

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Impacto de la Dependencia de Rango Largo en el QoS del Tráfico de Video

Jaime Alberto Sepúlveda Gómez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y
Computación
Manizales, Colombia
Año 2017

Impacto de la Dependencia de Rango Largo en el QoS del Tráfico de Video

Jaime Alberto Sepúlveda Gómez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Automatización Industrial

Director: PhD. Luis Fernando Díaz Cadavid

Línea de Investigación:

Grupo de Investigación:

GTT

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y
Computación

Manizales, Colombia

Año 2017

Dedico este trabajo a toda mi familia que son el pilar de mi existencia, en especial a mi esposa Vanessa y mi hijo Emmanuel que son ellos los que me motivan cada día a avanzar.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todos aquellos que de una u otra forma me colaboraron en el desarrollo de este proyecto, en especial a mi director de tesis Luis Fdo. Díaz Cadavid por su gran interés y dedicación a su labor sin la que no hubiera podido llevar este proyecto a buen término.

Resumen

El siguiente documento presenta una propuesta de investigación en el área del tráfico de video y pretende hacer un aporte a los estudios que se están desarrollando sobre este tema en las redes modernas y la capacidad de algunos modelos para representarlo de forma satisfactoria. En este documento se abordan en concreto simulaciones de trazas de video sobre una red moderna, se estiman los parámetros que este tráfico presenta, y se efectúan mediciones de sus características particulares de autosimilaridad, las cuales son introducidas por los codificadores de video y que no son detectadas por los modelos tradicionales. Finalmente se propone una metodología para abordar esta problemática con fuentes de video sintéticas

Palabras clave: Tráfico autosimilar, trazas de video, fuentes sintéticas, MMPP, Fractional Brownian Motion.

Abstract

Impact of the Long Range Dependence on the Video Traffic QoS

This document presents a research proposal in the area of video traffic and aims to make a contribution to the studies that are being developed on this subject in modern networks and the ability of some models to represent it in a satisfactory manner. In this document, simulations of video traces on a modern network are specifically addressed, the parameters that this traffic presents are estimated, and measurements are made of their particular characteristics of self-similarity, which are introduced by the video encoders and which are not detected by traditional models. Finally, a methodology is proposed to address this problem with synthetic video sources.

Keywords: self-similarity traffic, video traces, synthetics video sources, MMPP, Fractional Brownian Motion.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción	1
Antecedentes y estado del Arte	2
Planteamiento del Problema	4
Hipótesis de Solución	4
Contribución de la Tesis	5
1. Introducción al Análisis de Tráfico de video	7
1.1 Generación del video digital.....	7
1.2 Naturaleza del Tráfico de Video.....	11
1.3 La Autosimilaridad y la Dependencia de Rango Largo.....	12
1.4 Métodos de Análisis de Tráfico de Video.	14
2. Estimación de parámetros estadísticos de las Trazas de Video	17
2.1 Tamaño de la Trama.....	17
2.2 Autocorrelación.....	18
2.3 Test de Varianza Tiempo.....	18
2.4 Estadístico R/S (Rescaled Adjusted Range Statistics).....	20
2.5 Método gráfico de estimación de densidad espectral (Análisis de Periodogramas).....	22
2.6 Calidad de tramas de video.	23
3. Análisis de Dependencia de Rango Largo	26
3.1 Fuentes sintéticas de video.....	27
3.1.1 Modelos no Correlacionados.....	27
3.1.2 Modelos Correlacionados.....	27

3.2	Generación de fuentes en Matlab.....	28
3.2.1	Algoritmo de MMPP:	28
3.2.2	Algoritmo FBM:	29
3.3	Resultados de análisis de LRD de trazas reales.....	30
3.3.1	Análisis de dependencia de Rango Largo para Star Wars IV.....	31
3.3.2	Análisis de dependencia de Rango Largo para Silence of The Lambs.....	35
3.4	Análisis de LRD de trazas sintéticas.....	38
3.4.1	Análisis de LRD de trazas sintéticas MMPP.	38
3.4.2	Análisis de LRD de trazas sintéticas FBM.....	40
4.	Estimación de Parámetros de Calidad de Servicio.....	43
4.1	Métricas de Calidad de Servicio.	44
4.2	Determinación de Delay, PDV y PLR para traza real y las trazas sintéticas en NS2.	49
5.	Análisis de Resultados, Conclusiones y recomendaciones.....	51
5.1	Análisis de Resultados.	51
5.1.1	Resultados las simulaciones con la traza real Silence of The Lambs.....	51
5.1.2	Contraste de resultados de las Simulaciones con trazas sintéticas MMPP y FBM de Silence of The Lambs.....	58
6.	Conclusiones y recomendaciones	59
6.1	Conclusiones.....	59
6.2	Recomendaciones.....	60
	Bibliografía	63

Lista de figuras

	Pág.
Fig. 1. Relaciones en un Sistema de Telecomunicaciones.....	3
Fig. 2. Concepto de captura de movimiento en una cinta.....	5
Fig. 3. Visualización de imágenes individuales.....	6
Fig.4. Formato de video digital para TV.	7
Fig. 5. YUV 4:4:4 sin sub muestreo para 4 pixeles.....	7
Fig. 6. Jerarquía de Video.....	8
Fig. 7. Relación ente CBR y VBR con el ancho de banda y la distorsión.....	9
Fig. 8. Modelos Autosimilares de Cantor.....	10
Fig. 9. Autosimilaridad Estocástica.....	11
Fig. 10. Gráfica de varianza - tiempo.....	17
Fig. 11. Gráfica de estimador R/S.....	19
Fig. 12. Gráfica de periodogramas.....	21
Fig. 13. Metodología propuesta.....	24
Fig. 14 Simulación de estadísticos en sala de micros.....	28
Fig. 15, Gráfica de estadístico R/S, periodogramas y varianza tiempo para la traza Star Wars IVSingle LayerG16B1QP=1y nivel de agregación $\alpha=1$, $\alpha=16$.....	31
Fig. 16. Gráfica de estadístico R/S, periodogramas y varianza tiempo para la traza Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1y nivel de agregación $\alpha=1$.....	33
Fig. 17. Datos generados por generador MMPP para tamaño de paquetes.....	35
Fig. 18. Gráfica del estadístico R/S para los paquetes generados por MMPP para $\alpha=1$.....	36
Fig. 19. Datos generados por generador FBM para tamaño de paquetes.....	37
Fig. 20. Gráfica del estadístico R/S para los paquetes generados por FBM para $\alpha=1$.....	38
Fig. 21. Interfaz gráfica de NS2, NAM.....	39
Fig. 22. Topología de la red implementada en NS2.....	42
Fig. 23. Formato del archivo out.tr	43
Fig. 24. Simulación en proceso.....	46
Fig. 25. Histogramas de PDV's del nodo 5 de la red implementada en NS2 en la simulación 1 para la traza real Silence of the Lambs.....	49
Fig. 26. Histograma de PDVs del nodo 3 de la red implementada en NS2 en la simulación 1 para la traza real Silence of the Lambs.....	50
Fig. 27. Histogramas de PDV's del nodo 5 de la red implementada en NS2 en la simulación 2 para la traza real Silence of the Lambs.	51
Fig. 28. Histograma de PDVs del nodo 3 de la red implementada en NS2 en la simulación 2 para la traza real Silence of the Lambs	52
Fig. 29. Histogramas de PDV's del nodo 5 de la red implementada en NS2 en la simulación 3 para la traza real Silence of the Lambs.....	53
Fig. 30. Histograma de PDVs del nodo 3 de la red implementada en NS2 en la simulación 3 para la traza real Silence of the Lambs.....	53

Fig. 31. Histogramas de PDV's del nodo 5 de la red implementada en NS2 en la simulación 4 para la traza real Silence of the Lambs.....	54
Fig. 32. Histograma de PDVs del nodo 3 de la red implementada en NS2 en la simulación 4 para la traza real Silence of the Lambs.....	54

Lista de tablas

	Pág.
<u>Tabla 1. Estructura de una traza.....</u>	<u>31</u>
<u>Tabla 2. Resultados de simulación estadístico R/S, periodogramas y varianza tiempo para la traza Traza Star Wars Star Wars IV Single Layer G16B1 QP=1.....</u>	<u>32</u>
<u>Tabla 3. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de la traza Star Wars Star Wars IV Single Layer G16B1 QP=1 con el estadístico R/S.....</u>	<u>34</u>
<u>Tabla 4. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de la traza Star Wars Star Wars IV Single Layer G16B1 QP=1 con el estadístico Periodogramas.....</u>	<u>34</u>
<u>Tabla 5. Resultados de simulación estadístico R/S, periodogramas y varianza tiempo para la traza Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1.....</u>	<u>35</u>
<u>Tabla 6. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de la traza Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1 con el estadístico R/S.....</u>	<u>37</u>
<u>Tabla 7. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de la traza Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1 con el estadístico Periodogramas.....</u>	<u>37</u>
<u>Tabla 8. Resultados de simulación estadístico R/S para los paquetes generados por MMPP.....</u>	<u>39</u>
<u>Tabla 9. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de los datos generados por MMPP con el estadístico R/S.....</u>	<u>39</u>
<u>Tabla 10. Resultados de simulación estadístico R/S para los paquetes generados por FBM</u>	<u>41</u>
<u>Tabla 11. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de los datos generados por FBM con el estadístico R/S.....</u>	<u>42</u>
<u>Tabla 12. Contraste de resultados de las Simulaciones con trazas sintéticas MMPP y FBM de Silence of The Lambs para el nodo 5.....</u>	<u>58</u>
<u>Tabla 13. Contraste de resultados de las Simulaciones con trazas sintéticas MMPP y FBM de Silence of The Lambs para el nodo 3.....</u>	<u>58</u>

Lista de Símbolos y abreviaturas

algunos ejemplos.

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A			
P_B	Probabilidad de Bloqueo		$\frac{A^N / N!}{\sum_{n=0}^N A^n / n!}$
\bar{X}	Media Aritmética		$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n$
S_X^2	Varianza muestral		$\frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (X_n - \bar{X})^2$
$CoVx$	coeficiente de variación de la trama		$\frac{S_x}{\bar{X}}$
X_{max}	Máximo tamaño de trama		$\max_{0 \leq n \leq N-1} X_n$
$X_n^{(a)}$	Tamaño de trama agregado		$\frac{1}{a} \sum_{j=na}^{(n+1)a-1} X_j$
Y_m	Traza de tamaño de GoP		$\sum_{n=mG}^{(m+1)G-1} X_n$
$\frac{R(n)}{S(n)}$	Rango Ajustado Reajustado		$\frac{\max_{1 \leq j \leq n} \Delta_j - \min_{1 \leq j \leq n} \Delta_j}{\frac{1}{n-1} \sum_{j=0}^n (X_j - \bar{X})^2}$
$I_N(\omega)$	periodograma (o "función de intensidad")		$\frac{1}{N} \left \sum_{j=1}^n X_j e^{ij\omega} \right ^2$

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
M_n	error cuadrático medio (MSE)		$\frac{1}{D_x \cdot D_y} \sum_{x=1}^{D_x} \sum_{y=1}^{D_y} [I(n, x, y) - \tilde{I}(n, x, y)]^2$
$B_H(t)$	Fractional Brownian Motion	Xt^H	$(t > 0: 0.5 \leq H < 1)$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\rho_x(k)$	Coefficiente de Autocorrelación		$\frac{1}{N-k} \sum_{n=0}^{N-k-1} \frac{(X_n - \bar{X})(X_{n+k} - \bar{X})}{S_X^2}$
$\gamma(k)$	Autocovarianza		$\frac{\sigma^2}{2} ((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}) \forall k > 0$

Subíndices

Subíndice	Término
Bm	Materia orgánica
DR	Dubinin-Radushkevich
E	Experimental

Superíndices

Superíndice	Término
N	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
TVoIP	Televisión sobre IP
NGN	Red de Nueva Generación
POTS	Plain Old Telephone Service , servicios Telefónicos Ordinarios
IP	Internet Protocol
QoS	Quality of service
MMPP	Proceso de Poisson Markovianamente Modelado
VBR	tasa variable de bits
LRD	Long Range Dependence
SRD	Short Range Dependence

Abreviatura Término

Fps	imágenes por segundo
NTSC	National Television Standards Committee
PAL	Phase Alternating Line
GoP	Grupo de Imágenes
HFC	Redes Híbridas de Fibra y Cobre
LTE	Long Term Evolution
CBR	Constant Bit Rate
VBR	Variable Bit Rate
H	Parámetro de Hurst
MLE	maximum likelihood estimation
NS2	Network Simulator
PLR	Packet Loss Ratio
PDV	Packet Delay Variation
P_r	Paquetes recibidos
P_p	Paquetes perdidos

Introducción

LAS redes de comunicaciones modernas han cambiado por completo la concepción de los servicios que prestan las actuales empresas de telecomunicaciones (TELCOS), este cambio se ha dado en gran parte por la evolución de las técnicas de comunicación y de las tecnologías que constituyen la infraestructura de estas empresas. Las primeras redes que se desarrollaron para el transporte de datos, fueron concebidas sin mayores requerimientos de capacidad y calidad de servicio y sus clientes tenían que soportar una costosa infraestructura tecnológica dentro de sus organizaciones. Por el contrario, las redes actuales tienen en su mayoría clientes como los hogares, con requerimientos simples desde el punto de vista de su infraestructura de comunicaciones, pero haciendo uso de servicios masivos con altos requerimientos de ancho de banda. Esta situación plantea un panorama completamente diferente donde los grandes generadores de tráfico serán personas del común y no sólo las organizaciones especializadas en procesar información, de tal manera que el flujo de información en la red no está siendo generado sólo por grandes organizaciones con infraestructuras de red especializadas, sino también por clientes del común haciendo uso de una serie de servicios masivos como Telefonía IP, TVoIP, acceso a Internet de banda ancha y telefonía WiFi entre otros. Por otro lado, este panorama ha sido favorecido por dos aspectos que la arquitectura de la red de nueva generación (NGN) privilegia, siendo estos:

- *Las comunicaciones unificadas: que se refieren a la concepción de las diferentes redes como una sola infraestructura.*
- *La “Convergencia”: que hace alusión a la implementación y prestación de todos los servicios sobre una sola red.*

Las redes de nueva generación (NGN), desarrollan todo su potencial a partir de la separación de este par de conceptos, lo que implica que los servicios que se presten en el sistema serán completamente independientes de la red de comunicaciones que se utilice para el transporte de los datos. Aunque en la realidad es casi imposible hablar de una sola red de transporte, si se ha llegado a un nivel de integración de las redes que permiten administraras y gestionarlas como si fueran una sola. Esto muestra un potencial incalculable para el desarrollo de nuevos servicios, que prácticamente son a la medida del cliente, o para la apertura a nuevos mercados que solicitan servicios con grandes requerimientos de ancho de banda y variadas necesidades de calidad de servicio. Lo anterior también implica que el tráfico de las redes modernas ha evolucionado de forma tal que se hace necesario replantear muchas de las teorías que comúnmente se han utilizado para estudiarlo y para dimensionar las redes de datos, siendo el tráfico de video uno de los servicios que más ha evolucionado en la última década y uno de los de mayor interés de investigación. Este trabajo se concentra en el análisis de una de las características del tráfico de video, así como en las técnicas y

modelos que permiten simularlo de forma acertada y su impacto en un elemento importante para el dimensionamiento de las redes como es la calidad de servicio (QoS).

