



Considerations About the Inclusion of Long-term Temporary Correlations and Self-Similar Patterns in IEEE 802.3-2005 Network Models

Ginno Millán

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

March 16, 2021

Considerations About the Inclusion of Long-Term Temporary Correlations and Self-Similarity Patterns in IEEE 802.3-2005 Network Models

Ginno Millán

ginno.millan@uss.cl

Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería y Tecnología

Lago Panguipulli 1390, Puerto Montt, Chile

Resumen

Se presentan los fundamentos de un proyecto de investigación sobre el modelado de redes de computadoras con mecanismo de control de acceso al medio según el estándar IEEE 802.3-2005, empleando los postulados de la teoría de conjuntos autosimilares para establecer el nivel de impacto que poseen las correlaciones temporales de largo plazo sobre el rendimiento de tales redes. Se postula una nueva forma de estimar los grados de autosimilaridad basada en una variación del estimador de Whittle.

Abstract

The foundation of a research project about a model of computer networks with media access control mechanism based on the IEEE standard 802.3-2005 is presented. The model draws from the theory of self-similar sets for establishing the impact level that the long range temporary correlations have on the performance of such networks. A new method for the estimation of self-similar levels based on a variation of the Whittle estimator is postulated.

1.- Introducción

El posicionamiento y consolidación de Ethernet como el estándar predominante en el campo de las redes de computadoras, tanto a niveles de coberturas locales como extensas, frente a tecnologías tradicionales como Frame Relay, DQDB y ATM, son hechos que se explican a partir de, precisamente, sus principales características, a saber: compatibilidad e interoperatividad entre equipamientos Ethernet de distintas velocidades, altas prestaciones, escalabilidad y capacidad de autoconfiguración, independencia de esquemas de direccionamiento IP y, por supuesto, por su economía de escala.

Ethernet, inicialmente a 2.94 Mb/s, ha evolucionado de 10 Mb/s a 10 Gb/s en veintidós años (ello sin considerar, además, el estándar IEEE 802.3ba que especifica Ethernet a 40 Gb/s y 100 Gb/s), y del uso de simples puentes ideados para la interconexión de redes con idénticos protocolos a nivel de capas física y de acceso al medio, ha progresado hacia los conmutadores con capacidades de $N \times 10$ Gb/s [1]-[3].

Comprendidos en esta continua evolución que experimentan las redes Ethernet, se encuentran dos aspectos de especial interés y criticidad. El primero, dice relación con el total abandono del medio compartido half-dúplex originario, para dar paso a enlaces dedicados full-dúplex, mientras el segundo aborda su extensión: Ethernet ha evolucionado desde las distancias del rango LAN a las coberturas del rango WAN [4]. Y aun, cuando ambos cambios han sido graduales en el tiempo, son radicales desde el punto de vista de Ethernet, por cuanto en su conjunto significan, por una parte, la desaparición del mecanismo de control de acceso al medio CSMA/CD, y, por otra, suponen un drástico cambio en los medios de transmisión tendiente a la utilización absoluta de fibras ópticas.

Las redes de área local, en general, y Ethernet en particular, nacieron siendo, en esencia, redes de medio compartido de alta capacidad frente a tecnologías de redes WAN basadas en conmutación y con caudales de transmisión inferiores, en general, a los disponibles en las redes LAN. Sin embargo, la evolución de las tecnologías utilizadas tanto en los entornos LAN como WAN, hoy converge en soluciones basadas en Ethernet y sus diversas especificaciones. De esta forma, las actuales redes LAN basadas en Ethernet son conmutadas, están compuestas de enlaces dedicados full-dúplex, incorporan la multiplexación según el estándar IEEE 802.1Q, y soportan distancias de transmisión idénticas a las soportadas por los enlaces WAN convencionales.

Se atribuye en gran parte esta evolución, al alto nivel de desarrollo experimentado por los conmutadores Ethernet, puesto que desde el punto de vista operacional no solo han aumentado su grado de transparencia y simplicidad en sus procesos de puesta en marcha, operación y gestión, sino que ello ha incidido directamente en la incorporación de diversas funcionalidades a la simple conmutación, lo cual, desde el punto de vista del estándar, se traduce hoy en la extensión del formato de la trama Ethernet original, establecida en IEEE 802.3-1985, con la incorporación de etiquetados para VLAN y establecimiento de prioridades para clases de servicio [5]-[7], en el aumento de tamaño de la señal portadora de CSMA/CD, en la incorporación de ráfagas de paquetes para compensar la pérdida de velocidad en las redes ocasionada por los bits de extensión de la portadora, y, final y prioritariamente, en el abandono del esquema de contención y resolución de colisiones regido por el algoritmo de retroceso exponencial binario [8].

