(t), t \in \mathbb{R}\}$ es autosimilar con exponente $H > 0$ si para todo $a > 0$ las distribuciones finito dimensionales de $\{X(at), t \in \mathbb{R}\}$ son idénticas a las distribuciones finito dimensionales $\{a^H X(t), t \in \mathbb{R}\}$, es decir que se cumple la relación siguiente

$$\{X(at), t \in \mathbb{R}\} =_d \{a^H X(t), t \in \mathbb{R}\} \quad \forall a > 0 \quad (1)$$

donde $=_d$ significa igualdad para todas las distribuciones finito dimensionales [73], [74].

La propiedad definida por (1), habitualmente, se conoce como propiedad de escalamiento, y una consecuencia directa de su definición es que un proceso autosimilar preserva su distribución, y con ello sus estadísticos, toda vez que se somete a un escalamiento temporal. Además, bajo el mismo punto de vista el parámetro H , o de Hurst, se conoce como el parámetro de autosimilaridad para el proceso estocástico $X(t)$ al cual le es asociado.

La primera investigación en reconocer y abordar la necesidad de contar con parámetros adicionales para caracterizar la variabilidad del tráfico es [34], donde si bien se acepta que H es necesario para este efecto, no es suficiente. Mediante un detallado análisis estadístico de muestras de video VBR, los autores concluyen que la autocorrelación de las secuencias de video VBR decae hiperbólicamente, equivalente a la LRD. Pero como la LRD es una relación de la frecuencia de las componentes del proceso y no la distribución de los requerimientos de ancho de banda, si la distribución marginal se comprime a causa de que el coeficiente de variabilidad (coeficiente entre el ancho de banda medio y la desviación estándar) tiende a cero cuando la cantidad de fuentes de entrada multiplexadas que originan el tráfico tiende a infinito, el tráfico, a medida que aumenta la cantidad de fuentes, se confina dentro de límites estadísticos más angostos, y aunque dentro de estas fronteras el comportamiento sigue siendo de largo alcance (resultado confirmado a través de $H = 0,7$), en el rango donde la desviación estándar sea mucho menor que el producto entre la media de la distribución del ancho de banda y la cantidad de fuentes de entrada multiplexadas, el tráfico no depender de H . Por lo tanto, H es necesario para caracterizar la variabilidad, pero no es suficiente. Luego, una adecuada caracterización del tráfico de video debe considerar, a lo menos los siguientes cuatro parámetros: la media de la distribución del ancho de banda, el número de fuentes de entrada multiplexadas, y la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad proveniente de las mismas. Los autores aclaran, finalmente, que estos resultados son válidos sólo si se cumple el teorema central del límite [75], es decir, cuando la desviación estándar es finita. Aunque el resultado anterior pudiese parecer esperable pues la parsimonia puede llevar a imprecisiones tanto en las interpretaciones como en los resultados, no lo es ante el efecto que produce el suponer que si no se conoce en detalle el comportamiento de las componentes de un determinado proceso estocástico, $\{P_1\}$, que muestra un cierto parámetro de autosimilitud H_1 , entonces quede claramente establecida una correspondencia biunívoca entre H_1 y $\{P_1\}$. En otras palabras, son posibles procesos que exhiben comportamientos claramente diferenciados, pero cuyas estructuras de correlación estén caracterizadas por el mismo parámetro H . Al respecto, [76] aborda esta problemática considerando el comportamiento asintótico de un buffer ilimitado de un multiplexor bajo diferentes modelos de tráfico autosimilar de entrada. En particular modelos de servidor infinito de Cox, o modelos $M/G/\infty$ [77], y de ruido fraccional Gaussiano [78], [79]. Así, los autores reportan la obtención de dos comportamientos completamente disímiles para la cola de probabilidades del buffer, a saber: mientras que con el primero la caída es mayoritariamente hiperbólica, con el segundo exhibe un comportamiento asintótico de Wiebull [80], todo lo cual no significa más que la insuficiencia del parámetro