Antecedentes y estado del Arte

La explosión de nuevos servicios de las redes NGN traen a la escena de las empresas de telecomunicaciones una serie de transformaciones que las han llevado de prestar servicios implementados sobre la red telefónica (POTS) en los años 80's y 90's, a ser prestadoras de servicios multimedia en las cuales su negocio primario pasó a un segundo plano detrás de servicios como Televisión digital, Telefonía IP, Móviles o telefonía WiFi. Una de las características de estos nuevos servicios es que son de uso masivo y con altos requerimientos de ancho de banda y variados niveles de calidad de servicio (QoS) dependiendo del tipo de contenido (datos, imágenes, voz o video), obligando a tener en cuenta otros elementos incidentes en el tráfico como la simetría, el multicasting, la latencia, la seguridad y la demanda, los cuales insertan un nivel considerable de entropía en el tráfico de la red.

Esta falta de uniformidad en las demandas y los requerimientos de los usuarios se complementa con un amplio rango de capacidades de transmisión que van desde pocas decenas de kbps hasta varias decenas de Gbps. Esta combinación de nuevas características en las capacidades y demandas, invalidan los resultados tradicionales de la teoría de tráfico que se basaban en modelos no correlacionados (Modelos de Tráfico sin memoria), pues las nuevas características de tráfico son demasiado complejas para ser modeladas mediante técnicas desarrolladas para la red telefónica [1] como es el caso de la siguiente fórmula de Erlang (ver ecuación (1)):

$$P_B = \frac{A^N / N!}{\sum_{n=0}^N A^n / n!} \quad (1)$$

P_B = Probabilidad de Bloqueo

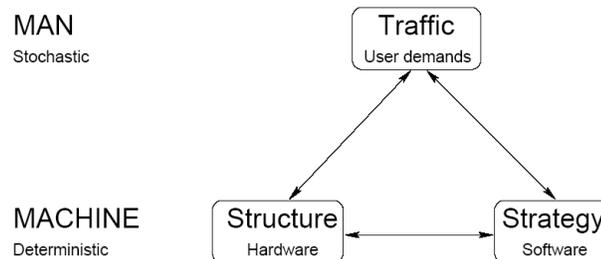
A = Tráfico ofertado

N = Número de líneas

En su concepto más básico, la teoría de tráfico consiste en determinar el comportamiento del flujo de datos en un sistema de telecomunicaciones, desde puntos de vista tanto cualitativos como cuantitativos, a partir de la aplicación de modelos matemáticos que buscan explicar la relación que existe entre la capacidad de una red de comunicaciones, la demanda de servicio que los usuarios le imponen y el nivel de desempeño que la red

puede alcanzar (ver Fig. 1). Como dicha demanda es de naturaleza estadística, se suele representar mediante algún proceso estocástico adecuado, con lo que se constituyen diferentes Modelos de Tráfico [12].

Fig. 1. Relaciones en un Sistema de Telecomunicaciones,



Fuente: Teletraffic Engineering, ITU-D, 2006 [12].

Desde este esquema, un modelo de tráfico adecuado debe describir y predecir de manera acertada el desempeño de la red basado en la teoría de procesos estocásticos y otras herramientas matemáticas. Los niveles y tipos de tráfico presentados en las redes de la actualidad presentan un reto para los expertos en telecomunicaciones, ya que estos se acercan con mayor rapidez a las capacidades de ancho de banda disponible, y han hecho notorias las deficiencias de los actuales modelos para describirlos y predecirlos.

A lo largo de la evolución de las redes de comunicaciones en los últimos cien años, se han propuesto diferentes modelos de tráfico que han tenido utilidad en el momento tecnológico en el que se desarrollaron. Pero curiosamente, hasta hace dos décadas, fue muy poco el desarrollo que se hizo en el campo del modelado de tráfico propiamente dicho, pues la ingeniería de tráfico se dedicaba únicamente al análisis de desempeño de los componentes de la red bajo modelos de tráfico como Poisson. Sólo recientemente, a partir de la necesidad de prestar servicios integrados con una única estructura de red, el modelado de tráfico se ha convertido en una extensa área de investigación en la que el objetivo es desarrollar modelos que predigan el impacto de la carga impuesta por las diferentes aplicaciones sobre los recursos de la red, de manera que se pueda evaluar la calidad de servicio (QoS) ofrecida [1].

El modelado del tráfico en las redes modernas también ha envuelto una serie de planteamientos que cuestionan los modelos comúnmente utilizados para describir y predecir el tráfico que estas transportan. En los últimos diez (10) años los estudios han mostrado que el tráfico multimedial en las redes modernas presenta características de autosimilaridad, y más específicamente autosimilaridad de dependencia de rango largo (LRD), esto ha sido ampliamente reconocido en [2], [3], [4], [5], [6], [11], [12].

Por el momento, recientes estudios han demostrado de forma convincente que existe una Dependencia de Rango Largo en los paquetes de video, el cual es una componente importante en redes de alta velocidad [8], [3]. Según estos elementos es posible que los modelos como MMPP (Proceso de Poisson Markovianamente Modelado) y otros que son actualmente utilizados para modelar fuentes de tráfico de video con tasa variable de bits

(VBR) basados en modelos de Markov, no permitan la captura de la LRD [1],[8] y por consiguiente no representen de forma acertada el tráfico de video de la red y, si esto no es tenido en cuenta, podría llevar a conclusiones inexactas sobre el rendimiento de la misma [7]. Además, otros estudios analíticos han mostrado que la autosimilaridad del tráfico de la red puede tener implicaciones significativas en el QoS [9] y un impacto perjudicial en el desempeño de la red, incluyendo retardos en la cola y tasas de pérdida de paquetes en redes de banda ancha [7].

En los últimos tres años las investigaciones que giran alrededor de las características de autosimilaridad y LRD se han enfocado en temas relacionados con la predictibilidad del tráfico de video, y la eficiencia de ancho de banda como en [25], [26] y [27]. En todos los casos se hace referencia a modelos basados en streaming de video y uso de trazas. El desarrollo de fuentes sintéticas se desarrolla como una alternativa a las pacas fuentes de tráfico de video disponibles para experimentación y planificación de redes.

Planteamiento del problema

Según lo mostrado anteriormente, algunos modelos matemáticos que son actualmente utilizados para modelar fuentes de tráfico de video con tasa variable de bits (VBR), no permiten evidenciar la LRD y por consiguiente no representen de forma acertada el tráfico de video de la red y, si esto no es tenido en cuenta, podría llevar a conclusiones inexactas sobre el rendimiento de la misma.

Hipótesis de solución

Se propone el desarrollo de una metodología que combina dos técnicas de análisis de tráfico de video para la determinación de parámetros de QoS. Dicha metodología hará uso de dos fuentes sintéticas de tráfico comúnmente implementada para modelar el tráfico de video basadas en modelos correlacionados, uno con LRD y el otro con SRD. Los datos generados por la fuente sintética serán insertados en una traza de video real, modificando así los parámetros y tamaños de los paquetes de la traza por los datos de la

fuente. Finalmente se procederá a realizar la determinación de parámetros de QoS con los resultados de la simulación con la fuente modificada.

Resultados esperados

Con los resultados obtenidos de las simulaciones para tráfico de video y la medición de métricas de QoS, se pretende realizar un aporte más a la solución del interrogante sobre el impacto que tiene la dependencia de rango largo en la calidad de servicio, y los modelos adecuados para la representación del tráfico en las redes modernas.

Contribución de la Tesis

En esta tesis se plantea una propuesta de investigación en el área de la ingeniería de tráfico y pretende realizar un aporte a la discusión abierta sobre la capacidad de algunas fuentes de tráfico (comúnmente utilizadas) para representar de forma efectiva el tráfico multimedial en las redes modernas. Esta discusión se basa en:

- *El nivel de impacto que tienen algunas características de este tráfico sobre elementos fundamentales para el diseño de redes como es la calidad de Servicio.*
- *La incapacidad de algunos de estos modelos, como los Markovianamente modulados, de evidenciar estas características.*

1.Introducción al Análisis de Tráfico de video.

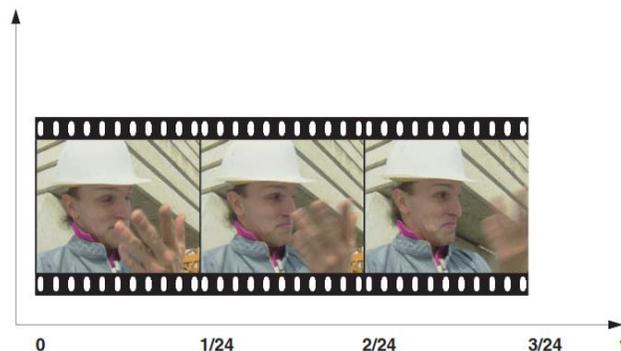
1.1 Generación del video digital

El video en su concepto más simple se compone de una serie de fotogramas o imágenes secuenciales con pequeñas diferencias entre ellos y que al ser reproducidos con la suficiente rapidez (a más de 24 fotogramas por segundo) crea la ilusión de movimiento. Este principio se aplicó durante gran parte del siglo XX con las diferentes técnicas del cine moderno, desde el flipp book hasta el film químico.

El transporte de video digitalizado y comprimido es uno de los elementos que más tráfico contribuye a las redes de hoy, esto incluye a las redes fijas, inalámbricas y móviles. Para su transporte el video debe ser codificado y comprimido para optimizar los requerimientos de ancho de banda.

Al concebir el video como una secuencia individual de fotogramas o imágenes que son mostradas a una cierta velocidad de fotogramas (frame rate), comúnmente superior a 24 fotogramas por segundo (fps), se crea la ilusión de movimiento continua al ojo humano. Existen diferentes estándares de frame rate tales como el National Television Standards Committee (NTSC) con un formato de 29,97 fps (\cong 30 fps) y el Phase Alternating Line (PAL) que usa un estándar de 25 fps.

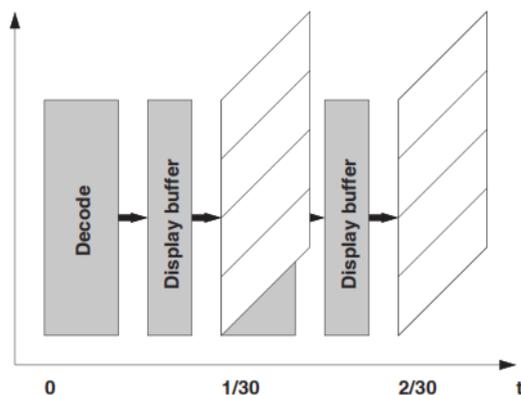
Fig. 2. Concepto de captura de movimiento en una cinta.



Fuente: Video Traces For Network. Performance Evaluation. Pag.9.

La representación digital del video conlleva la respectiva codificación y decodificación del material original trabajando conjuntamente en computadores, Smart phones y setup boxes. Por otra parte se puede partir del hecho de que el procesamiento digital del video tiene como base una imagen completa y que la visualización de cada una sucede en los tiempos dados por la frecuencia del estándar de fotogramas escogido (fig. 3.).

Fig. 3. Visualización de imágenes individuales.



Fuente: Video Traces For Network Performance Evaluation. Pag.11.

Cada fotograma está compuesto por una serie de elementos que son los pixeles y el formato de la trama (frame format) especifica el tamaño de la trama o fotograma en términos del número de pixeles que la conforman. Por ejemplo, el formato .avi, con codificador H.264 BP/MP/HP (Estándar de UIT-T/MPEG), presenta un frame format de 1920 x1080 pixeles (1920 pixeles horizontales y 1080 pixeles verticales), y una frame rate de 6-30 fps (fig. 4.).

En transmisión de video, cada pixel es representado por tres componentes, la luminancia (Y), la crominancia (U) y la intensidad (V). Además, su color es representado por tres componentes de color: rojo, verde y azul (RGB). La representación del color YUV a RGB para transmisiones de TV a color se da por la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

Existen diferentes formatos de luminancia, crominancia y luminosidad, y pueden ser categorizados por sub muestras que son utilizadas entre los diferentes componentes y la forma en la que son almacenados. Los valores originales de Y, U y V son almacenados por pixeles individuales y es conocido como YUV 4:4:4 (fig. 5.).

Pero para efectos de reducir la cantidad de información almacenada por imagen, se aprovechan fenómenos como que el ojo humano es más sensible a los cambios en luminancia (Y) que a los otros componentes y, por ejemplo, el sub muestreo por crominancia permite que la razón de bytes de crominancia a luminancia sea reducida, obteniéndose en otros formatos como YUV 4:2:0 o YUV 4:1:1. Más específicamente el sub muestreo representa un grupo típico de 4 pixeles por sus 4 componentes de luminancia (bytes) y un grupo de dos valores de crominancia para el caso de YUV 4:2:0.

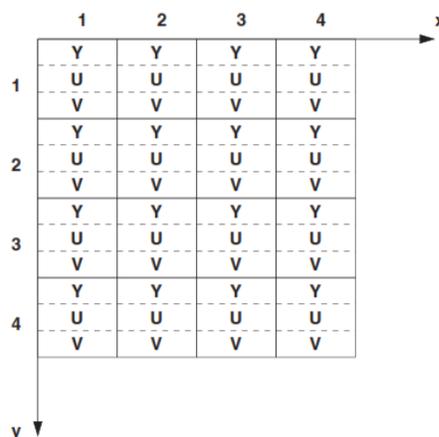
Fig.4. Formato de video digital para TV.