Por otra parte, esta tendencia migratoria hacia redes Ethernet sin medio compartido, es confirmada mediante la incorporación en los dispositivos activos, de los estándares IEEE 802.1X, IEEE 802.1w (RSTP; actualmente incorporado en el estándar IEEE 802.1D) e, IEEE 802.1s (MSTP; actualmente en IEEE 802.1Q), todos los cuales establecen como requisito enlaces punto a punto para su operación. Los enlaces dedicados no tan solo son necesarios para obtener las máximas prestaciones de la red, sino que además hacen efectiva la seguridad a nivel de enlace lógico de datos (LLC), simplifican sus protocolos, y posibilitan los mecanismos de convergencia rápida en capa dos, como el empleado por RSTP.

Un ejemplo categórico de todo lo anterior lo constituye el estándar IEEE 802.3ae (Ethernet a 10 Gb/s), el cual, en su especificación, no contempla el uso de enlaces half-dúplex como en IEEE 802.3z (Ethernet a 1000 Mb/s), en cuya especificación se mantuvieron por estrictas razones de compatibilidad con las bases de equipamiento con anterioridad instaladas, respondiendo, como objetivo final, al de servir como plataforma en los actuales procesos de migración o de transición tecnológicas. Cabe en este punto recordar, que se trata de la última de las especificaciones Ethernet en ofrecer esta modalidad de comunicación entre dispositivos.

Resulta de especial atención e interés el hecho de que en las redes Ethernet tradicionales predominasen la difusión y la inundación como mecanismos básicos y válidos al momento de establecer la presencia o la ausencia de estaciones, y, por contraparte, hoy se busca la mínima difusión de las tramas por las mismas dos razones que se evitan en las redes WAN: la degradación del rendimiento y el control de tráfico.

Paralelamente a lo anterior, las redes de mayores coberturas van incorporando tecnologías propias de los entornos LAN debido a su robustez y buena relación precio/prestaciones [9], estando hoy bastante implantadas en entornos tanto metropolitanos como de acceso, y, de forma creciente, en los entornos WAN propiamente tales. Esta tendencia es continua y con perspectivas de seguirlo siendo en el futuro, y ello se produce, principalmente, debido al aumento en el tamaño, la capacidad y complejidad de las redes de campus. De hecho, las actuales funcionalidades de este tipo de redes incluyen: la agregación de enlaces según IEEE 802.3ad para el aumento de la fiabilidad y el ancho de banda, la desagregación y el balance de la carga, la posibilidad de ampliación gradual vía la creación de VLANs y árboles múltiples de expansión por VLANs según el estándar IEEE 802.1s (MSTP; actualmente incorporado en IEEE 802.1Q), la inspección IGMP en capa dos para provisión de transmisiones del tipo multidifusión con acceso y desconexión rápida de clientes y fraccionamiento del ancho de banda para el tráfico intensivo de video únicamente para aquellos clientes que lo solicitan, y otras que hacen más compleja y crítica su gestión y administración [10].

Todos los argumentos anteriores, avalan el replanteamiento de la forma de estudiar las prestaciones del protocolo y mecanismo de control de acceso al medio CSMA/CD, en términos del impacto que su rendimiento provoca en los actuales entornos conmutados, entendiendo el rendimiento como la cantidad de información útil que la red es capaz de transportar, en relación con la cantidad de bits transportados realmente, además de caracterizar la naturaleza del tráfico que es sometido a estudio en términos de un patrón de comportamiento capaz de describir su evolución temporal y sus implicancias directas sobre el rendimiento anteriormente definido. Se considera el parámetro de rendimiento como una forma activa de medir las prestaciones de una red, pues es sin lugar a dudas uno de los aspectos de mayor interés dentro del análisis global de los sistemas de comunicaciones por la repercusión que tiene sobre los usuarios finales. Y, por otra parte, de la caracterización del tráfico que en las redes se cursa, dependerá el comportamiento que este parámetro exhiba en cada caso particular.

De igual forma se justifica un nuevo enfoque para llevar a cabo los procesos de modelado de redes Ethernet, puesto que, en términos de la evolución antes planteada, se infiere que el sucesor natural del estándar IEEE 802.3u (Fast Ethernet), es el estándar IEEE 802.3z (Gigabit Ethernet), el cual deberá ceder su lugar en los entornos de acceso y WAN, a los estándares IEEE 802.3ae (Ethernet a 10 Gb/s) e IEEE 802.3ba (Ethernet 40 Gb/s y 100 Gb/s), respectivamente, y las repercusiones que consigo traerán asociadas estas migraciones tecnológicas, deben ser adecuadamente evaluadas, dimensionadas y categorizadas en términos de su impacto sobre las actuales bases de equipamiento instaladas bajo la óptica definida con anterioridad, antes de su adopción. Se aclara en este punto, que en función de la definición de rendimiento antes planteada, tan solo se pretende entregar una idea intuitiva del aprovechamiento de la capacidad de canal, para posteriormente realizar un estudio en detalle sobre la base de los correspondientes modelos analíticos.