de Hurst como único descriptor caracterizar la LRD en los modelos de tráfico de entrada [81], [82]. También en [83] se demuestra como trazas sintéticas que presentan idénticos parámetros de autosimilaridad y medias difieren significativamente entre si. Por último, en [84] se reporta la insuficiencia del parámetro de Hurst, por si solo, como un descriptor preciso de la dependencia de largo alcance del tráfico de una red Ethernet. En esta investigación se demuestra fehacientemente, a través de un análisis de colas aplicado a una serie de datos representativa de las trazas del tráfico real registrado en la red Ethernet del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de California, Los Angeles, CA, USA, que el parámetro de Hurst no proporciona una predicción precisa del rendimiento de las colas para un determinado tráfico LRD, además de que su comportamiento no es monótono con respecto a la presencia o ausencia de ráfagas si la serie original se desagrega en otras de menor tamaño, lo cual también implica que H tampoco sirve para caracterizar la importancia relativa de agrupaciones dentro de un total. Se observa claramente que ambos resultados son opuestos al convencionalismo de [6] toda vez que H no puede ser empleado para dimensionar las ráfagas de tráfico en Ethernet.

Preguntas sobre el dónde, cuándo y bajo que conjunto de circunstancias el empleo de procesos autosimilares en el modelado de sistemas de comunicaciones y aplicaciones relacionadas es por completo válido, así mismo como la incertidumbre acerca de la existencia de un escenario que aúne criterios y su influencia en las características fundamentales de los procesos aun no se contestan. Sin embargo todas ellas parecen tener una respuesta derivada del análisis de las investigaciones de Ryu y Lowen, [85], [86], sobre el uso de procesos fractales puntuales (FPP) para modelar y analizar tráfico autosimilar en redes [87]. Concretamente, en estas investigaciones se propone hacer una distinción entre autosimilitud en el nivel de aplicación y autosimilitud en el nivel de red para efectos del diseño y administración de redes de banda ancha en términos de una correcta provisión de la QoS requerida por las aplicaciones, siendo sus principales resultados las demostraciones de que la autosimilaridad del tráfico VBR puede, con frecuencia, ser ignorada ante el dimensionamiento de los buffers en ATM, y que el tráfico autosimilar de nivel de aplicación puede ser gestionado efectivamente en el contexto del control de admisión para asignación de recursos con garantías de calidad de servicio, debido a que es independiente de las condiciones de red en las que se envía.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una detallada discusión respecto de las bases teóricas sobre las cuales se cimienta la posición de considerar que el tráfico en redes de computadoras de alta velocidad exhibe un comportamiento autosimilar y dependencia de largo alcance.

Respecto de lo anterior, y en completa atención tanto a los argumentos que promueven esta postura como a los que discrepan de ella, se estima considerar que el tráfico en los actuales entornos de redes de computadoras es de naturaleza estadísticamente autosimilar y presenta una acusada dependencia de largo alcance (LRD).

Aceptando las singularidades anteriores como inherentes a los flujos de tráfico de los actuales entornos de redes de alta velocidad, se propone que sus comportamientos son susceptibles de ser modelados acotando su aplicabilidad al nivel de capa de red, estimándose que las propiedades más relevantes de los procesos estocásticos autosimilares son consistentes para ser utilizadas en la formulación de modelos de tráfico cuando se realiza esta distinción, toda vez que los conceptos de autosimilaridad y dependencia de largo alcance quedan justificados por la necesidad de describir con fidelidad los procesos de tráfico reales en los entornos de redes de computadoras actuales.

Para plasmar los conceptos sobre los cuales versa esta investigación, se plantea la hipótesis de trabajo siguiente:

“Es completamente factible acotar la evolución de un proceso estadísticamente autosimilar a un entorno de aplicación bien definido sin alterar su naturaleza y sus propiedades más relevantes, realzando con ello la validez de sus postulados y añadiendo una mayor plausibilidad a su interpretación física”

La cual, en completa atención a todos los argumentos anteriormente expuestos, se plantea como teóricamente factible de ser demostrada, producto de que la totalidad de sus argumentos se encuentran correctamente fundados y fundamentados, restando por tanto su demostración a nivel analítico y experimental como trabajo futuro.