Formato de vídeo admitidos

Extensión del archivo	Contenedor	Códec de vídeo	Resolución	Velocidad de transferencia (fps)	Velocidad en bits (Mbps)	Códec de audio
*.avi *.mkv	AVI MKV	Divx 3.11 / 4.x / 5.1 / 6.0	1920 x 1080	6-30	8	MP3 / AC3 / LPCM / ADPCM / DTS Core
		XviD	1920 x 1080	6-30	8	
		H.264 BP / MP / HP	1920 x 1080	6-30	25	
		MPEG4 SP / ASP	1920 x 1080	6-30	8	
		JPEG de movimiento	1920 x 1080	6-30	8	
*.asf	ASF	Divx 3.11 / 4.x / 5.1 / 6.0	1920 x 1080	6-30	8	MP3 / AC3 / LPCM / ADPCM / WMA
		XviD	1920 x 1080	6-30	8	
		H.264 BP / MP / HP	1920 x 1080	6-30	25	
		MPEG4 SP / ASP	1920 x 1080	6-30	8	
		JPEG de movimiento	1920 x 1080	6-30	8	
*.wmv	ASF	Windows Media Video v9	1920 x 1080	6-30	25	WMA
*.mp4	MP4	H.264 BP / MP / HP	1920 x 1080	6-30	25	MP3 / ADPCM / AAC
		MPEG4 SP / ASP	1920 x 1080	6-30	8	
		XviD	1920 x 1080	6-30	8	
*.3gp	3GPP	H.264 BP / MP / HP	1920 x 1080	6-30	25	ADPCM / AAC / HE-AAC
		MPEG4 SP / ASP	1920 x 1080	6-30	8	
*.vro *.vob	VRO VOB	MPEG1	352 X 288	24 / 25 / 30	30	AC3 / MPEG / LPCM
		MPEG2	1920 X 1080	24 / 25 / 30	30	
*.mpg *.mpeg	PS	MPEG1	352 X 288	24 / 25 / 30	30	AC3 / MPEG / LPCM / AAC
		MPEG2	1920 X 1080	24 / 25 / 30	30	
		H.264	1920 X 1080	6-30	25	
*.ts *.tp *.trp	TS	MPEG2	1920 X 1080	24 / 25 / 30	30	AC3 / AAC / MP3 / DD+ / HE-AAC
		H.264	1920 X 1080	6-30	25	
		VC1	1920 X 1080	6-30	25	

Fuente: <http://www.samsung.com/ar/support/skp/faq/428806>

Fig. 5. YUV 4:4:4 sin sub muestreo para 4 pixeles.

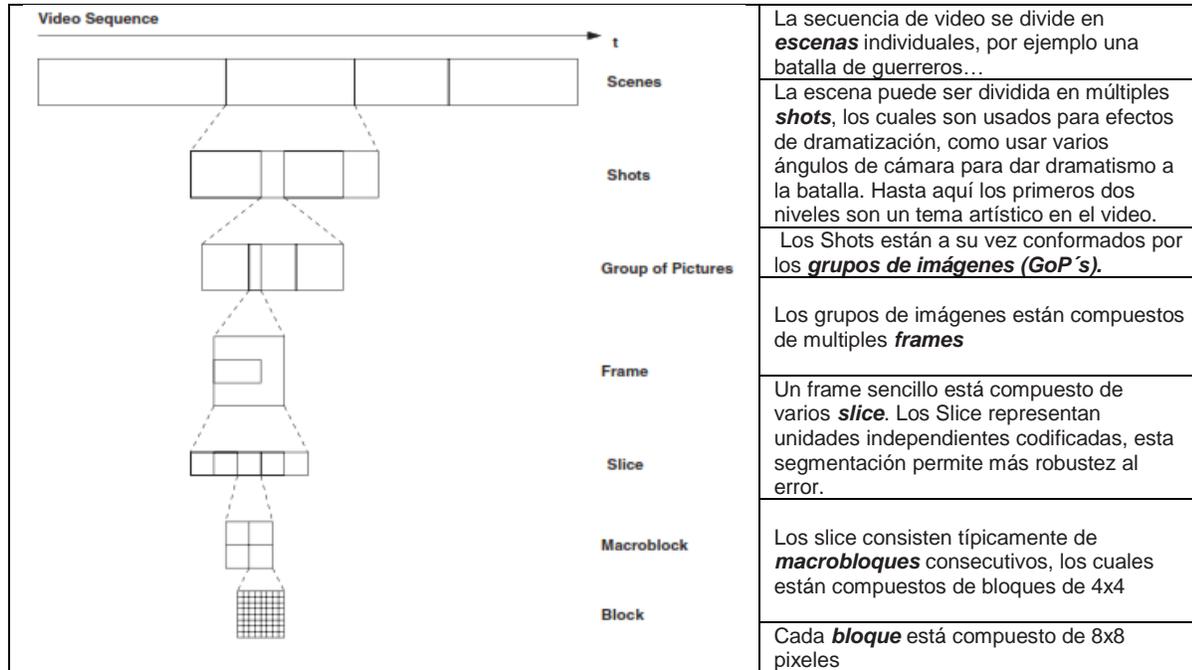


Fuente: Video Traces For Network. Performance Evaluation.

Otro concepto importante en la digitalización del video es que este no es procesado, almacenado, comprimido y transmitido pixel por pixel. Estas tareas se hacen sobre una

jerarquía que está compuesta desde su nivel más alto hasta su nivel más bajo por: las escenas, los shots, los grupos de fotos, las imágenes, el Slice, los macrobloques y finalmente los bloques (Fig. 6).

Fig. 6. Jerarquía de Video.



Teniendo en cuenta que las escenas y los shots corresponden a un tema artístico dentro de la jerarquía del video, se puede decir que a partir de los GoP's hacia abajo, es donde se concentran los desarrollos de investigación en la codificación del video. Por otra parte, la compresión de video aprovecha la redundancia de la información debido a las semejanzas que pueden existir en las tramas que conforman un GoP's (según la técnica de codificación) para reducir la información enviada con el menor impacto sobre la calidad del video, optimizando así el ancho de banda.

En la compresión de video se exploran tres tipos de redundancias:

Las **redundancias espaciales** que están asociadas a cada fotograma o imagen ya que estos contienen objetos sólidos del mundo real que tienen grandes superficies uniformes en términos de los pixeles que las conforman, esto es, varios pixeles adyacentes iguales o correlacionados, lo que permite que en vez de transmitir todos, sólo se transmite uno representativo del conjunto. La codificación **interframe** es empleada para reducir la redundancia espacial en una trama dada.

Además, tramas consecutivas tiene similitudes, esto es conocido como **redundancias temporales**, en donde existen coincidencias y similitudes entre pixeles homólogos de fotogramas sucesivos. Si se tiene en cuenta un frame rate de 25 fps (un frame cada 40ms), es claro que no suceden demasiados cambios para el que está visualizando el video.

La **redundancia estadística** busca determinar estadísticamente qué valores de muestra tienden a repetirse más que otros en determinadas codificaciones y así poder determinar, por ejemplo, a que valores de muestra les asigna un mayor número de códigos de bits (para valores que aparecen menos) y a cuáles les asigna uno menor (para valores que aparecen más a menudo).

1.2 Naturaleza del Tráfico de Video.

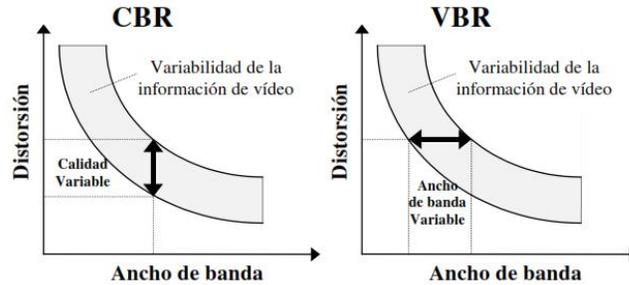
Durante la última década se ha dado una explosión de los servicios basados en multimedia y de forma particular los basados en video como la HDTV, Youtube, Netflix, Skype y video llamadas móviles que cada día tienen un mayor número de usuarios en una gran variedad de redes de acceso que van desde redes HFC, internet y LTE, entre otras. Esta situación ha tenido como consecuencia el incremento en los anchos de banda requeridos. Bajo esta perspectiva, la codificación y compresión y la descompresión de los datos de voz, audio, imagen y video se convierten en un componente fundamental para las redes modernas.

Los procesos de codificación y compresión del video introducen tasas de bit altamente variables, y es por eso que la tasa de control (rate control) es fundamental para todos los codificadores ya que esta determina el número de bits o nivel de calidad de la trama codificada [14]. Existen dos tipos de tasas de control que son:

Constant Bit Rate (CBR): aquí la tasa de bits aplica una cuantización uniforme, sin importar las diferencias en la densidad de la información que tiene la señal. Para el caso de la codificación de video se busca más que la velocidad real de la transmisión se mantenga lo más aproximadamente posible a la velocidad objetivo o a la capacidad de canal disponible. Esto tiene como consecuencia que la calidad del video se ve afectada debida a los cambios de escena o contenidos del video, ya que al no importar la densidad de la información que contenga una trama en específico a la hora de codificarse puede llegar a perderse parte de la información de la misma. Este tipo de control es típico de aplicaciones como el video en tiempo real, que requieren que la velocidad esté cerca a la capacidad disponible y el retardo sea restringido.

Variable Bit Rate (VBR): a diferencia de la CBR, aquí la tasa de bits aplica una cuantización variable y que es dependiente de la densidad de información que contiene la señal de video. En este caso el objetivo es mantener la calidad de video lo más aproximado al objetivo propuesto. Como consecuencia el ancho de banda requerido será variable buscando mantener el flujo de información de las escenas con toda su densidad información. Este tipo de control es típico en las redes modernas que manejan diferentes servicios de video.

Fig. 7. Relación ente CBR y VBR con el ancho de banda y la distorsión

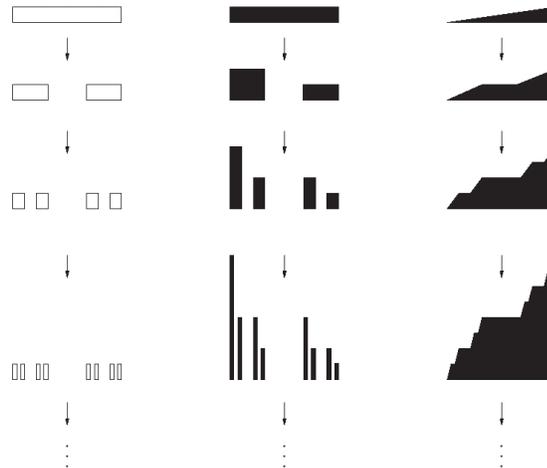


Las ventajas de los flujos CBR están concentradas en su facilidad para ser transportados, gestionados y modelados ya que la tasa de generación de los datos que se insertan en la red es aproximadamente constante. Pero estas ventajas respecto al tráfico, contrastan con una serie de desventajas que hacen más conveniente el uso de técnicas VBR como el hecho de que CBR ofrece una calidad variable, no aprovecha la cualidad de las redes asíncronas para multiplexar tráfico de diferentes tasas, y, finalmente se destaca el hecho de que el ancho de banda promedio necesario para VBR, para la misma calidad promedio, es mucho menor que el que se necesita para CBR.

1.3 La Autosimilaridad y la Dependencia de Rango Largo.

La autosimilaridad es un fenómeno donde cierta propiedad de un objeto (en este caso del comportamiento de las tasas de tráfico en series de tiempo) son preservadas con respecto a la escala en espacio y/o tiempo (ver Fig.8) Si un objeto es autosimilar o fractal, sus partes, cuando son ampliadas, se asemejan - en un sentido adecuado - a la forma del todo.

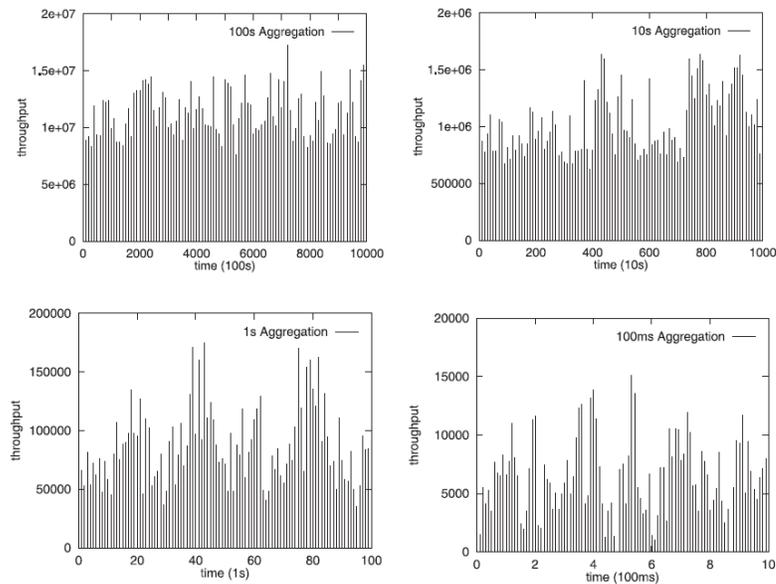
Fig. 8. Modelos Autosimilares de Cantor.



Fuente: Self-similar Network Traffic: An Overview [2].

“En la parte superior izquierda de la figura 9 se muestran unas trazas de tráfico, donde se grafica el throughput, en bytes, contra el tiempo, donde el tiempo de granularidad es de 100 segundos. Esto es, un simple punto de datos es el volumen de tráfico agregado sobre un intervalo de 100 segundos. En la parte superior derecha está la misma serie, la cual en el primer intervalo de 1000 segundos es incrementado por un factor de 10. Así las series de tiempo truncadas tienen la misma granularidad. Las otras dos gráficas muestran un acercamiento sobre el segmento inicial para reescalamientos sucesivos por factores de 10.” [2].

Fig. 9. Autosimilaridad Estocástica.



Fuente: Self-similar Network Traffic: An Overview [2].

A pesar de que la gráfica no posee una semejanza exacta de sus partes con el todo en los detalles finos, a diferencia de los que pasa con los fractales determinísticos (fig.8). Aquí se asume que la medida de "semejanza" es la forma de una gráfica con la magnitud adecuadamente normalizada. Es más, para trazas de tráfico medidas, sería demasiado esperar observar exactamente, autosimilaridad determinística, dada la naturaleza estocástica de muchos eventos de la red (por ejemplo, el comportamiento del arribo de fuentes) [2].

Un proceso estocástico $Y(t)$, $t \geq 0$ es un Proceso exactamente autosimilar, cuando su parámetro de Hurst H ($0 < H < 1$), si:

$$Y(t) =_d a^{-H} Y(at) \quad (3)$$

Esto es, si $Y(t)$ y su versión escalada en el tiempo $Y(at)$ después de normalizada por a^{-H} , están idénticamente distribuidas para todo $a > 0$ y $t > 0$ [2]. La autosemejanza se refiere al hecho de que, de acuerdo con la ecuación (3), las características estadísticas del proceso no varían con la escala.

Si $Y(t)$ representa el número de paquetes que han llegado a un enrutador en el intervalo de tiempo $[0, t]$, el correspondiente proceso de incrementos $\{X(t) = Y(t) - Y(t-1) \ t \in \mathbb{Z}\}$, representa el número de llegadas en intervalos sucesivos de una unidad de tiempo. Si $\{X(t), t \in \mathbb{Z}\}$ es un proceso estacionario de segundo orden, su función de autocovarianza $\gamma(k)$ satisface la siguiente relación:

$$\gamma(k) = \frac{\sigma^2}{2} ((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}) \quad \forall k > 0 \quad (4)$$

El parámetro de Hurst o parámetro de autosimilaridad, o parámetro H , es fundamental para determinar la autosimilaridad, ya que dependiendo del rango en el que se ubique, indicará el tipo de dependencia que posee el proceso estocástico, por ejemplo, si $0.5 < H < 1$. Indica que tiene dependencia de rango largo.