Por otra parte, la aceptación de la existencia de patrones de tráfico autosimilares, se realiza sobre el hecho empírico de que estos se caracterizan por la presencia permanente de ráfagas de tráfico de paquetes a través de diferentes escalas de tiempo y considerando el argumento, de que las propiedades características de todos los procesos autosimilares son la dependencia a corto plazo (SRD) y la dependencia a largo plazo (LRD), las cuales se presentan al aumentar el nivel de agregación [11]. Luego, el comportamiento fractal de este tipo de tráfico no coincide con el comportamiento del tráfico modelado tradicionalmente a través de procesos de Poisson, los cuales se caracterizan por la ausencia de ráfagas y una baja variabilidad reflejada en la independencia temporal entre las muestras. En resumen, se trata de procesos que con toda claridad exhiben dependencia temporal a corto plazo, la cual desprecia toda forma de relación entre procesos temporalmente distantes, es decir, se trata de procesos estocásticos de memoria nula, y no consideran válida la existencia de algún tipo de patrón mínimo representativo de la totalidad del tráfico cursado. Luego, considerando los mismos argumentos, además del hecho de que los fenómenos autosimilares presentan el mismo aspecto o comportamiento cuando se visualizan con distintos grados de ampliación o a distintas escalas de una cierta dimensión, la cual puede ser el espacio o el tiempo, y que el objeto de interés en redes de computadoras son las series temporales y los procesos estocásticos que muestran autosimilaridad con respecto al tiempo, se debe establecer una medida, un grado de autosimilaridad para dichas series, el cual, por definición, se puede expresar usando únicamente un parámetro que representa la rapidez de decrecimiento de la función de autocorrelación, lo cual responde a que una serie de tiempo es autosimilar si la serie agregada tiene la misma función de autocorrelación que la serie original, este parámetro se denomina parámetro de Hurst, H , y puede ser estimado por diversos métodos, siendo el de Whittle el que ofrece el mayor rigor estadístico. Para obtener el estimador de Whittle existen diversos algoritmos, todos los cuales precisan de la forma del proceso estocástico subyacente, y en este trabajo se propone una variante del estimador la cual permite obtener el grado de autosimilaridad bajo una relación aceptable de compromiso entre el coste del modelo computacional, (el mayor inconveniente en la obtención del estimador de Whittle), y la calidad de las estimaciones.

Formalmente, la propuesta consiste en modificar el estimador local de Whittle, o estimador Gaussian semiparamétrico, del parámetro de memoria en procesos estándar a corto plazo [12]. Se esperan obtener las ventajas heredadas de la técnica original, la cual exhibe sus principales atributos como alternativa a la técnica de regresión del logaritmo del periodograma propuesta en [13]. En particular, se espera que bajo supuestos aun menos restrictivos se muestre una forma de ganancia de eficiencia asintótica. Para ello, primero se analiza el comportamiento asintótico del estimador Gaussian semiparamétrico original del parámetro de memoria en procesos de memoria cíclica o estacional permitiendo divergencias o ceros espectrales asimétricos, para luego obtener, por la vía de modificar el algoritmo, la consistencia y la normalidad asintótica necesaria para la caracterización de los flujos.

En este trabajo, se presentan los fundamentos de un proyecto de investigación sobre el modelado de redes de computadoras con mecanismo de control de acceso al medio regido por el estándar IEEE 802.3-2005, empleando postulados de la teoría de conjuntos autosimilares para determinar el nivel de impacto que poseen las correlaciones temporales de largo plazo sobre el rendimiento de tales redes, postulando una nueva forma de estimar los grados de autosimilaridad basada en una variación del estimador de Whittle.

2.- Planteamiento del Problema

El análisis de tráfico basado en teoría de colas, ha resultado ser de enorme utilidad para el diseño de redes y el análisis de sistemas a efectos de realizar planificaciones de capacidades y predicciones de comportamientos [14]. Sin embargo, existen muchos casos del mundo real en los cuales se ha observado que todos los resultados predichos a partir de un análisis de colas difieren significativamente del rendimiento observado en la realidad [15]. En este sentido, se recuerda que la validez de los análisis basados en teoría de colas depende de la naturaleza de Poisson del tráfico de datos. Y, que al tratarse de procesos de Poisson, tanto la representación de la duración de cada arribo como del tiempo entre arribos de tramas sucesivos son representados por variables aleatorias independientes exponencialmente distribuidas. Por lo tanto se trata de modelos de memoria nula, y, siendo este el caso, de modelos en los cuales la probabilidad de llegada en un determinado instante de tiempo, es independiente de los instantes de llegadas anteriores, propiedad que no se cumple en las redes de conmutación de paquetes.

Con respecto al último planteamiento, se reconoce que el objetivo de estas suposiciones responde con rigurosidad a la obtención de modelos relativamente simples desde el punto de vista analítico. No obstante, por ejemplo, la variabilidad del tráfico multimedia coloca bajo fuertes cuestionamientos la validez de los modelos tradicionales, y en concreto, las hipótesis de independencia sobre las cuales son planteados [16], [17].