REFERENCIAS

- [1] W. Stallings, “Redes e Internet de Alta Velocidad. Rendimiento y Calidad de Servicio”, 2nd ed., Madrid, Pearson - Prentice Hall, 2004, pp. 224-237.
- [2] G. Millán and G. Lefranc, “Presentation of an Estimator for the Hurst Parameter for a Self-Similar Process Representing the Traffic in IEEE 802.3 Networks,” International Journal of Computers, Communications & Control, Vol. 4, No. 2, pp. 137-174, June 2009.
- [3] G. Millán, “Traffic Flows Analysis in High-Speed Computer Networks Using Time Series,” arXiv:2103.03984 [stat.AP].
- [4] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D.V. Wilson, “On the Self-Similar Nature of

- Ethernet Traffic”, in Proc. ACM SIGCOMM ’93, San Francisco, CA, 1993, pp. 183-193.
- [5] G. Millán, G. Fuertes, M. Alfaro, R. Carrasco, and M. Vargas, “A Simple and Fast Algorithm for Traffic Flow Control in High-Speed Computer Networks”, 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), pp. 1-4, February 1994.
- [6] G. Millán, R. Osorio-Comparán, and G. Lefranc, “Preliminaries on the Accurate Estimation of the Hurst Exponent Using Time Series,” Available: arXiv: 2103.02091 [eess.SP].
- [7] G. Millán, “Análisis de Autosimilaridad de Tráfico Telemático Restringido al Nivel de Red,” Thesis Commons, 2009.
- [8] J. Beran, R. Sherman, M.S. Taqqu, and W. Willinger, “Long-Range Dependence in Variable-Bit-Rate Video Traffic, IEEE Transactions on Communications, Vol. 43, No 2/3/4, pp. 1566-1579, Feb/Mar/Apr 1995.
- [9] B. Mandelbrot, “Self-Similar Error Cluster in Communication Systems and the Concept of Conditional Stationarity”, IEEE Transactions on Communication Technology, pp. 71-90, March 1995.
- [10] G. Millán, “On the Hurst Exponent, Markov Processes, and Fractional Brownian Motion,” arXiv:2103.05019 [eess.SP].
- [11] W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, and D.V. Wilson, “Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level”, in Proc. ACM SIGCOMM ’95, Cambridge, MA, August 1995, pp. 100-113.
- [12] W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, and D.V. Wilson, “Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 5, No. 1, pp. 71-86, February 1997.
- [13] G. Millán, “Estimation of Hurst Exponent in Self-Similar Traffic Flows,” EasyChair Preprint no. 5159. 2021.
- [14] G. Millán and G. Lefranc, ”Development of Multifractal Models for Self-Similar Traffic Flows,” arXiv: 2103.06946 [eess.SP].
- [15] A. Adas and A. Mukherjee, “On Resource Management and QoS Guarantees for Long Range Dependent Traffic”, College of Computing Technical Reports, GIT-CC-94-60, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1994.
- [16] S.M. Klivansky and A. Mukherjee, “The NFSNET Simulation Platform”, College of Computing Technical Reports, GIT-CC-95-007, Georgia Institute of Technology, 1995.
- [17] V. Paxson and S. Floyd, “Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3, No. 1, pp. 226-244, June 1995.
- [18] A. Feldmann, A.C. Gilbert, W. Willinger, and T.G. Kurtz, “The Changing Nature of Network Traffic: Scaling Phenomena”, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 28, No. 2, pp. 5-29, April 1998.
- [19] M.E. Crovella and A. Bestavros, “Explaining World Wide Web Traffic Self-Similarity”, Technical Report: 1995-015, Boston University, Boston, MA, 1995.
- [20] M.E. Crovella, M.S. Taqqu, and A. Bestavros, “Heavy-Tailed Probability Distributions in the World Wide Web”, in A Practical Guide to Heavy Tails: Statistical Techniques and Applications, R. Adler, R. Feldman, and M.S. Taqqu, Eds., Boston, Birkhauser, 1998, pp. 3-25.
- [21] M.E. Crovella and A. Bestavros, “Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 5, No. 6, pp. 835-846. Dec. 1997.
- [22] M. Arlitt, R. Friedrich, and T. Jin, “Workload Characterization of a Web Proxy in a Cable Model Environments”, ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, Vol. 27, No. 2, pp. 25-36, September 1999.
- [23] M. Arlitt and T. Jin, “Workload Characterization of the 1998 World Cup Web Site”, Internet Systems and Applications Laboratory, HP Laboratories Palo Alto, Rep. HPL-1999-35(R.1), September 1999.
- [24] M. Borella and G. Brewster, “Measurement and Analysis of Long-Range Packet Dependent Behavior of Internet Packet Delays”, in Proc. IEEE INFOCOM ’98, San Francisco, CA, April 1998, pp. 497-504.