1.4 Métodos de Análisis de Tráfico de Video.

Dentro de los métodos de análisis de tráfico normalmente es necesario muestrearlo y convertirlo en una serie numérica en donde los valores tienen un significado físico concreto, por ejemplo, el tamaño de un paquete, o el tiempo de generación del mismo. Las formas más habituales de representar numéricamente una muestra de tráfico real son dos [15], la primera es la toma de **muestras de redes reales** que se obtienen a partir de software de rastreo o sniffers que se encuentra instalado en algún equipo de la red y se puede registrar y filtrar el tráfico de determinada comunicación. La segunda consiste en el uso de series de secuencias almacenadas extraídas de archivos audiovisuales y

series convencionales utilizadas en otros estudios. Específicamente para evaluar el tráfico de video, según [13], para procesos de investigación se hace necesario algún tipo de caracterización del video codificado. Basados en lo anterior existen tres mecanismos específicamente para el video:

Los modelos de tráfico de vídeo se esfuerzan por capturar las propiedades estadísticas esenciales del tráfico real, o, en muchos casos de trazas de vídeo del tráfico real, en modelos matemáticos precisos y computacionalmente eficientes. Por lo tanto, las trazas de vídeo son típicamente un requisito previo para el desarrollo del modelo. La verificación de la eficiencia de un modelo se da por la comparación del tráfico que este genera con las trazas de video. Si se considera que el modelo de tráfico es suficientemente preciso, puede utilizarse para el análisis matemático de redes, para simulaciones basadas en modelos, y también para generar la denominada traza de video virtual (sintético). El mayor inconveniente de trabajar con modelos matemáticos de tráfico es que estos nunca entregan ni contienen información del de video, sólo sus propiedades estadísticas [13].

El flujo de bits de vídeo, se genera utilizando el codificador y contiene toda la información de video. La caracterización de tráfico (por ejemplo, el tamaño de trama) se puede obtener midiendo el tráfico o analizando el flujo de bits. La calidad del video puede ser determinada por evaluación subjetiva o por métodos objetivos. La ventaja de la corriente de bits es que permite experimentos en redes donde se evalúa la calidad del video después de sufrir pérdidas en la red. Una limitación del flujo de bits es que es muy grande en tamaño; del orden de varios GBytes por una hora de video comprimido o varias decenas de GBytes por una hora de video sin comprimir. Otra limitación de los flujos de bits es que suelen ser propietarios y/o protegidos por derechos de autor dependiendo del codificador utilizado. Esto limita el acceso de los investigadores a los flujos de bits, y también limita el intercambio de flujos de bits entre los grupos de investigación. Una limitación de clave adicional de los flujos de bits es que requieren experiencia en codificación de vídeo [13].

Las **trazas de video** son una alternativa atractiva a los modelos de tráfico y al bitstream (flujo de bits) ya que representan el tráfico y la calidad de los videos. Aunque las secuencias de bits proporcionan los bits reales que llevan la información de vídeo, las trazas sólo proporcionan el número de bits utilizados para la codificación de los cuadros de video individuales y el nivel de calidad de la codificación. Por lo tanto, no hay problemas de copyright.

Es importante destacar que las trazas de video amplían considerablemente el conjunto de personas que pueden llevar a cabo una investigación de redes de video de alta calidad proporcionando las caracterizaciones de video pertinentes en archivos de trazas simples. Los archivos de trazas se pueden procesar con PC estándar y ser utilizados en simulaciones de red estándar, lo que permite a los investigadores sin experiencia en codificación de video o equipos pueda realizar investigación de redes de video [13].

Como las trazas de video son muy convenientes para la investigación de caracterización de vídeo, las trazas estimulan la investigación de redes que transportan video. De hecho, la comunidad investigativa experimentó una explosión inicial en la investigación sobre el transporte de vídeo después de que las trazas de MPEG-1 se pusieron a disposición del público alrededor de 1995.

2. Estimación de parámetros estadísticos de las Trazas de Video.

Como las trazas de video son parte fundamental del desarrollo de esta investigación se hace necesario que el lector identifique algunos métodos y conceptos estadísticos que serán necesarios para las simulaciones y análisis que se desarrollarán en los capítulos siguientes de este trabajo.

2.1 Tamaño de la Trama.

La media Aritmética muestral de una traza de tamaño de trama \bar{X} está denotada por:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \quad (5)$$

Donde N es el número de tramas de video de una traza dada y, X_n es el tamaño de la trama n (número de bits) de una codificación.

La varianza muestral S_X^2 de una traza de tamaño de trama está dada por

$$S_X^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (X_n - \bar{X})^2 \quad (6)$$

Otro valor importante para definir estadísticamente algunas de las características del tamaño de la trama es el coeficiente de variación de la trama que nos indica la relación entre el tamaño de la trama y la variabilidad de la misma.

$$CoVx = \frac{S_x}{\bar{X}} \quad (7)$$

Donde S_x es la desviación estándar muestral.

El máximo tamaño de trama está definido como:

$$X_{max} = \max_{0 \leq n \leq N-1} X_n \quad (8)$$

Otros valores estadísticos que son considerados de importancia por [13] son:

El tamaño de trama agregado, con nivel de agregación a así:

$$X_n^{(a)} = \frac{1}{a} \sum_{j=na}^{(n+1)a-1} X_j \quad (9)$$

Para $n = 0, \dots, N/(a - 1)$.

Por ejemplo el tamaño de trama agregado se obtiene promediando la traza de tamaño de trama $X_n = 0, \dots, N - 1$ sobre bloques no superpuestos de longitud a .

Se define la traza de tamaño de GoP como:

$$Y_m = \sum_{n=mG}^{(m+1)G-1} X_n \quad (10)$$

Para $m = 0, \dots, N/(G - 1)$.

Donde G denota el número de tramas en un GoP (Donde típicamente $G=12$). Note que $Y_m = G \cdot X_n^{(G)}$.

2.2 Autocorrelación.

La función de autocorrelación puede ser usada para la detección de no aleatoriedades en datos, o la identificación de modelos de series de tiempo apropiados si los datos no son aleatorios. Una suposición básica es que las generaciones son equiespaciadas. La autocorrelación es expresada como un coeficiente de correlación y normalmente es referido como coeficiente de autocorrelación (acc). En lugar de calcular la correlación entre dos variables diferentes, tales como el tamaño y la calidad, la correlación es calculada por los valores de la misma variable en las posiciones n y $n+k$. cuando la correlación es usada para detectar no aleatoriedades es usualmente solo la primera (retraso $k=1$) autocorrelación la que es de interés. Cuando la autocorrelación es usada para identificar un modelo de series de tiempo apropiado, la autocorrelación es usualmente graficada para un rango de retrasos k . El coeficiente de autocorrelación $\rho_x(k)$ para retrasos $k, k = 0, 1, \dots, N$. es estimado como:

$$\rho_x(k) = \frac{1}{N - k} \sum_{n=0}^{N-k-1} \frac{(X_n - \bar{X})(X_{n+k} - \bar{X})}{S_X^2} \quad (11)$$

Por otra parte, la estimación del parámetro de Hurst, Propuesto en 1951 por Harold Edwin Hurst, para unos problemas de hidrología, hace uso de las siguientes relaciones estadísticas.

2.3 Test de Varianza Tiempo.

La gráfica de varianza tiempo se obtiene trazando la varianza normalizada de la traza agregada $S_X^{2(a)}/S_X^2$ como una función del nivel de agregación ("tiempo") a en una gráfica Log vs. Log.

Para graficar la varianza tiempo se tiene disponible el siguiente algoritmo [13]:

Algoritmo 1. Algoritmo para graficar el estadístico Varianza Tiempo.

$$S_X^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (X_n - \bar{X})^2;$$

Para cada $a=12, 24, 48, 96, \dots$, y demás;

$$M = \lceil N/a \rceil;$$

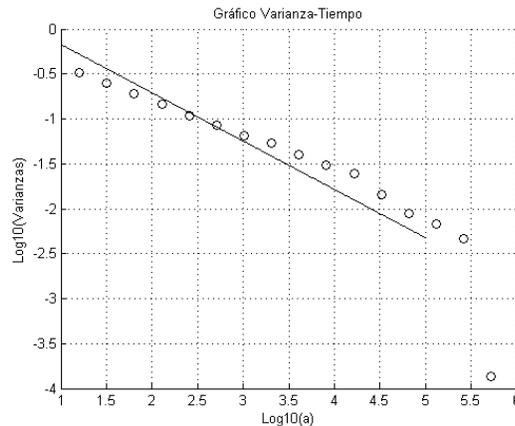
$$X_n^{(a)} = \frac{1}{a} \sum_{j=na}^{(n+1)a-1} X_j, \text{ Para } n = 0, \dots, M-1;$$

$$S_X^{2(a)} = \frac{1}{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} (X_n^{(a)} - \bar{X})^2;$$

Graficar el punto $(\log_{10}(a), \log_{10}(S_X^{2(a)} / S_X^2))$;

Las trazas sin dependencia de rango largo eventualmente (para valores grandes de a) decrecen linealmente con una pendiente de -1 en la gráfica de tiempo de la varianza. Por otra parte, las trazas con dependencia de rango largo, eventualmente disminuyen linealmente con una pendiente más suave, es decir, una pendiente mayor que -1.

Fig.10. Gráfica de varianza - tiempo.



Consideramos los niveles de agregación que son múltiplos del tamaño GoP (12 cuadros) para evitar el efecto de las correlaciones intra-GoP. Para fines de referencia trazamos una línea con pendiente -1 empezando por el origen. Para la estimación del parámetro de Hurst se estima la pendiente de la parte lineal de la gráfica de tiempo de la varianza usando un ajuste de mínimos cuadrados.

2.4 Estadístico R/S (Rescaled Adjusted Range Statistics).

Sobre la base de investigaciones de diversos fenómenos (por ejemplo, el nivel del agua que cambia en un río), Hurst desarrolló una medida no dimensional normalizada capaz de describir la variabilidad. El llamó esta medida Rango Ajustado Reajustado (R/S)

Se hace uso de este estadístico para investigar las características de dependencia de rango largo de las trazas generadas. El estadístico R/S provee un enfoque gráfico de aprendizaje para estimar el parámetro H .

Para un conjunto observado dado $X = \{X_n, n \in \mathbb{Z}^+\}$ con valor medio de muestra $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_j$ el concepto de $R(n)$ es introducido como

$$R(n) = \max_{1 \leq j \leq n} \Delta_j - \min_{1 \leq j \leq n} \Delta_j \quad (12)$$

Donde

$$\Delta_k = \sum_{i=1}^k X_i - k\bar{X}, \quad \forall k = \overline{1, n} \quad (13)$$

Por ejemplo, la diferencia entre las desviaciones máximas y mínimas.

Las diferentes características del rango de la secuencia de tiempo de una variable aleatoria X , la cual es igual a

$$\max_{1 \leq j \leq N} X_j - \min_{1 \leq j \leq N} X_j \quad (14)$$

Se eligió el valor medio en lugar de la característica que incluía la acumulación Δ_j y la descripción de la variabilidad de la variable X . Para describir la variabilidad, se encontró que la siguiente característica no dimensional escalonada era más adecuada:

$$\frac{R(n)}{S(n)} = \frac{\max_{1 \leq j \leq n} \Delta_j - \min_{1 \leq j \leq n} \Delta_j}{\frac{1}{n-1} \sum_{j=0}^n (X_j - \bar{X})^2} = \frac{\max(0, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n) - \min(0, \Delta_{j_1}, \Delta_2, \dots, \Delta_n)}{S(n)} \quad (15)$$

Hurst se refirió a esta proporción como el rango reajustado/ajustado y mostró que para muchos fenómenos naturales se satisface la siguiente relación empírica:

$$M \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] \sim cn^H \text{ como } n \rightarrow \infty \quad (16)$$

Donde c es alguna constante finita positiva que no depende de n . Sacando logaritmo a ambos lados:

$$\text{Log} \left\{ M \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] \right\} \sim H \log(n) + \text{Log}(c) \text{ como } n \rightarrow \infty \quad (17)$$

Así, el parámetro H se puede estimar colocando el gráfico de $\log \{ M[R(n)/S(n)] \}$ en $\log(n)$ y usando los puntos obtenidos para seleccionar una recta con pendiente H basada en el método de los mínimos cuadrados.

A grandes rasgos, para los procesos estocásticos de dependencia de rango largo, la estadística R/S se caracteriza por $M[R(n)/S(n)] \sim cn^H$ como $n \rightarrow \infty$. El parámetro Hurst H se estima como la pendiente de una gráfica log-log del estadístico R/S.

Más formalmente, *el estadístico de rango ajustado reajustado* (para el estadístico R/S corta) se representa de acuerdo con el algoritmo dado en el Algoritmo 2 [13]. El estadístico R/S Se calcula $R(t_i, d)/S(t_i, d)$ para valores logarítmicamente espaciados del retraso k , comenzando con $d = 12$ (para evitar el efecto de las correlaciones intra-GoP)

Algoritmo 2. Algoritmo para graficar el estadístico R/S.

para cada $d = 12, 24, 48, \dots, 96$ hacer

$$I = K + 1 - \left\lfloor \frac{dK}{N} \right\rfloor$$

para cada $i = 1, \dots, I$ hacer

$$t_i = (i - 1) \frac{N}{K} + 1;$$

$$\bar{X}(t_i, d) = \frac{1}{d} \sum_{j=0}^{d-1} X_{t_i+j}^{(a)};$$

$$S^2(t_i, d) = \frac{1}{d} \sum_{j=0}^{d-1} [X_{t_i+j}^{(a)} - \bar{X}(t_i, d)]^2;$$

$$W(t_i, k) = \left(\sum_{j=0}^{k-1} X_{t_i+j}^{(a)} \right) - k\bar{X}(t_i, d);$$

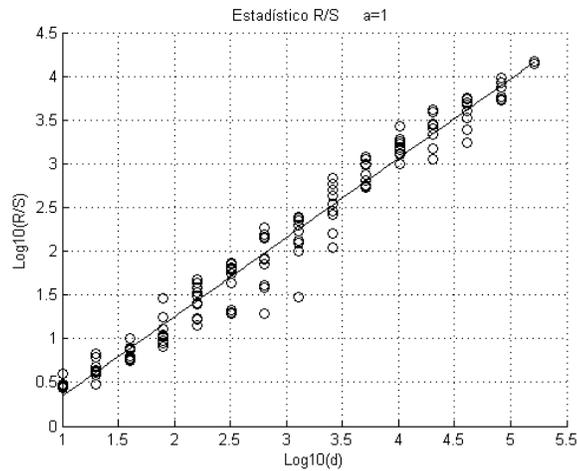
$$\max \left\{ 0, \max_{0 \leq k \leq d} W(t_i, k) \right\} - \min \left\{ 0, \min_{0 \leq k \leq d} W(t_i, k) \right\};$$

$$\text{graficar punto}(\log d, \log \frac{R(t_i, d)}{S(t_i, d)});$$

Fin

Fin

Fig. 11. Gráfica de estimador R/S.