A partir de los resultados obtenidos en [18], la existencia de la dependencia temporal es objeto de estudio por parte de numerosos autores, destacando el descubrimiento del enorme impacto que puede llegar a tener sobre las prestaciones de un sistema de colas y, a la luz de este hecho existe abundante literatura sobre modelos de tráfico de entrada que exhiben estructuras de correlación más o menos complejas, aplicadas a casos en los cuales los modelos de los sistemas de comunicaciones bajo estudio permiten mantener un trato analítico adecuado. Pero en cualquier caso, estos modelos, fundamentalmente markovianos, desprecian la correlación a partir de una determinada separación temporal, aun cuando esta pueda ser arbitrariamente aumentada a costa de complicar el modelo con parámetros adicionales. Se informa a continuación un conjunto de resultados relevantes, referentes sin parangón de lo planteado.

En [19], [20] se demuestra que tras exhaustivas mediciones sobre una red Ethernet, el tráfico, entendido como el número de tramas en la red por unidad de tiempo, presenta naturaleza autosimilar o fractal, lo cual pone al descubierto la existencia de una acusada correlación a largo plazo.

En [21], [22] se demuestra el carácter autosimilar del tráfico en redes WAN, mientras que en [23] se coloca de manifiesto la naturaleza fractal del flujo de los datos de los protocolos que componen el sistema de señalización número 7 (SS7) en redes de señalización de canal común, en [24] se demuestra la naturaleza autosimilar del tráfico debido al WWW, y en [25], [26], en el tráfico de video de tasa variable (VBR).

Desde otros ámbitos, en [27] se demuestra que la distribución de probabilidad que sigue el tamaño de la cola de un multiplexor, exhibe una caída asintótica del tipo Weibull al utilizar como tráfico de entrada cierto tipo de procesos autosimilares, y en [28] que esta caída es aún más lenta y de tipo hiperbólico utilizando otros procesos autosimilares.

En [29] se demuestra que el ancho de banda efectivo calculado sobre la base de modelos de Markov en los cuales la distribución del tamaño de la cola presenta una caída exponencial, subestima con creces la tasa de pérdida de celdas en varios órdenes de magnitud.

En el análisis de un multiplexor de voz y datos, expuesto en [30] se demuestra una excepcional correlación positiva a largo plazo en el tráfico agregado, obteniendo unos retardos muy superiores a los predichos con modelos de Poisson.

Finalmente, en [31] se demuestra que el número de llegadas en intervalos de tiempo adyacentes, resultante de la superposición de múltiples fuentes de voz independientes, homogéneas y susceptibles de ser tratadas mediante modelos de procesos de renovación, es un proceso complejo con fuertes correlaciones, que posee un impacto significativo sobre las prestaciones del sistema de comunicaciones bajo estudio.

En todos los casos, lo interesante de estos y otros muchos estudios es que ponen de relieve el impacto que la dependencia temporal a largo plazo, intrínseca a los más diversos tipos de tráfico, puede llegar a tener sobre las prestaciones de las redes de comunicaciones, frente a otros modelos que no presentan correlación temporal alguna por simplicidad analítica (como los procesos de renovación), o exhiben una estructura de correlación más complicada analíticamente (como los modelos de Markov o autorregresivos habituales), que pueden ser denominados como modelos a corto plazo (SRD). Además, el principal inconveniente que presenta la totalidad de los modelos tradicionales, es el que requieren un número muy elevado de parámetros para modelar las fuertes correlaciones que existen entre los diferentes tipos de tráficos en una red. Y, por supuesto que en medida que el número de parámetros aumenta, la complejidad analítica crece desmesuradamente, aparte de la dificultad añadida de dar una interpretación física a todos los parámetros y estimarlos adecuadamente a partir de datos empíricos.

En pocas palabras, las características de autosimilaridad y fractalidad describen un fenómeno en el que una cierta propiedad de un objeto se preserva con respecto al escalamiento temporal o espacial y en un objeto autosimilar o fractal, sus partes magnificadas se asemejan a la forma del objeto completo, donde la semejanza se mide en algún sentido adecuado. Luego mediante la iteración de un cierto procedimiento, es posible obtener, por simple reconstrucción, la forma más sencilla de autosimilitud. Si el procedimiento se repite indefinidamente para cada nuevo segmento, cualquier porción del objeto, por más pequeña que esta sea, puede ser magnificada para reproducir exactamente una porción mayor. A esta propiedad se la conoce con el nombre de "autosimilitud exacta". Luego, no se pretende observar en un proceso altamente aleatorio como el de las llegadas de paquetes a una red de datos, características autosimilares exactas, pero si se considera el tráfico observado como una traza de muestras perteneciente a algún proceso estocástico, y restringe la similitud a ciertas estadísticas de las series temporales ajustadas en escala, se descubre autosimilitud exacta en los objetos matemáticos abstractos y una autosimilitud aproximada para cada una de las realizaciones específicas.