- [25] H. Xiaojun, "The Self-Similar Traffic Modeling in the Internet. Fecha de consulta: Junio de 2009, <http://www.ee.ust.hk/~heixj/publication/comp660f/comp660f.html>.
- [26] D.A. Duffy, A.A. Mc Intosh, M. Rosenstein, and W. Willinger, "Statistical Analysis of CCSN/SS7 Traffic Data from Working CCS Subnetworks", *IEEE Journal on Working CCS Subnetworks*, IEEE Communications, Vol. 12, No. 3, pp. 544-551, April 1994.
- [27] P. Pruthi and A. Erramilli, "Heavy-Tailed ON/OFF Source Behavior and Self-Similar Traffic", in *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Communications, ICC '95, Seattle, 1995*, pp. 445-450.
- [28] G. Rufa, "Developments in Telecommunications. Whit a Focus on SS7 Network Reliability", Berlin, Springer-Verlag, 2008.
- [29] D. Rose and M.R. Frater, "A Comparison of Models for VBR Video Traffic Sources in B-ISDN", *Research Report Series, Institute of Computer Science, University of Würzburg, Report No. 72, October 1993*.
- [30] M.W. Garrett and W. Willinger, "Analysis, Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 24, No. 4, pp. 269-280, October 1994.
- [31] B. Tsybakov and N.D. Georganas, "On Self-Similar Traffic in ATM Queues: Definitions, Overflow Probability Bound and Cell Delay Distribution", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 5, No. 3, pp. 397-409, June 1997.
- [32] L. Yellanki, "Impact of Short-Range and Long-Range Dependence on Variable Bit Rate Video Traffic Performance", in *Proc. of the Ninth Annual Graduate Symposium on Computer Science, Department of Computer Science, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, April 1997*, pp. 1-12.
- [33] L. Yellanki, "Performance Evaluation of VBR Video Traffic Models", *M.Sc. Thesis, Department of Computer Science, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, 1999*.
- [34] M. Zhonghua, "Analysis of Wireless Data Network Traffic", *M.Sc. Thesis, School of Engineering Science, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada, 2000*.
- [35] D.R. Basgeet, J. Irvine, A. Munro, P. Dugenie, D. Kaleshi, and O. Lazaro, "Impact of Mobility on Aggregate Traffic in Mobile Multimedia System", in the *5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC '2002)*, Honolulu, Hawaii, October 27-30, Vol. 2, pp. 333-337.
- [36] Q. Liang, "Ad Hoc Wireless Network Traffic-Self-Similar and Forecasting", *IEEE Communications Letters*, Vol. 6, No. 7, pp. 297-299, July 2002.
- [37] T. Janevski, "Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks", Norwood, MA, USA, Artech House, Inc., 2003, pp. 135-165.
- [38] J. Yu, "Modeling of High-Speed Wireline and Wireless Network Traffic", *Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA, 2005*.
- [39] X. Yang, "Impulsive Self-Similar Processes, with Applications in Broadband Communication System Modeling", *Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA, 2001*.
- [40] J. Ridoux, A. Nucci, and D. Veitch, "Seeing the Difference in IP Traffic: Wireless Versus Wireline", in *Proc. 25th IEEE International Conference on Computer Communications, INFOCOM 2006, Barcelona, Spain, April 2006*, pp. 1-12.
- [41] N. Hohn, D. Veitch, and P. Abry, "Does Fractal Scaling at the IP Level Depend on TCP Flow Arrival Processes?", in *Proc. ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop (IMW-2002)*, Marseille, France, November 2002, pp. 63-68.
- [42] N. Hohn, D. Veitch, and P. Abry, "Cluster Processes, a Natural Language for Network Traffic", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Special Issue "Signal in Networking", Vol. 51, No. 8, pp. 2229-2244, August 2003.
- [43] N. Hohn, D. Veitch, and P. Abry, "The Impact of the Flow Arrival Process in Internet Traffic", in *Proc. IEEE ICASSP 2003, Hong Kong, April 2003*, Vol. 4, pp. 37-40.
- [44] J. Rodoux, A. Nucci, and D. Veitch, "Characterization of Wireless Traffic Based on Semi-Experiments", *Laboratory of Computer Sciences, Paris 6, Université Pierre et Marie Curie, Technical Report LIP6, December 2005*.