2.5 Método gráfico de estimación de densidad espectral (Análisis de Periodogramas).

Mientras que los diagramas de tiempo de variación y los diagramas R / S son muy útiles para descubrir la autosimilaridad, la falta de resultados para limitar las leyes de las características estadísticas adecuadas hace que sean inútiles, en cierto sentido, cuando se requiere un análisis más preciso de datos (por ejemplo, intervalos de confianza para el grado de autosimilaridad H , el criterio de elección del modelo o criterios de ajuste). El análisis más fino es posible si se aplican la estimación de máxima verosimilitud (maximum likelihood estimation, MLE) y las aproximaciones relacionadas usando periodogramas.

La estimación basada en gráficos de densidad espectral es la esencia de este método, el cual encierra más precisión estadística que las estimaciones basadas en combinaciones. El periodograma (o la "función de intensidad") $I_N(\omega)$ estima la densidad espectral de procesos estocásticos X_t y puede ser estimado por la siguiente serie, sobre un tiempo de intervalo N :

$$I_N(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{j=1}^n X_j e^{ij\omega} \right| \quad (18)$$

Al evaluarla sobre el intervalo N , tendremos:

$$I_N(\omega) = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{k=1}^N X_k e^{jk\omega} \right|^2, \quad \omega \in [0, \pi] \quad (19)$$

Donde $\{X_k\}$ es la serie de tiempo y N es el tamaño de la serie de tiempo.

Teniendo en cuenta el hecho de que la autosimilaridad influye en el carácter del espectro $S(\omega)$ cuando $\omega \rightarrow 0$. La gráfica de la densidad espectral estará dada como sigue:

$$I_N(\omega) \sim [\omega]^{1-2H} \text{ cuando } \omega \rightarrow 0 \quad (20)$$

Teniendo el gráfico de $\log I_N(\omega)$ vs. $\log(\omega)$ (únicamente para bajas frecuencias), la línea tangente es ajustada a la curva. La línea decreciente puede ser aproximadamente igual a $1-2H$. En la práctica, sólo el 10% de las frecuencias bajas puede ser usado.

Una aproximación para la estimación por densidad espectral o periodogramas para trazas de video parte de que $I_N(\omega)$ será $I_N(\lambda)$ por tratarse de una variable discreta y que esta depende de los periodogramas $I(\lambda)$ como una aproximación de la densidad espectral, la cual cerca al origen satisface que:

$$\log I(\lambda) \approx \log c_f + (1 - 2H) \log \lambda_k + \log \xi_k \quad (21)$$

Para estimar el parámetro de Hurst H se grafica el periodograma en una gráfica log vs log, la cual es detallada en el algoritmo 3 [13].

Algoritmo 3. Algoritmo para graficar el estadístico Periodogramas.

$$M = \left\lceil \frac{N}{a} \right\rceil$$

Para cada $n = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ hacer

$$X_n^{(a)} = \frac{1}{a} \sum_{j=na}^{(n+1)a-1} X_j;$$

$$Z_n^{(a)} = \log_{10} X_n^{(a)}$$

Final

Para cada $k = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{M-1}{2} \right\rfloor$ hacer

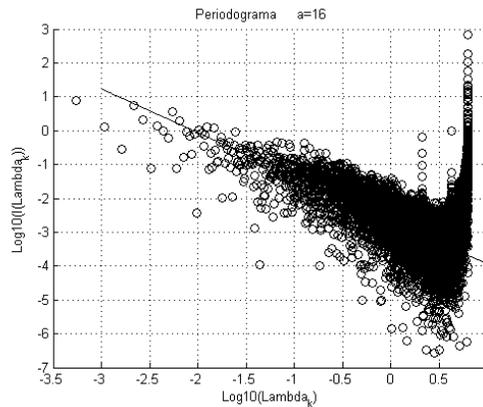
$$\lambda_k = \frac{2\pi k}{M};$$

$$I(\lambda_k) = \frac{1}{2\pi M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} Z_n^{(a)} e^{-jn\lambda_k} \right|^2$$

Graficar punto $(\log_{10} \lambda_k, \log_{10} I(\lambda_k));$

Final

Fig. 12. Gráfica de periodogramas.



En el presente trabajo se realiza una estimación del parámetro de Hurst por estos tres métodos

2.6 Calidad de tramas de video.

Si se parte del hecho de tener una secuencia de video con N tramas (imágenes), cada una con una dimensión de $D_x \times D_y$ píxeles. Además $I(x, y, n)$, $n = 0, \dots, N - 1; x = 1, \dots, D_x; y = 1, \dots, D_y$, representará el valor de luminancia (nivel de gris o componente Y) del pixel en el punto (x, y) en la trama de video n . El error cuadrático medio (MSE) es definido como la diferencia de la media de los cuadrados entre los valores de las tramas en dos secuencias de video I . Específicamente, la MSE para una trama de video individual está definido como:

$$M_n = \frac{1}{D_x \cdot D_y} \sum_{x=1}^{D_x} \sum_{y=1}^{D_y} [I(n, x, y) - \tilde{I}(n, x, y)]^2 \quad (22)$$

La media del MSE para una secuencia de N tramas de video es:

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} M_n \quad (23)$$

El RMSE es definido como la raíz cuadrada del MSE.

$$RMSE = \sqrt{\bar{MSE}} \quad (24)$$

El pico de la relación señal a ruido (PSNR) en decibeles (dB) es generalmente definido como $PSNR = 10 \cdot \log_{10}(p^2/MSE)$, donde **p indica el valor de luminancia máxima de un pixel** (255 en imágenes de 8 bits). En [13] se definió *la calidad (en dB) de una trama de video n* como:

$$Q_n = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{M_n} \quad (25)$$

Se define también el *promedio de la calidad (en dB)* de una secuencia de video de N tramas como

$$\bar{Q} = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{\bar{M}} \quad (26)$$

Una propuesta de definición alterna para el *promedio de la calidad (en dB)* de una secuencia de video es:

$$\bar{Q}' = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Q_n \quad (27)$$

Se define la varianza de la muestra del MSE S_M^2 de una secuencia de N tramas de video como

$$S_M^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (M_n - \bar{M})^2 \quad (28)$$

Y la desviación estándar del MSE como

$$S_M = \sqrt{S_M^2} \quad (29)$$

Además se define la desviación estándar de la calidad S_Q de una secuencia de video

$$S_Q = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{S_M} \quad (30)$$

Se define el coeficiente de la variación de la calidad $CoQV$ de una secuencia de video como

$$CoQV = \frac{S_Q}{\bar{Q}} \quad (31)$$

3. Análisis de Dependencia de Rango Largo.

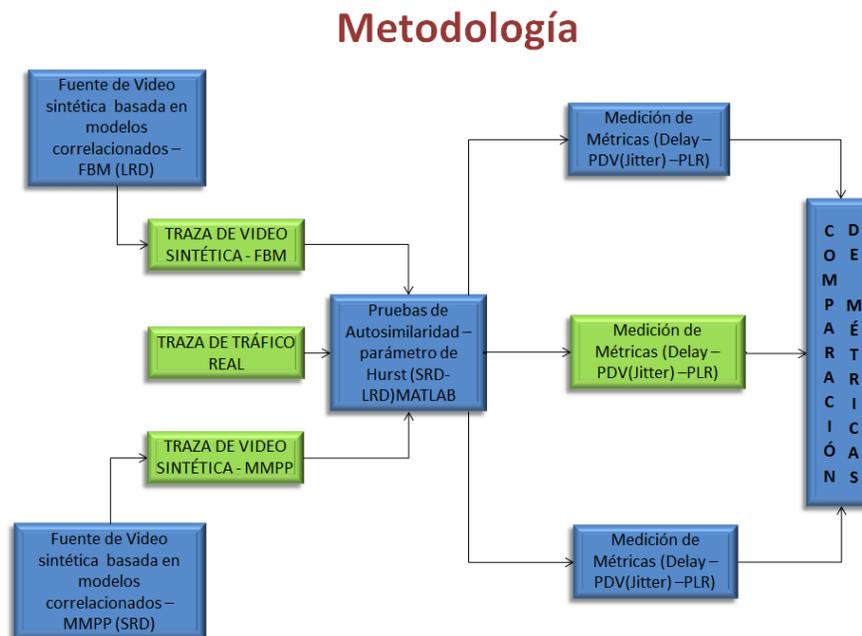
Como se mencionó en el capítulo 1, para poder analizar el tráfico de video, existen tres formas diferentes:

- Flujo de bits
- Trazas de video
- Modelos de tráfico de video.

El flujo de bits, contiene la información completa del video, permitiendo evaluar el tráfico y la calidad del video después de ser transmitida de manera visible, pero tiene dos limitaciones: tiene un gran peso en gigabytes y su información está protegida por copyright limitando el acceso a ella. Una solución es usar trazas de video (Video Traces). Mientras el flujo de bits aporta los bits que contienen la información del video, las trazas solo entregan el número de bits que componen la codificación de cada imagen Individual de video. El tercer método es modelar matemáticamente el tráfico (Video traffic models) estos modelos buscan capturar las propiedades estadísticas del tráfico real, o, en este caso de trazas de vídeo del tráfico real, en modelos matemáticos precisos y computacionalmente eficientes.

En este trabajo se plantea el desarrollo de una metodología para implementar fuentes sintéticas a partir de modelos matemáticos correlacionados y trazas de video real. Además, se busca determinar el impacto que la dependencia de rango largo podría tener sobre métricas de calidad de servicio QoS sobre la red (ver Fig.13).

Fig. 13. Metodología propuesta.



3.1 Fuentes sintéticas de video.

Para comenzar con las fuentes de datos que posteriormente conformarán las trazas sintéticas partiremos de dos conceptos matemáticos los cuales corresponden a los modelos no correlacionados y los correlacionados.

3.1.1 Modelos no Correlacionados

Se trata de señales en donde no existe relación de ningún tipo entre las muestras de las secuencias de tal modo que cada muestra es generada a partir de la misma función de la distribución estadística, pero con total independencia de las anteriores.

Estos modelos no correlacionados (procesos de renovación, en especial el proceso de Poisson) ofrecen un mejor manejo matemático, pero no son capaces de capturar muchas de las características más relevantes del tráfico moderno, en particular las asociadas con la Autocorrelación observada en el tráfico real. Además, son válidos para modelar aspectos como: tiempo entre llamadas, duración de la llamada o tamaño de los ficheros transmitidos. Es decir, se han aplicado con enorme éxito en el análisis y control de redes telefónicas y redes teleinformáticas, pues los tráficos de voz y datos interactivos pueden ajustarse con suficiente exactitud a las suposiciones básicas que generan estos modelos [1].

Dada la independencia entre los tiempos de llegada, se ha podido desarrollar toda una completa teoría matemática que modela los efectos de estas demandas sobre recursos limitados de comunicación, como es la Teoría de Colas, ampliamente utilizada en el modelamiento de redes tradicionales de comunicaciones.

Dentro de este grupo, está el modelo clásico, Poisson o los ruidos normales o gaussianos

3.1.2 Modelos Correlacionados.

El carácter intermitente del flujo de datos impuso desde un principio la necesidad de introducir correlación en los modelos de tráfico, ya que la llegada de paquetes se encuentra fuertemente correlacionada. Estos modelos pueden representar con relativa exactitud muchas fuentes reales de tráfico en redes de comunicaciones y permiten cierto tratamiento matemático.

Para el caso de la metodología propuesta se seleccionaron dos tipos de modelos correlacionados el primero de ellos es el Proceso de Poisson Markovianamente Modulado, el cual, a pesar de evidenciar características de dependencia de rango corto (SRD), ha sido usado para modelar con éxito el tráfico de video [1], [17], [18] que como

es sabido reviste características de dependencia de rango largo. El segundo modelo es el Movimiento Browniano Fraccional que es un modelo de correlacionado apropiado para representar el tráfico de dependencia de rango largo y por ende el tráfico de video en específico.

Proceso de Poisson Markovianamente Modulado.

(MMPP): En un proceso markoviano, la correlación viene dada por el hecho de que el estado actual del sistema depende exclusivamente del estado anterior. Para la aproximación de la fuente de datos y video se puede usar un modelo simple como los procesos On/Off, una fuente On/Off consta de dos estados, durante el estado On se emite tráfico a tasa constante.

Los tiempos de permanencia en cada estado en principio son exponenciales. El MMPP de dos estados modela el agregado de fuentes On/Off.

Movimiento Browniano Fraccional

El proceso FBM es frecuentemente utilizado en el análisis del tráfico de datos autosimilar

$$B_H(t) = Xt^H \quad (t > 0: 0.5 \leq H < 1) \quad (32)$$

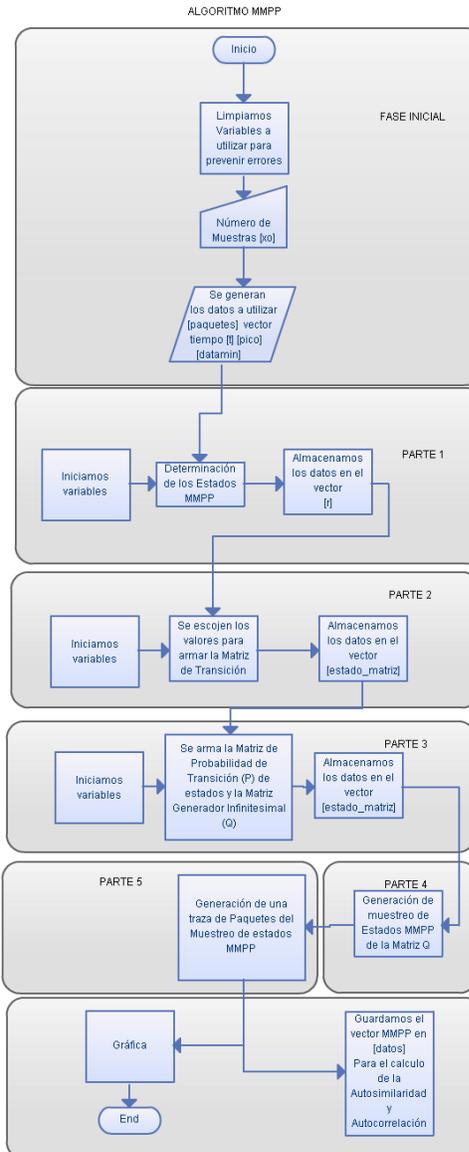
donde X es una variable aleatoria normalmente distribuida con media cero y varianza 1, y H es el parámetro Hurst del proceso.

El movimiento Browniano fraccional resulta atractivo para modelar tráfico ya que sus características como proceso gaussiano y su proceso de generación es acorde con las distribuciones de probabilidad de variables tales como el tamaño de los paquetes archivos transferidos mediante FTP, los tiempos de conexión TCP, el tamaño de los objetos multimedia en las páginas Web, la longitud de las escenas en video MPEG, etc. [1].