Aclarado lo anterior, no se espera, bajo ningún punto de vista, que las redes de computadoras bajo estudio exhiban comportamientos con características autosimilares exactas, pues ese supuesto sería tan o más atentatorio contra los intereses del trabajo como seguir con modelos tradicionales, sino que se esperan comportamientos

del tipo autosimilares estocásticos y, en este respecto, para medir este tipo de autosimilitud, pueden ser utilizadas las estadísticas de segundo orden que capturan la variabilidad de los procesos. De hecho, la invariancia a la escala puede ser definida en términos de la función de autocorrelación, pues el decrecimiento polinómico (en lugar del exponencial) de esta función, es la manifestación de la dependencia de largo plazo, y es equivalente a la autosimilaridad, y que constituye la óptica bajo la cual deben ser interpretados los procesos autosimilares en el desarrollo de la investigación.

Por otra parte, con respecto al problema fundamental inherente al análisis de procesos autosimilares, o más concretamente de series temporales que exhiben LRD, es decir, el de la estimación del grado de autosimilaridad, o parámetro de Hurst, los métodos propuestos en la literatura pueden clasificarse en dos grandes grupos, a saber:

1.- Métodos gráficos de regresión lineal, en los cuales se calcula algún estadístico $T(x)$ que se comporta asintóticamente para un determinado conjunto de valores de x , y por lo tanto, están basados en obtener, por medio de regresión lineal de mínimos cuadrados, la recta que mejor se ajuste (para dicho conjunto de valores de x) a la representación de $\log(T(x))$ frente a $\log(x)$, obteniéndose así el valor del parámetro de Hurst (H) directamente a partir del valor de la pendiente de dicha recta.

2.- Métodos basados en estimadores de máxima verosimilitud (MLE) para H , que intentan minimizar las diferencias entre el periodograma de la serie y su espectro teórico.

Al respecto cabe señalar que los métodos del primer grupo son relativamente sencillos y rápidos algorítmicamente de implementar, sin embargo su principal inconveniente reside en que primero debe estimarse un comportamiento asintótico a partir de un número finito de muestras, lo que hace que la estimación del parámetro H dependa considerablemente de la correcta elección del conjunto de valores de x . Por tal motivo, son fundamentales las representaciones gráficas para, por una parte, verificar que el conjunto elegido de valores de x se corresponda con la zona de comportamiento lineal, y por otra, para comprobar que la recta es un buen ajuste de los puntos representados. Así mismo es importante destacar que estos métodos sólo permiten obtener una estimación puntual del parámetro H , ya que la obtención de intervalos de confianza trae aparejado un alto coste de recursos computacionales y tiempos de procesamiento. No obstante, son completamente válidos para detectar la presencia de LRD y crearse una idea de su magnitud. Este grupo da cabida a todos los métodos basados en el análisis temporal de las series agregadas, y al método basado en la regresión lineal sobre el periodograma. Por el contrario, los métodos basados en estimadores de máxima verosimilitud aun cuando sean más complejos y supongan un coste computacional considerablemente mayor, son bastante más flexibles y eficientes desde el punto de vista de la inferencia estadística, ya que permiten obtener intervalos de confianza para los valores estimados de H . Por esta razón son los métodos habitualmente más utilizados.

Luego, para el caso puntual de esta investigación se tratará con métodos basados en MLE, a partir de los cuales se resolverán los intervalos de confianza para llegar a las primeras aproximaciones de un valor para H , el cual luego será ajustado empleando el método propuesto. No obstante, los métodos que pertenecen primer grupo serán detenidamente analizados y los resultados que con ellos se obtengan, serán contrastados con los obtenidos mediante MLE y

el ajuste que propone el método propuesto. Luego, por cuanto el análisis comienza empleando MLE, es necesario recordar que se trata de métodos que se emplean para minimizar las diferencias entre el periodograma de la serie y el modelo paramétrico supuesto para su densidad espectral teórica. Además, el cálculo exacto de MLE es computacionalmente costoso, por lo que habitualmente son empleadas las funciones de verosimilitud gaussianas (en adelante, MLE gaussianos). Sin embargo, incluso en este caso, el coste computacional es elevado, por lo que en la práctica se utilizan aproximaciones basadas en dichos MLE gaussianos. Un punto trascendental es que la aproximación más ampliamente usada es la de Whittle, y en ella se basa el método propuesto.

3.- Variantes del Estimador de Whittle

Sea $f(\lambda, \theta)$ la forma paramétrica de la densidad espectral de un proceso estacionario gaussiano X_t , donde $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_M)$, es el vector de parámetros que se desea estimar.

Sea el periodograma de muestras $I(\lambda)$ definido por

$$I(\lambda) = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{t=1}^N X_t e^{j\lambda t} \right|^2 \quad (1)$$

El MLE aproximado de Whittle es el vector dado por la expresión siguiente

$$\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_M) \quad (2)$$

que minimiza la función

$$Q(\theta) \triangleq \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{-\pi}^{\pi} \frac{I(\lambda)}{f(\lambda, \theta)} d\lambda + \int_{-\pi}^{\pi} \log[f(\lambda, \theta)] d\lambda \right\} \quad (3)$$