- [45] R. Fantacci and D. Tarchi, "Bridging Solutions for a Heterogeneous WiMAX-WiFi Scenario", *Journal of Communications and Networks*, Vol. 8, No. 4, pp. 369-377, December 2006.
- [46] A. Erramilli, M. Roughan, D. Veitch, and W. Willinger, "Self-Similar Traffic and Network Dynamics", in *Proc. of the IEEE*, Vol. 90, No. 5, May 2002.
- [47] J.P. Gianvittorio and Y. Rahmat-Samil, "Fractal Antennas: A Novel Antenna Miniaturization Technique, and Applications", *IEEE Antennas and Propagations Magazine*, Vol. 44, No. 1, February 2002, pp. 20-36.
- [48] S. Ahson and M. Ilyas, "WiMAX: technologies, Performance Analysis and QoS", Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2008, pp. 21-39.
- [49] G. Kramer, "Ethernet Passive Optical Networks", USA, McGraw-Hill, 2005.
- [50] A. Huang, B. Mukherjee, L. Xie, and Z. Li, "Time-Space Label Switching Protocol (TSL-SP)", in *High-Performance Packet Switching Architectures*, I. Elhanany and M. Hamdi, Eds., Germany, Springer, 2007, pp. 197-210.
- [51] M. Maier, "Optical Switching Networks", New York, Cambridge University Press, 2008.
- [52] V.S. Frost and B. Melamed, "Traffic Modeling for Telecommunications Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 32, No. 3, pp. 70-81, March 1994.
- [53] R.G. Addie, M. Zukermann, and T.D. Neame, "Broadband Traffic Modeling: Simple Solutions to Hard Problems", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 36, No. 8, pp. 88-95, August 1998.
- [54] K. Park and W. Willinger, "Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation", New York, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [55] D.I. Sheluhin, S.M. Smolskiy, and A.V. Osin, "Self-Similar Processes in Telecommunications", John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [56] P. Embrechts and M. Maejima, "Selfsimilar Processes", Princeton University Press, 2002.
- [57] K. Falconer, "Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications", Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd., 1990.
- [58] M.R. Schroeder, "Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise", New York, W.H. Freeman and Company, 1991.
- [59] J. Lévy-Véhel and E. Lutton, "Fractals in Engineering: New Trends in Theory and Applications", London, Springer, 2005.
- [60] G. Edgar, "Measure, Topology, and Fractal Geometry", 2nd Ed., New York, Springer, 2008.
- [61] B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature", New York, W.H. Freeman and Company, 1983.
- [62] M. Grossglauser and J-C Bolot, "On the Relevance of Long-Range Dependence in Network Traffic", In *Proc. ACM SIGCOMM '96*, California, August 1996, pp. 15-24.
- [63] J.-Y. Le Boudec and P. Thiran, "Network Calculus. A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet", Germany, Springer-Verlag, 2004, pp. 3-6.
- [64] A. Adas, "Traffic Models in Broadband Network", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, No. 7, pp. 82-89, July 1997.
- [65] D.P Heyman and T.V. Lakshman, "What are the Implications of Long-Range Dependence for VBR-Video Traffic Engineering?", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 4, No. 3, pp. 301-317, June 1996.
- [66] K. Sriram and W. Whitt, "Characterizing Superposition Arrival Processes in Packet Multiplexers for Voice and Data", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 4, No. 6, pp. 833-846, September 1986.
- [67] B.K. Ryu and A. Elwaid, "The Importance of Long-Range Dependence of VBR Video Traffic in ATM Traffic Engineering: Myths and Realities", in *Proc. ACM SIGCOMM '96*, California, August 1996, pp. 3-14.
- [68] B.K Ryu and A. Elwaid, "The Relevance of Short Range and Long-Range Dependence of VBR Video Traffic to Real-Time Traffic Engineering", unpublished.
- [69] K. Chandra and A.R. Reibman, "Modeling One- and Two-Layer Variable Bit Rate Video", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 7, No. 3, pp. 398-417, June 1999.
- [70] J. Yu and A. Petropulu, "Is High-Speed Wireless Network Traffic Self-Similar?", in *Proc. of IEEE*