3.2 Generación de fuentes en Matlab.

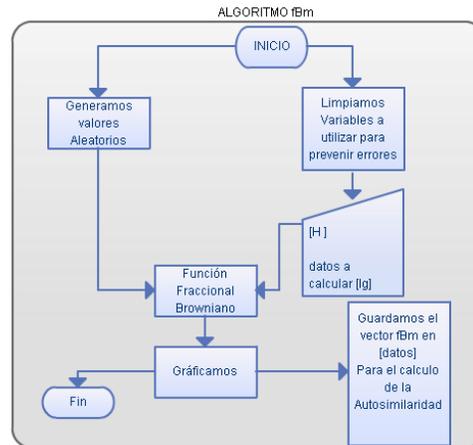
3.2.1 Algoritmo de MMPP:

Esta es una implementación del algoritmo LAMBDA que se propone en [19]. Se calcularán los estados de MMPP usando el algoritmo LAMBDA, Una vez que los estados de MMPP se determinan, el código determina la vector de probabilidad de transición. El algoritmo será adaptado para generar los tamaños de paquetes a partir del modelo propuesto.

Algoritmo 4. Algoritmo de generación de datos fuente MMPP.**3.2.2 Algoritmo FBM:**

El algoritmo usado como fuente corresponde a la función fbm de Matlab y cuyos algoritmos son descritos en [20]:

A partir de la expresión del proceso fbm como una integral fraccionaria del proceso de ruido blanco, la idea del algoritmo es construir una wavelet biortogonal dependiendo de una ortogonal dada y adaptada al parámetro H.

Algoritmo 5. Algoritmo de generación de datos fuente FBM.

Entonces la trayectoria de la muestra generada se obtiene mediante la reconstrucción usando la nueva wavelet partiendo de una descomposición wavelet a un nivel dado diseñado como sigue: los coeficientes de los detalles son realizaciones gaussianas aleatorias independientes y los coeficientes de aproximación provienen de un proceso ARIMA fraccionario.

Este método fue propuesto por primera vez por Meyer y Sellan y los problemas de aplicación fueron examinados por Abry y Sellan [21].

Sin embargo, las muestras generadas siguiendo este esquema original presentan demasiados componentes de alta frecuencia. Para eludir este comportamiento indeseable Bardet y otros [22] proponen un muestreo descendente de la muestra obtenida por un factor 10.

Es importante anotar que en el código utilizado dos parámetros internos: $\delta = 10$ (el factor de reducción de amplitud) y el umbral $\text{prec} = 1E-4$, para evaluar series por sumas truncadas, pueden ser modificados por el usuario para valores extremos de H .

Una descripción completa de los generadores de procesos de dependencia de largo alcance está disponible en [22].

3.3 Resultados de Análisis de LRD de trazas reales.

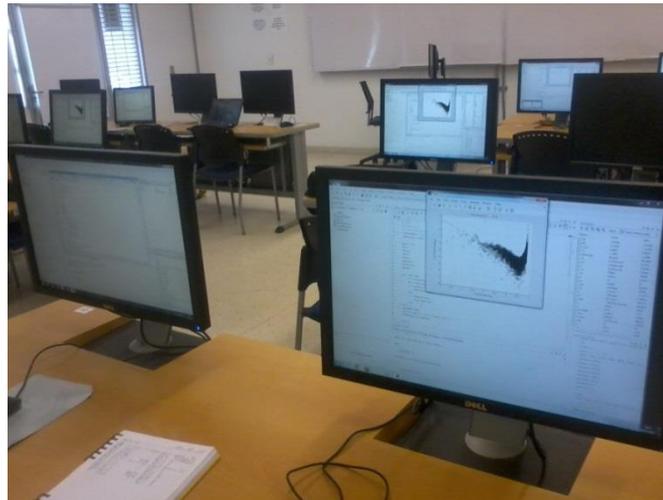
El proceso de análisis de dependencia de rango largo en las trazas reales se realizó determinando las características estadísticas de la misma como el número de fotogramas de la traza, tamaño mínimo de fotograma (Bytes), tamaño máximo de fotograma (Bytes), tamaño promedio de fotograma (Bytes), suma de tamaños de fotogramas (Bytes), fotograma pico respecto a la media, varianza de los tamaños de los fotogramas, Coeficiente de Variación de los Tamaños de los Fotogramas (CoVx), Rata de Bits Promedio (bits/seg), Rata de Bits Más Alta (bits/seg), y finalmente el parámetro de Hurst

(Estadístico R/S, varianza tiempo y periodogramas). También se hizo uso de una serie de algoritmos que fueron modificados (Anexo 1. Algoritmos de estimadores R/S, Varianza Tiempo y Periodogramas en Matlab) para determinar el parámetro H.

Para este trabajo se hizo uso de dos trazas de video disponibles en repositorios internacionales de la Universidad del estado de Arizona y Aalborg university (<http://trace.eas.asu.edu/>) las cuales proporcionan trazas de vídeo para las evaluaciones de rendimiento de la red. Además, proporcionan las secuencias de video de uso común y algunas producciones de vídeo originales en el formato YUV sin comprimir para descargar. Las trazas seleccionadas son Star Wars IV y Silence of the Lambs.

Los resultados presentados aquí fueron desarrollados en la sala de simulación P212 del campus La Nubia de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Se implementó un cluster de 16 computadores para correr los programas de Matlab.

Fig. 14 Simulación de estadísticos en sala de micros P201 campus La Nubia Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.



3.3.1 Análisis de dependencia de Rango Largo para Star Wars IV.

Para el análisis comenzaremos por describir la composición de la traza típica, en este caso una traza MPEG de Star Wars IV, en ella se observa el número de la trama, el tipo de trama (I – Intra coded, P- Inter coded, B- Bidirectional Coded). Seguidamente se tiene el tiempo de generación de la trama en ms y finalmente el tamaño de la trama.

Tabla 1. Estructura de una traza.

Frame No.	Frametype	Time[ms]	Length [byte]
1	I	0	919

2	P	120	1161
3	B	40	302
4	B	80	432
5	P	240	491
6	B	160	284
7	B	200	377
8	P	360	389
9	B	280	269
10	B	320	284
11	I	480	1463

Los resultados de simulación fueron los siguientes:

Información de la traza:

Traza Star Wars Star Wars IV Single Layer G16B1 QP=1.

Encoder: MPEG-4 Temporal

Variable Bit Rate (VBR)

Frame Size: CIF 352x288

GoP Size: 16

No. B Frames: 1

Quantizer: 01

Tabla 2. Resultados de simulación estadístico R/S, periodogramas y varianza tiempo para la traza Traza Star Wars Star Wars IV Single Layer G16B1 QP=1.

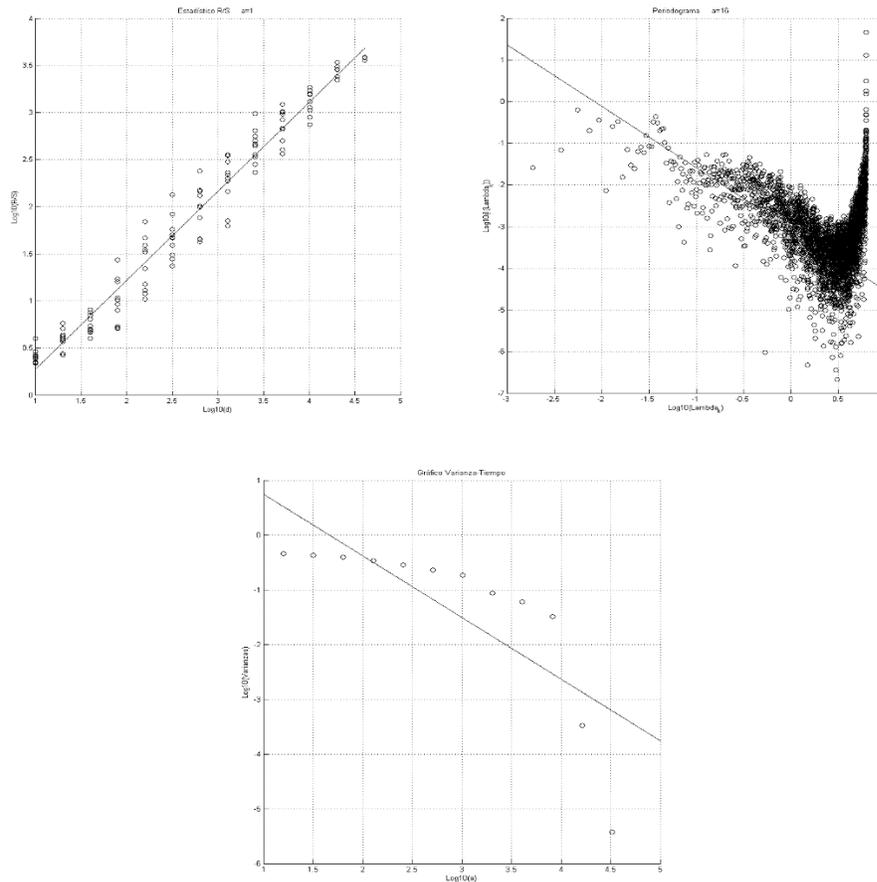
Estadístico R/S:	Valor
Número de Fotogramas:	tam = 53953.00
Tamaño Mínimo de Fotograma (Bytes):	ans = 8.00
Tamaño Máximo de Fotograma (Bytes):	ans = 59614.00
Tamaño Promedio de Fotograma (Bytes):	ans = 14775.09
Suma de Tamaños de Fotogramas (Bytes):	ans = 797160655.00
Fotograma Pico Respecto a la Media:	ans = 4.03
Varianza de los Tamaños de los Fotogramas:	S2 = 2988974825.02
Coefficiente de Variación de los Tamaños de los Fotogramas:	CoVx = 0.46
Rata de Bits Promedio (bits/seg):	ans = 3546022.60
Rata de Bits Más Alta (bits/seg):	ans = 14307360.00
Parametro de Hurst (Estadístico R/S)	H = 0.944650886255246

Estadístico Periodogramas:	Valor
n1	1685
Número de Fotogramas:	tam = 53953.00
Tamaño Mínimo de Fotograma (Bytes):	ans = 8.00
Tamaño Máximo de Fotograma (Bytes):	ans = 59614.00
Tamaño Promedio de Fotograma (Bytes):	ans = 14775.09
Suma de Tamaños de Fotogramas (Bytes):	ans = 797160655.00
Fotograma Pico Respecto a la Media:	ans = 4.03
Varianza de los Tamaños de los Fotogramas:	S2 = 2988974825.02
Coefficiente de Variación de los Tamaños de los	CoVx = 0.46

Fotogramas:	
Rata de Bits Promedio (bits/seg):	ans = 3546022.60
Rata de Bits Más Alta (bits/seg):	ans = 14307360.00
Parametro de Hurst (Estadístico R/S)	H = 1.236740548648977

Estadístico varianza tiempo:	Valor
Número de Fotogramas:	tam = 53953.00
Tamaño Mínimo de Fotograma (Bytes):	ans = 8.00
Tamaño Máximo de Fotograma (Bytes):	ans = 59614.00
Tamaño Promedio de Fotograma (Bytes):	ans = 14775.09
Suma de Tamaños de Fotogramas (Bytes):	ans = 797160655.00
Fotograma Pico Respecto a la Media:	ans = 4.03
Varianza de los Tamaños de los Fotogramas:	S2 = 2988974825.02
Coefficiente de Variación de los Tamaños de los Fotogramas:	CoVx = 0.46
Rata de Bits Promedio (bits/seg):	ans = 3546022.60
Rata de Bits Más Alta (bits/seg):	ans = 14307360.00
Parametro de Hurst (Estadístico R/S)	H = 0.8437085903705014

Fig. 15. Gráfica de estadístico R/S, periodogramas y varianza tiempo para la traza Star Wars IV Single LayerG16B1QP=1y nivel de agregación $a=1$, $a=16$



Para verificar la robustez del estimador R/S se repite el algoritmo para diferentes niveles de agregación ($a \geq 1$). Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de la traza Star Wars Star Wars IV Single Layer G16B1 QP=1 con el estadístico R/S.

NIVEL DE AGREGACIÓN	PARÁMETRO H
a=1	H = 0.944650886255246
a=12	H = 0.938855656379862
a=24	H = 0.913984374732038
a=48	H = 0.943445077508233
a=96	H = 0.951348567500985
a=192	H = 0.959554739347464
a=300	H = 0.968453874638461
a=396	H = 0.977879908987720
a=504	H = 0.989788757890992

Para el caso del estimador por periodogramas los niveles de agregación que se recomiendan en [13] se consignan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de la traza Star Wars Star Wars IV Single Layer G16B1 QP=1 con el estadístico Periodogramas.

NIVEL DE AGREGACIÓN	PARÁMETRO H
a=12	H = 1.236740548648977
a=24	H = 1.334853296741854
a=48	H = 1.023564866539832
a=96	H = 1.138450553263347
a=192	H = 1.034576090494736
a=300	H = 1.187648983746029
a=396	H = 1.288347651987239
a=504	H = 1.019875498978874

En este caso el valor de H muestra que el parámetro de Hurst está por encima de 1 lo cual indica que la dependencia de rango largo se logra desde los primeros niveles de agregación. Según los resultados obtenidos, la traza presenta autosimilaridad de dependencia de rango largo.