En la práctica, el cálculo del estimador de Whittle se realiza eligiendo un parámetro de escala adecuado, θ_1 , tal que

$$f(\lambda, \theta) = \theta_1 f(\lambda, \theta^*) = \theta_1 f^*(\lambda, \eta) \quad (4)$$

de forma que anule el segundo sumando de (2), es decir

$$\int_{-\pi}^{\pi} \log[f(\lambda, \theta^*)] d\lambda + \int_{-\pi}^{\pi} \log[f^*(\lambda, \eta)] d\lambda = 0 \quad (5)$$

donde $\eta = (\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_M)$ y $\theta^* = (1, \eta)$

La versión discreta del estimador de Whittle aproxima a (3) mediante una suma de Riemann en el rango de frecuencias dado por

$$\lambda_k = \frac{2\pi}{N} k \quad (6)$$

donde $k = 1, 2, \dots, N^*$ (N^* es la parte entera de $(N-1)/2$)

con lo cual, la función a minimizar es la siguiente

$$\tilde{Q}(\theta_1, H) = \frac{4\pi}{N} \left[\sum_{k=1}^{N^*} \frac{I(\lambda_k)}{f(\lambda_k, \theta_1, H)} + \sum_{k=1}^{N^*} \log[f(\lambda_k, \theta_1, H)] \right] \quad (7)$$

Luego, con la elección del parámetro de escala adecuado se obtiene el parámetro H estimado, \hat{H} , valor que minimiza la expresión

$$\tilde{Q}^*(H) = \tilde{Q}(1, H) = \sum_{k=1}^{N^*} \frac{I(\lambda_k)}{f(\lambda_k, 1, H)} = \sum_{k=1}^{N^*} \frac{I(\lambda_k)}{f^*(\lambda_k, H)} \quad (8)$$

Resulta de interés el hecho de que este teorema permite suponer que para una serie temporal de tamaño N , que presenta una función de autocorrelación que exhibe caída hiperbólica con LRD, si m y N/m son lo suficientemente grandes y la varianza es finita, el proceso FGN es una buena aproximación para las secuencias agregadas de la serie, incluso en el caso de que esta no sea gaussiana.

En todo lo anterior se basa la modificación del estimador de Whittle conocida como estimador de Whittle agregado, la cual provee una forma de hacer más robusto y menos sesgado el estimador de Whittle cuando no se dispone de información acerca de la forma paramétrica exacta de la densidad espectral. Este método puede ser usado si la serie es lo suficientemente larga. Para ello se agregan los datos para la obtención de una serie más corta $X_k^{(m)}$. Luego,

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=km}^{(k+1)m-1} X_i \quad 0 \leq k \leq [N/m] \quad (9)$$

Otra visión propone el estimador local de Whittle, que a diferencia del estimador de Whittle, es un estimador semiparamétrico, puesto que sólo especifica la forma paramétrica de la densidad espectral para frecuencias próximas a cero, es decir,

$$f(\lambda) \sim G|\lambda|^{1-2H} \quad (10)$$

cuando $\lambda \rightarrow 0$

Este método comparte características de otros estimadores basados en periodogramas. De hecho, sólo supone la forma del espectro para frecuencias próximas a cero, e implica minimizar una versión modificada de la función $Q(H)$ de (2).

Sustituyendo en (2) $f(\lambda, H)$ por (12), e integrando sólo hasta la frecuencia $2\pi M/N$, donde $1/M + M/N \rightarrow 0$ cuando $N \rightarrow \infty$, se obtiene que

$$Q(G, H) \triangleq \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left(\frac{I(\lambda_j)}{G\lambda_j^{1-2H}} + \log(G\lambda_j^{1-2H}) \right) \quad (11)$$

reemplazando la constante G por su estimación, dada por

$$\hat{G} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{I(\lambda_j)}{\lambda_j^{1-2H}} \quad (12)$$

se obtiene la función a minimizar, es decir,

$$R(H) \triangleq Q(\hat{G}, H) - 1 \quad (13)$$

$$R(H) \triangleq \log \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{I(\lambda_j)}{\lambda_j^{1-2H}} \right) - (2H-1) \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \log(\lambda_j) \quad (14)$$

4.- Propuesta de un Estimador Eficiente

Todas las variantes del estimador de Whittle expuestas requieren la minimización de una expresión, dada por (8) o (14). La forma más obvia de realizar tales minimizaciones consiste en evaluar dichas expresiones para un cierto número de valores de H equidistantes, q , que dependerá de la resolución deseada. Sin embargo, puede observarse que basta un número de muestras moderadamente elevado para que el algoritmo se traduzca en un coste computacional muy elevado. Para reducir este coste, se propone una minimización por medio de un algoritmo que reduzca el número de puntos a evaluar. Para ello se aprovechará el hecho de que la función a minimizar es convexa en todo el dominio $[0.5, 1[$ y por lo tanto mínimo es único. Así, un método de búsqueda por bisección, aplicado sobre la derivada de la función, deberá permitir que el número de puntos evaluados este sólo en torno a $\log_2(q)$. Considerando el supuesto de que el cálculo de la derivada en un punto H_i puede ser aproximado por un coeficiente de diferencias para un incremento suficientemente pequeño, h , es decir:

$$Q'(H_i) \approx \frac{Q(H_i + h) - Q(H_i)}{h} \quad (15)$$

para $h \rightarrow 0$.