- International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004 (ICASSP '04), Montreal, May 2004, Vol. 2, pp. 425-428.
- [71] S. Bregni, P. Giacomazzi, and G. Saddemi, "Transport of Long-Range Dependent Traffic in Single-Hop and Multi-Hop IEEE 802.3e Networks", in Proc. of IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, Nov. 30 – Dec. 4, 2008.
- [72] A. Ge, F. Callegati, and L.S. Tamil, "On Optical Burst Switching and Self-Similar Traffic", IEEE Communications Letters, Vol. 4, No. 3, pp. 98-100, March 2000.
- [73] D.I. Sheluhin, S.M. Smolskiy, and A.V. Osin, "Self-Similar Processes in Telecommunications", John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 8-9.
- [74] X. Yang, "Impulsive Self-Similar Processes, with Applications in Broadband Communication System Modeling", Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA, 2001, p.17.
- [75] F.M. Dekking, C. Kraaikamp, H.P. Lopuhaä, and L.E. Meester, "A Modern Introduction to Probability and Statistics. Understanding Why and How", USA, Springer, 2005, pp. 195-203.
- [76] M. Parulekar and A.M. Makowski, "Tail Probabilities for a Multiplexer with Self-Similar Traffic", in Proc. IEEE INFOCOM '96, San Francisco, CA, March 1996, Vol. 3, pp. 1452-1459.
- [77] M. Parulekar and A.M. Makowski, " $M|G|\infty$ Input Process: A Versatile Class of Models for Network Traffic", Institute for Systems Research, University of Maryland, Technical Research Report T.R 96-59, 1996.
- [78] B. Mandelbrot and W. Van Ness, "Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications", SIAM Review, Vol. 10, No. 4, pp. 422-437, 1968.
- [79] J. Beran, "Statistical Methods for Data with Long-Range Dependence", Statistical Science, Vol. 7, No. 4, pp. 404-416, November 1992.
- [80] H. Rinne, "The Weibull Distribution. A Handbook", USA, CRC Press, 2009.
- [81] M. Parulekar and A.M. Makowski, "Buffer Overflow Probabilities for a Multiplexer with Self-Similar Traffic", Institute for Systems Research, University of Maryland, Technical Research Report T.R 95-67, 1995.
- [82] M. Parulekar and A.M. Makowski, "Tail Probabilities for $M|G|\infty$ Input Processes. (I): Preliminary Asymptotics", Institute for Systems Research, University of Maryland, Technical Research Report T.R 96-41, 1996.
- [83] A. Patel and C. Williamson, "Statistical Multiplexing of Self-Similar Traffic: Theoretical and Simulation Results", unpublished.
- [84] R. Ritke, X. Hong, and M. Gerla, "Contradictory Relationship Between Hurst Parameter and Queuing Performance (extended version)", in Telecommunication Systems Journal, Springer Netherlands, Vol. 16, No. 1/2, pp. 159-175, 2001.
- [85] B.K. Ryu and S.B. Lowen, "Point Process Approaches for Modeling and Analysis of Self-Similar Traffic: Part I: Model Construction", in Proc. IEEE INFOCOM '96, San Francisco, CA, March 1996, Vol. 3, pp. 1468-1475.
- [86] B.K. Ryu and S.B. Lowen, "Point Process Approaches for Modeling and Analysis of Self-Similar Traffic: Part II: Applications", in Proc. 5th International Conference on Telecommunications Systems, Modeling and Analysis, Nashville, TN, USA, March 1997.
- [87] S.B. Lowen and M.C. Teich, "Estimation and Simulation of Fractal Stochastic Point Processes", Fractals, Vol. 3, No. 1, pp. 183-210, 1995.