Finalmente para el tercer estimado utilizado que es el estimador varianza tiempo no existe escalamiento, por lo que el resultado del parámetro de Hurst para la traza Star Wars Star Wars IV Single Layer G16B1 QP=1 fue de H = 0.8437085903705014

3.3.2 Análisis de dependencia de Rango Largo para Silence of The Lambs

Los resultados de simulación fueron los siguientes:

Información de la traza:

Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1

Encoder: MPEG-4 Temporal

Variable Bit Rate (VBR)

Frame Size: CIF 352x288

GoP Size: 16

No. B Frames: 1

Quantizer: 01

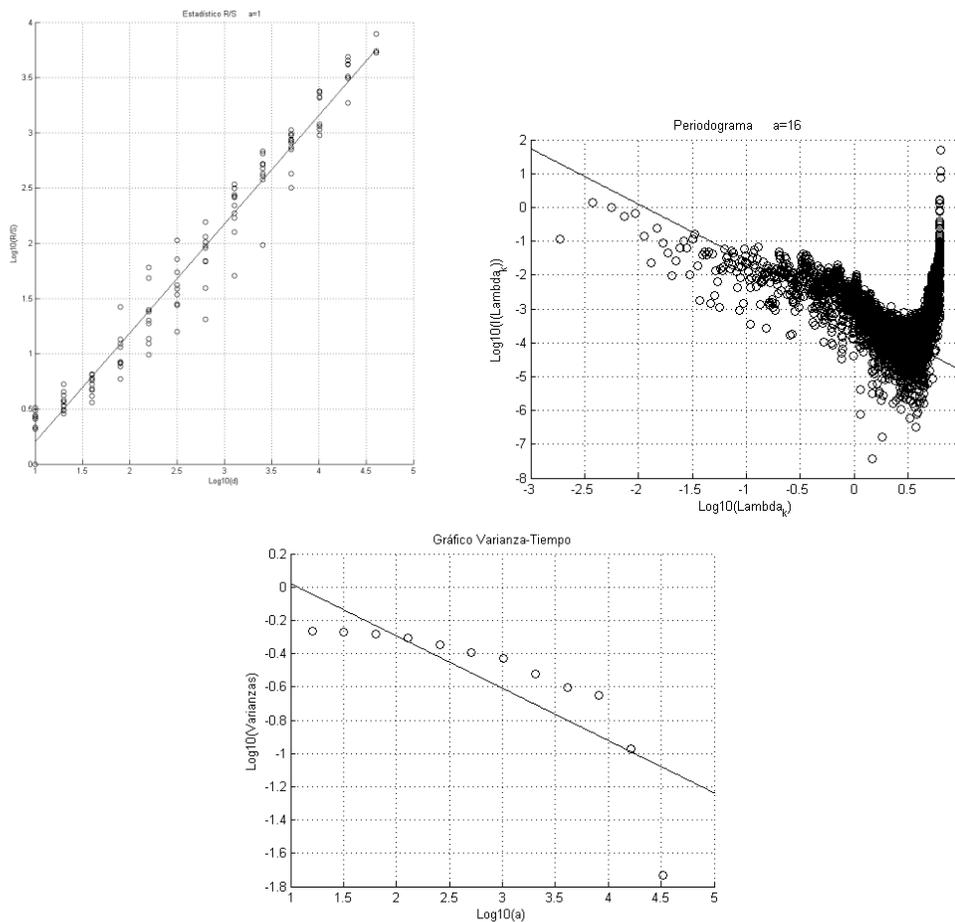
Tabla 5. Resultados de simulación estadístico R/S, periodogramas y varianza tiempo para la traza Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1

Estadístico R/S:	Valor
Número de Fotogramas:	tam = 53953.00
Tamaño Mínimo de Fotograma (Bytes):	ans = 8.00
Tamaño Máximo de Fotograma (Bytes):	ans = 94636.00
Tamaño Promedio de Fotograma (Bytes):	ans = 15531.83
Suma de Tamaños de Fotogramas (Bytes):	ans = 837988578.00
Fotograma Pico Respecto a la Media:	ans = 6.09
Varianza de los Tamaños de los Fotogramas:	S2 = 5631264586.94
Coeficiente de Variación de los Tamaños de los Fotogramas:	CoVx = 0.60
Rata de Bits Promedio (bits/seg):	ans = 3727638.11
Rata de Bits Más Alta (bits/seg):	ans = 22712640.00
Parametro de Hurst (Estadístico R/S)	H = 0.985486317252113

Estadístico Periodogramas:	Valor
n1	1685
Número de Fotogramas:	tam = 53953.00
Tamaño Mínimo de Fotograma (Bytes):	ans = 8.00
Tamaño Máximo de Fotograma (Bytes):	ans = 94636.00
Tamaño Promedio de Fotograma (Bytes):	ans = 15531.83
Suma de Tamaños de Fotogramas (Bytes):	ans = 837988578.00
Fotograma Pico Respecto a la Media:	ans = 6.09
Varianza de los Tamaños de los Fotogramas:	S2 = 5631264586.94
Coeficiente de Variación de los Tamaños de los Fotogramas:	CoVx = 0.60
Rata de Bits Promedio (bits/seg):	ans = 3727638.11
Rata de Bits Más Alta (bits/seg):	ans = 22712640.00
Parametro de Hurst (Estadístico R/S)	H = 1.320861829739100

Estadístico varianza tiempo:	Valor
Número de Fotogramas:	tam = 53953.00
Tamaño Mínimo de Fotograma (Bytes):	ans = 8.00
Tamaño Máximo de Fotograma (Bytes):	ans = 94636.00
Tamaño Promedio de Fotograma (Bytes):	ans = 15531.83
Suma de Tamaños de Fotogramas (Bytes):	ans = 837988578.00
Fotograma Pico Respecto a la Media:	ans = 6.09
Varianza de los Tamaños de los Fotogramas:	S2 = 5631264586.94
Coefficiente de Variación de los Tamaños de los Fotogramas:	CoVx = 0.60
Rata de Bits Promedio (bits/seg):	ans = 3727638.11
Rata de Bits Más Alta (bits/seg):	ans = 22712640.00
Parametro de Hurst (Estadístico R/S)	H = 0.842776422099844

Fig. 16. Gráfica de estadístico R/S, periodogramas y varianza tiempo para la traza Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1y nivel de agregación $a=1$



Para verificar la robustez de del estimador R/S se repite el algoritmo para diferentes niveles de agregación ($a \geq 1$). Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de la traza Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1 con el estadístico R/S.

NIVEL DE AGREGACIÓN	PARÁMETRO H
a=1	H = 0.985486317252113
a=12	H = 0.978467673849996
a=24	H = 0.984352683954022
a=48	H = 0.969039473123575
a=96	H = 0.988494926374784
a=192	H = 0.990236656725471
a=300	H = 0.998556252156353
a=396	H = 1.078599534378472
a=504	H = 1.028467463277823

El valor de H muestra la persistencia de los fenómenos estadísticos de los datos de la traza. Según los resultados obtenidos, la traza presenta autosimilaridad de dependencia de rango largo.

Para el caso del estimador por periodogramas los niveles de agregación que se recomiendan en [13].

Tabla 7. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de la traza Silence of the Lambs Single Layer G16B1 QP=1 con el estadístico Periodogramas.

NIVEL DE AGREGACIÓN	PARÁMETRO H
a=12	H = 1.320861829739100
a=24	H = 1.269845737564321
a=48	H = 1.098476114239831
a=96	H = 1.198475264939386
a=192	H = 1.323274657893736
a=300	H = 1.287693748498602
a=396	H = 1.298387549476872
a=504	H = 1.019897851987439

En este caso el valor de H muestra que el parámetro de Hurst está por encima de 1 lo cual indica que la dependencia de rango largo se logra desde los primeros niveles de agregación. Según los resultados obtenidos, la traza presenta autosimilaridad de dependencia de rango largo.

Para el estimador Varianza tiempo no existe escalamiento por lo que el resultado del estimador es H = 0.842776422099844

Una vez realizado el análisis de autosimilaridad queda demostrada la dependencia de rango largo para las trazas seleccionadas. Los resultados de análisis de parámetro de

Hurst también mostraron que el estimador R/S fue el más consistente, de los tres estimadores, respecto los valores estimados de H (no tan cerca a los valores de 0.5 como se evidenció en el estimador por Varianza tiempo y no superior a 1 como en el caso del estimador por periodogramas).

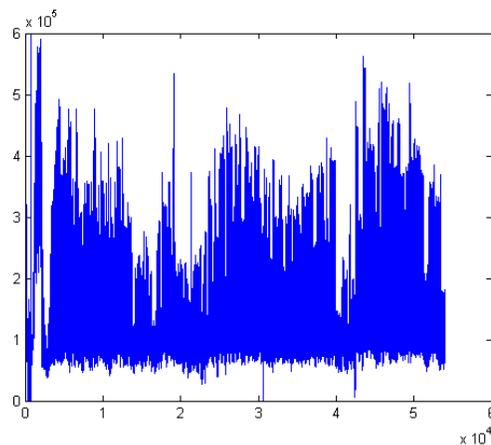
3.4 Análisis de LRD de trazas sintéticas.

Como se mencionó anteriormente se seleccionaron dos modelos de fuente correlacionados para el desarrollo de las fuentes sintéticas y a las cuales se les analizó el respectivo parámetro de Hurst y del cual se obtuvieron los siguientes resultados

3.4.1 Análisis de LRD de trazas sintéticas MMPP.

Esta fuente fue modificada para que el generador arrojara los datos de tamaño de trama de forma aleatoria bajo un modelo MMPP. Los resultados fueron los siguientes:

Fig. 17. Datos generados por generador MMPP para tamaño de paquetes.



Estos datos serán insertados en la traza de Silence of the Lambs la cual fue seleccionada para el proceso de simulación de parámetros de calidad de la traza sintética. Los resultados de análisis de parámetro de Hurst se realizaron sólo con el estimador R/S, ya que se demostró que fue el más consistente con los valores estimados de H (no tan cerca a los valores de 0.5 como se evidenció en el estimador por Varianza tiempo y no superior a 1 como en el caso del estimador por periodogramas).

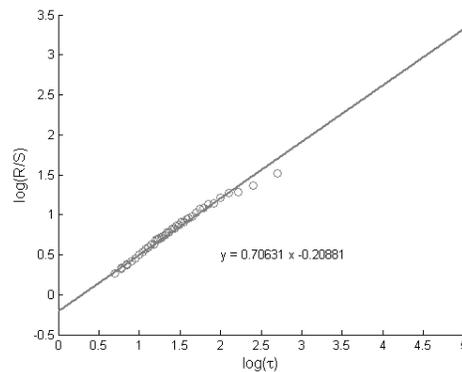
Información de la fuente de tamaños MMPP:

Variable Bit Rate (VBR)

Total de paquetes MMPP:53952

Tabla 8. Resultados de simulación estadístico R/S para los paquetes generados por MMPP

Estadístico R/S:	Valor
Número de paquetes:	tam = 53953.00
Tamaño Mínimo de paquetes (Bytes):	ans = 23.00
Tamaño Máximo de paquetes (Bytes):	ans = 63796.00
Tamaño Promedio de paquetes (Bytes):	ans = 18351.23
Suma de Tamaños de paquetes (Bytes):	ans = 737988578.00
paquetes Pico Respecto a la Media:	ans = 4.09
Varianza de los Tamaños de los paquetes:	S2 = 6264653186.94
Coefficiente de Variación de los Tamaños de los paquetes:	CoVx = 0.60
Rata de Bits Promedio (bits/seg):	ans = 3677328.11
Rata de Bits Más Alta (bits/seg):	ans = 21226740.00
Parámetro de Hurst (Estadístico R/S)	H = 0.70631

Fig. 18. Gráfica del estadístico R/S para los paquetes generados por MMPP para $a=1$.

Para igualar las condiciones de estimación de H , nuevamente se verifica la robustez del estimador R/S al repetir el algoritmo para diferentes niveles de agregación ($a \geq 1$). Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de los datos generados por MMPP con el estadístico R/S.

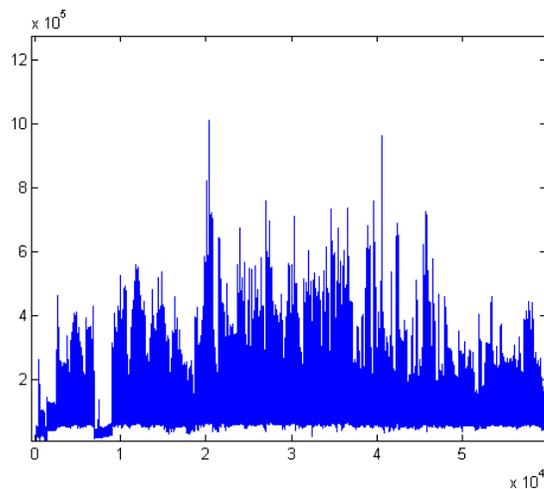
NIVEL DE AGREGACIÓN	PARÁMETRO H
a=1	H = 0.70631
a=12	H = 0.77384
a=24	H = 0.69540
a=48	H = 0.66903
a=96	H = 0.58747
a=192	H = 0.59656
a=300	H = 0.53215
a=396	H = 0.50995
a=504	H = 0.51382

Se hace evidente que, a pesar de haberse generado tamaños de paquetes con las características de la traza real, a partir de un modelo MMPP, al momento de estimar el parámetro de Hurst con el estimador R/S este se acerca al límite inferior de la dependencia de rango largo (0.5).

3.4.2 Análisis de LRD de trazas sintéticas FBM

Esta fuente fue modificada para que el generador arrojara los datos de tamaño de trama de forma aleatoria bajo un modelo FBM. Los resultados fueron los siguientes:

Fig.19. Datos generados por generador FBM para tamaño de paquetes.



Estos datos serán insertados en la traza de Silence of the Lambs la cual fue seleccionada para el proceso de simulación de parámetros de calidad de la traza sintética. Los resultados de análisis de parámetro de Hurst se realizaron sólo con el estimador R/S, ya que se demostró que fue el más consistente con los valores estimados de H (no tan cerca a los valores de 0.5 como se evidenció en el estimador por Varianza tiempo y no superior a 1 como en el caso del estimador por periodogramas).

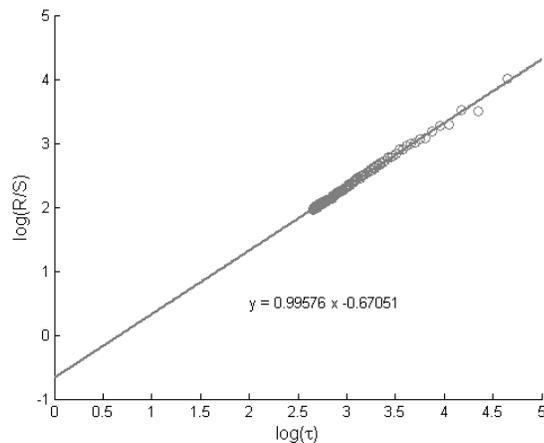
Información de la fuente de tamaños FBM:

Variable Bit Rate (VBR)

Total de paquetes FBM:53952

Tabla 10. Resultados de simulación estadístico R/S para los paquetes generados por FBM

Estadístico R/S:	Valor
Número de paquetes:	tam = 53953.00
Tamaño Mínimo de paquetes (Bytes):	ans = 17.00
Tamaño Máximo de paquetes (Bytes):	ans = 98341.00
Tamaño Promedio de paquetes (Bytes):	ans = 38351.23
Suma de Tamaños de paquetes (Bytes):	ans = 857783798.00
paquetes Pico Respecto a la Media:	ans = 5.88
Varianza de los Tamaños de los paquetes:	S2 = 5326631586.94
Coefficiente de Variación de los Tamaños de los paquetes:	CoVx = 0.61
Rata de Bits Promedio (bits/seg):	ans = 33023638.53
Rata de Bits Más Alta (bits/seg):	ans = 24516654.00
Parametro de Hurst (Estadístico R/S)	H = 0.99576

Fig. 20. Gráfica del estadístico R/S para los paquetes generados por FBM para $a=1$.

Para igualar las condiciones de estimación de H, nuevamente se verifica la robustez del estimador R/S al repite el algoritmo para diferentes niveles de agregación ($a \geq 1$). Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 11. Resultados de estimación de parámetros de Hurst para diferentes niveles de agregación de los datos generados por FBM con el estadístico R/S.

NIVEL DE AGREGACIÓN	PARÁMETRO H
a=1	H = 0.99576
a=12	H = 0.93845
a=24	H = 0.96945
a=48	H = 0.96563
a=96	H = 0.95214
a=192	H = 0.95095
a=300	H = 0.98521
a=396	H = 0.95065
a=504	H = 0.96138

A diferencia de la fuente MMPP, que obtuvo valores de Hurst bastante ajustados al límite inferior de dependencia de rango largo, la fuente FBM obtuvo valores que se acercan al límite superior de la dependencia de rango largo (1). Lo cual muestra que esta fuente es autosimilar de dependencia de rango largo con valores altos de H.