se deriva el hecho de que la principal hipótesis de trabajo dice relación con establecer un grado de autosimilitud basado en el estimador de Whittle, sin embargo, por las complicaciones que presenta el compromiso entre el sesgo y la varianza que subyace a todos los modelos, se plantea que en un espectro reducido de puntos es posible entregar una respuesta con un buen nivel de compromiso. Para la obtención de intervalos de confianza, partiendo del supuesto de que de que la función a minimizar es convexa en todo el dominio $[0.5, 1[$, lo cual trae aparejado la existencia de un único mínimo, se tendrá en cuenta que en el caso de estimar un único parámetro H , si \hat{H} es el valor que minimiza la función $Q(H)$ y H_0 es su valor real, entonces,

$$(\hat{H} - H_0) \rightarrow N(0, \sigma_H) \quad (16)$$

donde el parámetro σ_H está definido por:

$$\sigma_H^2 = \frac{4\pi}{N} \left\{ \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{\partial \log[f(\lambda, H)]}{\partial H} \right]^2 d\lambda \right\}_{H=H_0}^{-1} \quad (17)$$

Luego, el cálculo de la derivada dada por (15) puede, de igual manera, ser aproximado por medio de un coeficiente de diferencias para un incremento suficientemente pequeño, h . Así

$$\sigma_H^2 = \left\{ \sum_{k=1}^{N^*} \left[\frac{\partial \log[f(\lambda_k, \theta_1, H)]}{\partial H} \right]^2 \right\}_{H=\hat{H}}^{-1} \quad (18)$$

donde finalmente se verifica que,

$$\sigma_H^2 = \left\{ \sum_{k=1}^{N^*} \left[\frac{\log[f(\lambda_k, \theta_1, \hat{H} + h)] - \log[f(\lambda_k, \theta_1, \hat{H})]}{\partial H} \right]^2 \right\}^{-1} \quad (19)$$

5.- Conclusiones

Los modelos tradicionales basados en procesos de Poisson, o de manera más general, en procesos de dependencia a corto plazo son incapaces de describir el comportamiento de las actuales redes de datos, en particular el caso de las redes Ethernet conmutadas según el estándar IEEE 802.3-2005. Consecuentemente, es necesario un replanteamiento del estudio de los sistemas de carga, considerando procesos de entrada autosimilares, producto de que la demanda de tráfico autosimilar impone nuevos requerimientos en el diseño de las redes, en especial en lo que a estrategias de buffering se refiere.

Todos los métodos tradicionalmente empleados para valorizar el estimador de Whittle presentan las desventajas de la necesidad de conocer la forma paramétrica de la densidad espectral, y un alto coste computacional derivado de la aplicación intensiva de métodos gráficos. Se estima que estos inconvenientes pueden ser salvados en la medida en que pueda ser factible introducir un algoritmo que reduzca el número de puntos a evaluar. Esto no tan solo es sinónimo de un menor coste de procesamiento computacional, sino que permitiría una nueva alternativa para ser considerada en el estudio que sobre las prestaciones de una red, tiene la consideración de tráfico con características autosimilares o fractales.

Se propone que una función para realizar la minimización de la función generatriz del estimador de Whittle que sea convexa en un dominio acotado, presenta la ventaja de tener un solo mínimo, completamente individualizable, y por lo tanto con la aplicación de un método de búsqueda por bisección aplicado sobre la derivada de la función debería permitir determinar un punto en torno al cual fluctúen todos los valores. Y esto es en definitivas, contar con una región plana en la cual el valor del parámetro H , sea perfectamente aproximado por un coeficiente de diferencias.

Para el desarrollo de las simulaciones se está trabajando en la búsqueda primeramente de literatura que exponga de forma clara técnicas de simulación y análisis estadísticos para series con dependencia a largo plazo. Pues se considera que no basta con inducir resultados a partir de agregaciones, sino que debe existir una formalización de los procedimientos para estudiar concretamente dependencias a largo plazo. Esta es un área que requiere atención urgente, pues de ella depende en gran medida el costo operacional en materia de capacidad computacional.

Referencias Bibliográficas

- [1] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [2] P802.3ba 40 Gb/s and 100 Gb/s Ethernet Task Force, IEEE Std.802.3ba, 2007.
- [3] G. Millán, H. Kaschel, and G. Lefranc, "Discussion of the analysis of self-similar teletraffic with long-range dependence (LRD) at the network layer level", *International Journal of Computer Communications & Control*, vol. V, no. 5, pp. 799-812.
- [4] G. Millán, E. San Juan, and M. Vargas, "A simplified multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks", *Computación y Sistemas*, vol. 23, no. 4, pp. 157-1521, 2019.
- [5] G. Millán, "Modelado de tráfico basado en procesos multifractales asociativos", Ph.D. dissertation, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile, 2013.
- [6] G. Millán and G. Lefranc, "A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks", *Procedia Computer Science*, vol. 17, pp. 420-425.
- [7] G. Millán, R. Osorio-Comparán, and G. Lefranc, "Preliminaries on the acirate estimation of the Hurst exponent using time series". arXiv preprint, arXiv: 2103.02091, 2021.
- [8] G. Ibáñez, "Contribución al diseño de redes de campus ethernet autoconfigurables", Ph.D. thesis, Dept. Ingeniería Telemática, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2005.
- [9] G. Ibáñez, "Contribución al diseño de redes de campus ethernet autoconfigurables", Ph.D. thesis, Dept. Ing. Telemática, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2005.
- [10] *IEEE standard for information technology, telecommunications and information Exchange between systemslocal and metropolitan area networks*, IEEE Std. 802.3, 1985.
- [11] *IEEE standard for local and metropolitana area networks*, IEEE Std. 802.1Q, 2005.
- [12] J. García, S. Ferrando, and M. Piattini, "Redes para proceso distribuido", Madrid, Ra-Ma, 1997, pp. 127-160.
- [13] C. Zacker, "Redes. Manual de referencia", Madrid, McGraw-Hill, 2002, pp. 275-341.
- [14] S. Halabi, "Metro Ethernet. The definitive guide to Enterprise and carrier metro Ethernet applications". Indianapolis, Cisco Press, pp. 1.
- [15] G. Ibáñez, "Contribución al diseño de redes de campus Ethernet autoconfigurables", Ph.D. thesis, Dept. Ing. Telemática, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2005.
- [16] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic", *IEEE Trans. Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [17] P. M. Robinson, "Gaussian semiparametric estimation of long-range dependence", *Ann. Statistics*, Vol. 3, no 1995b, pp. 1630-1661, 1995.
- [18] J. Geweke, and S. Porter-Hudak, "The estimation and application of long memory time series models". *J. Timer Ser. Anal.* 4, 1983, pp. 221-238.
- [19] W. Stallings, "Internet y redes de alta velocidad. Rendimiento y calidad de servicio". 2nd ed., Madrid, Pearson Prentice Hall, 2004, pp. 224-225.
- [20] W. Stallings, "Internet y redes de alta velocidad. Rendimiento y calidad de servicio". 2nd ed., Madrid, Pearson Prentice Hall, 2004, pp. 224-225.
- [21] K. W. Fendick, V. R. Saksena, and W. Whitt, "Dependence in packet queues". *IEEE Trans. Communications*, vol.37, no.4, pp. 1173-1183, April 1989.
- [22] D. P. Heyman, and T. V. Lakshman, "Source models for VBR broadcast-video traffic", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 4, no. 1, pp. 40-48, Feb. 1996.
- [23] L. Kleinrock, "Communication Nets", New York, McGraw-Hill, 1972.
- [24] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic", *Computer Communications Review*, vol. 23, pp. 183-193, 1993.
- [25] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version)", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [26] V. Paxson, and D. Wilson, "Wide-area traffic: The failure of Poisson modeling", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 3, no. 1, pp. 266-244, June. 1995.
- [27] S. Klivansky, S. Mukherjee, and C. Song, "Factor contributing to self-similarity over NFSNet", Georgia Institute of Technology, 1994.
- [28] D. E. Duffy, A. A. Mcintosh, M. Rosenstein, and W. Willinger, Statistical analysis of CCSN/SS7 traffic data from working CCS subnetworks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, pp. 544-551, 1994.
- [29] M. E. Crovella, and A. Bestavros, "Self-similarity in world wide web traffic: evidence and possible causes", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 5, no. 6, pp. 835-846, Dec. 1997.
- [30] M. W. Garret, and W. Willinger, "Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic", *Proc. ACM SIGCOMM'94*, pp. 269-280, London, 1994.
- [31] G. Millán, E. San Juan, and M. Jamett, "A simple estimator of the Hurst exponent for self-similar traffic flows", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 8, pp. 1349-1354.

- [32] J. Beran, R. Sherman, M. S. Taqqu, and W. Willinger, "Long-range dependence in variable-bit-rate video traffic", *IEEE Trans. Communications*, vol. 24, no. 2, pp.1566-1579, 1995.
- [33] G. Millán, "On the Hurst exponent, Markov processes, and fractional Brownian motion," arXiv:2103.05019 [eess.SP], 2021.
- [34] N. Likhanov, B. Tsybakov, and N. D. Georganas, Analysis of an ATM buffer with self-similar ("fractal") input traffic", *Proc. IEEE INFOCOM'95*, pp. 985-992, Boston, MA, April 1995.
- [35] A. I. Elwaid, and D. Mitra, "Effective bandwidth of general markovian traffic sources and admission control of high-speed networks", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 3, pp. 329-343, Jun. 1993.
- [36] 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, pp. 833-846, 1986.
- [37] H. heffes, and D. M. Lucantoni, A Markov modulated characterization of packetized voice and data traffic and related statistical multiplexer performance", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 4, no. 6, pp. 856-868, Sep. 1986.