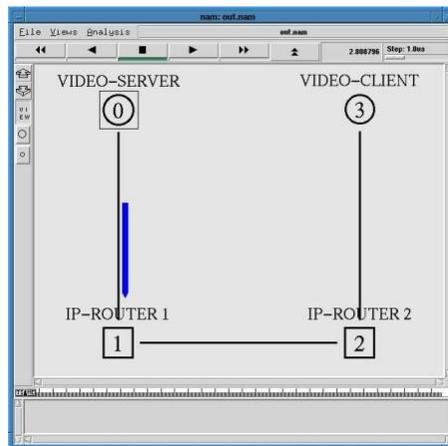
4. Estimación de Parámetros de Calidad de Servicio.

Una vez determinados los datos que serán insertados en la traza real (Silence of the Lambs) para generar las trazas sintéticas, tendremos tres trazas, Silence of the Lambs, Silence of the Lambs MMPP, Silence of the Lambs FBM. El objetivo de esta parte del trabajo es analizar cómo estos tres tipos de trazas se desempeñan en procesos de simulación de tráfico de redes, y como las dos trazas sintéticas pueden representar de forma acertada el tráfico de video y conservando las características de calidad de servicio de la traza original.

Una metodología confiable es fundamental cuando se pretende comparar los resultados obtenidos a partir de una fuente de video sintética que surgió de un modelo matemático, y los resultados obtenidos con la fuente de video real, para así poder determinar cuál modelo matemático es el que más se asemeja al real.

Para el desarrollo de las simulaciones se hará uso del software NS2, el cual es un software que es reconocido por la comunidad científica para el análisis de tráfico en redes de datos. A pesar de no contar con una interfaz gráfica “atractiva” ver fig. 21, su potencia se ve en la capacidad de simular muchos de los fenómenos del tráfico a partir de los datos que caracterizan la naturaleza del mismo.

Fig 21. Interfaz gráfica de NS2, NAM.



El poder determinar las métricas de calidad de servicio como son el PLR, el Delay y el PDV de una red es imprescindible ya que estos parámetros brindan información valiosa

sobre el comportamiento de la red, pero más importante aún es el hecho de que estos parámetros son los que sirven como puntos de comparación entre los resultados obtenidos con las trazas de video producidas por la fuente de video sintética, y las trazas de video producidas por la fuente de video real.

4.1 Métricas de Calidad de Servicio.

Cuando se transmiten datos a través de una red, estos sufren algunos inconvenientes que son propios de las características de la red y el tipo de datos que se transmiten, algunos de estos se pueden utilizar para poder determinar métricas que dictaminan la calidad del servicio, pero un uso más importante para este estudio es el poder utilizar estas métricas para comparar los resultados obtenidos con las fuentes de video sintética y la real, ya que si los modelos matemáticos son correctos las trazas generadas a partir de una fuente sintética basada en los parámetros estadísticos de una fuente de video real al ser transmitidas a través de la red deben tener el mismo comportamiento de las trazas reales de las cuales se basaron; por tal motivo son estas métricas las ideales para la comparación.

Las métricas de calidad del servicio son:

1) *PLR: (Packet Loss Ratio)* Esta medida surge debido a que cuando se transmiten datos en una red, esto se hace en forma de paquetes y muchos de estos llegan al router cuando el buffer está lleno, por tal motivo se presenta un fallo en la transmisión y este paquete se pierde.

La fórmula para determinar el PLR es la siguiente:

$$PLR = \frac{P_p}{P_p + P_r} \quad (33)$$

Donde:

PLR: Es la tasa de pérdida de paquetes.

P_p : Es el número de paquetes perdidos.

P_r : Es el número de paquetes recibidos.

2) *Delay*: Esta medida es determinada por el retardo que sufren algunos paquetes debido a que el buffer estaba lleno o quedo dentro de una cola, otro motivo es que haya tomado una ruta menos directa hacia su destino, indiferente de cuál sea el motivo siempre se genera un retardo y no siempre el retardo es el mismo para todos los paquetes, por este motivo se toma como mediada el promedio de todos los retardos. La fórmula para determinar el Delay es la siguiente:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N} \quad (34)$$

Donde:

D: Delay.

R_i : El retardo de cada paquete.

N: el numero de retardos.

3) *PDV*: (Packet Delay Variation) Este parámetro también es conocido como “Jitter”, pero este término se prefiere evitar ya que el solo llamarlo así causa confusión debido a que de esta manera se le llama a diferentes tipos de variaciones de retardos dependiendo del contexto en el que se utilice, por tal motivo y para ser más precisos se usa el término *PDV* [23].

El *PDV* se debe a que, como se expresó en la definición de Delay, todos los paquetes no tienen el mismo retardo debido a diferentes factores, por este motivo es importante saber que comportamiento tiene la variación de estos retardos. La manera más apropiada de representar el *PDV* es en forma de histograma. La fórmula para determinar el *PDV* es la siguiente:

$$PDV(n) = R(n) - R_{min} \quad (35)$$

Donde:

$PDV(n)$: Es la variación del retardo de cada paquete.

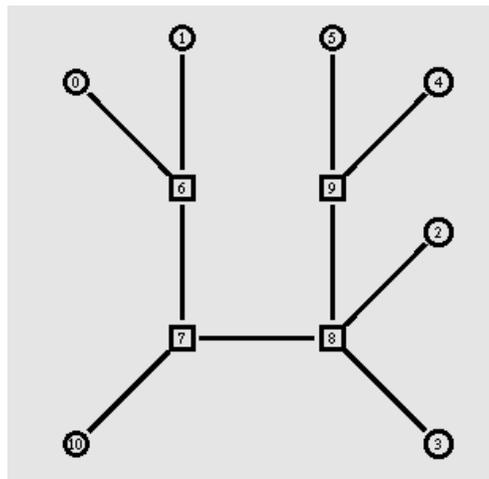
$R(n)$: Es el retardo de cada paquete.

R_{min} : Es el retardo mínimo.

Como se puede apreciar esta fórmula es un caso particular de la expresión matemática del *Jitter Periódico*, solo que en este caso se toma como retardo ideal al menor de todos los retardos y a partir de este se determina la variación de todos los retardos.

La representación en forma de histograma de cada uno de los *PDVs* se debe a que brinda mucha más información sobre el comportamiento de los retardos ya que se pueden apreciar de forma más clara [23], además el histograma proporciona una buena estimación de la función de densidad de probabilidad [5].

Antes de iniciar se debe tener en muy clara la topología que se pretende usar en la simulación, dado que no pueden existir confusiones sobre esta debido a que la plataforma sobre la cual se simulara es el programa NS2 el cual aunque es una herramienta potente a la hora de simular redes y es uno de los más reconocidos en el área de la investigación, como se mencionó anteriormente, no cuenta con una buena interfaz gráfica, por este motivo es esencial tener desde el principio claridad sobre la topología a implementar. En este trabajo se utilizó la topología de la Fig.22.

Fig.22. Topología de la red implementada en NS2

Donde el nodo número 10 es el servidor desde el cual se transmitirá las trazas de video, los nodos 0, 1, 2, 3, 4, 5 serán los clientes y los nodos 6, 7, 8, 9 representan los routers.

La configuración de la simulación incluye la creación del archivo donde quedarán todas las métricas de tráfico de la simulación de las trazas de video en la red (*out.tr*), seguidamente se definen los nodos y las conexiones entre ellos, en los cuales se determinan las características del medio como el ancho de banda digital, y el retardo que inserta el medio por propagación, además si el canal es full a half dúplex.

En la configuración de la simulación también se le debe dar un manejo a las colas (*Drop Tail*). El Drop Tail incluye la manera de manejar el desbordamiento de las colas cuando la capacidad del buffer en el nodo de salida es excedido, Drop Tail hace un manejo de colas tipo FIFO (primero en llegar Primero en salir) pero existen otros tipos de manejo de colas como por ejemplo:

- RED (Random Early Discard)
- FQ (Fair Queuing)
- DRR (Deficit Round Robin)
- SFQ (Stochastic Fair Queuing)

Dependiendo del tipo de manejo de cola que se realice los resultados del PLR, el Delay y el PDV serán completamente diferentes ya que esto afecta directamente al número de paquetes que se pierden en una conexión y afecta aún más al retardo que se puede dar en una conexión debido a que los paquetes pueden permanecer más tiempo en el buffer. Por eso es importante que las condiciones de configuración de la simulación sea las mismas para las tres trazas que serán analizadas

También es importante darle un tamaño al buffer de cada conexión, por ejemplo, se limita el buffer de la conexión entre los nodos s0 y router1 a solo 20 paquetes. De igual modo el tamaño del buffer

puede afectar de manera directa las métricas que se pretenden determinar. Por eso se reitera que las condiciones de simulación para las tres trazas de video deben ser las mismas.

Ya lo que resta es determinar el tipo de protocolo que se implementara en la red ya sea UDP o TCP, por último, se genera el tráfico con las trazas de video ya sean de una fuente de video real o sintética.

Una vez la simulación es puesta a funcionar, se va generando el archivo de salida out.tr del cual se obtendrán todas las métricas. La estructura del archivo de traza out.tr es dada de la forma siguiente:

Fig.23. Formato del archivo out.tr

```
<event> <time> <from> <to> <pkt> <size>--<flowid> <src>
<dst> <seqno> <aseqno>
+ 1          0 2 tcp 900 ----- 1 0.0 3.1 7 15
- 1          0 2 tcp 900 ----- 1 0.0 3.1 7 15
r 1.00234 0 2 tcp 900 ----- 1 0.0 3.1 7 15
```

La primera columna identifica el tipo de evento. Este es dado por uno de los 4 posibles símbolos *r*, *+*, *-*, *d* que corresponden respectivamente a paquete recibido, paquete encolado, paquete que sale de la cola y paquete descartado. La siguiente columna proporciona el instante de tiempo en que ocurre el evento. La tercera y cuarta columna determinan entre que nodos está sucediendo el evento.

La siguiente columna da el tipo de paquete (por ejemplo, UDP o TCP) y la sexta el tamaño del paquete. Posterior al tamaño del paquete viene una columna dedicada a *flags*, que pueden indicar notificaciones relacionada con la congestión o con la prioridad del paquete, entre otros. A continuación de ésta, el identificador de flujo de IPv6 que un usuario puede establecer para cada flujo. La novena y décima columna identifican al nodo fuente y al nodo destino. La penúltima columna es un número de secuencia del paquete. La última columna muestra el identificador único de cada paquete creado en la simulación.

Para obtener los datos necesarios para la determinación de las métricas se procede con un filtrado de los datos que contiene el archivo out.tr lo cual se logra con una función de Linux llamada *grep*. El comando *grep* nos permite buscar, dentro de los archivos, las líneas que concuerdan con un patrón. Si no se especifica ningún nombre de archivo, tomará la entrada estándar, con lo que se puede encadenar con otros filtros.

Por defecto, *grep* imprime las líneas encontradas en la salida estándar. Es decir, que se puede ver directamente en la pantalla, o re direccionar la salida estándar a un archivo. Como *grep* tiene muchas opciones, se verán sólo las más usadas:

-c En lugar de imprimir las líneas que coinciden, muestra el número de líneas que coinciden.

-e PATRON permite especificar varios patrones de búsqueda o proteger aquellos patrones de búsqueda que comienzan con el signo `-`.

-r busca recursivamente dentro de todos los subdirectorios del directorio actual.

-v muestra las líneas que no coinciden con el patrón buscado.

-i ignora la distinción entre mayúsculas y minúsculas.

-n Numera las líneas en la salida.

-o le indica a *grep* que muestre sólo la parte de la línea que coincide con el patrón.

Para obtener el PLR del archivo `out.tr` se utilizan los siguientes fragmentos de código en el terminal de Linux.

```
grep "^r" out.tr | grep "8 3 tcp" | grep "10.03.0" > rec.tr
grep -c "^r" rec.tr
grep "^d" out.tr | grep "10.0 3.0" | grep "tcp" > lost.tr
grep -c "^d" lost1.tr
```

La primera línea guarda en un archivo llamado *rec.tr* todas las líneas que empiezan por la letra *r* (recibidos) y que al mismo tiempo en dicha línea contienen las siguientes secuencias de caracteres *8 3 tcp* y *10.0 3.0* que en el archivo `out.tr` se verían así:

```
r 0.190117 8 3 tcp 40 ----- 1 10.0 3.0 0 0
```

Resaltando las secuencias de caracteres se verían así:

```
r 0.190117 8 3 tcp 40 ----- 1 10.0 3.0 0 0
```

la segunda línea cuanta el número de líneas que contienen la letra *c* en el archivo *rec.tr* el cual contiene las trazas de los paquetes recibidos.

Esta primera línea solo entrega los paquetes recibidos de tipo TCP que se enviaron desde el nodo 10 al nodo 3 y cuyo último tramo fue desde el nodo 8 hacia el nodo 3 en pocas palabras solo los paquetes recibidos por el cliente.

La tercera línea guarda el número de líneas que empiezan por la letra *d* (descartados) que cumple con la secuencia de caracteres *10.0 3.0* y *tcp* que en el archivo *out.tr* las cuales se verían así:

```
d 0.19019 8 9 tcp 40 ----- 1 10.0 3.0 0 1
```

Resaltando las secuencias de caracteres se verían así:

```
d 0.19019 8 9 tcp 40 ----- 1 10.0 3.0 0 1
```

Análogamente la cuarta línea de código cuenta el número de líneas que empiezan por la letra **d**.

El resultado se interpreta como el número de paquetes descartados o perdidos del tipo TCP cuyo nodo de origen es el 10 y cuyo nodo destino es el 3 en pocas palabras todos los paquetes descartados en la red que cumplen con las condiciones anteriores.

Como ya se cuenta con el número de paquetes perdidos y el número de paquetes recibidos solo resta reemplazarlos en la ecuación 1 para obtener el PLR.

Para obtener el Delay y el PDV con el archivo out.tr se utilizan los siguientes fragmentos de código en el terminal de Linux.

```
grep "^r" out.tr | grep "8 3 tcp" | grep "10.0  
3.0" > rec.tr
```

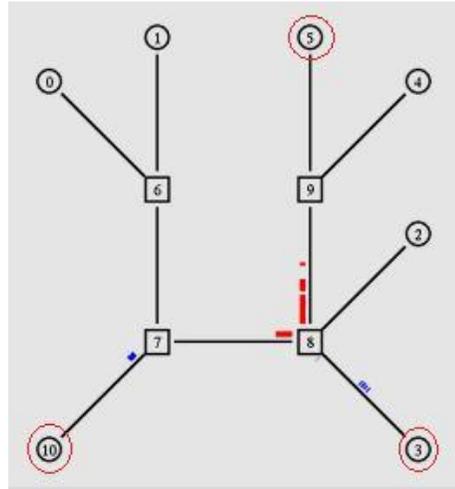
Como puede notarse no hay diferencia entre el código que se usó para determinar el número de paquetes perdidos excepto en que en este no cuenta el número de coincidencias solo guarda cada línea que cumpla con las condiciones en un archivo llamado *rec.tr* a continuación se muestra un fragmento de este archivo.

La columna 2 de este archivo es el tiempo en el cual los paquetes son recibidos por el cliente, teniendo en cuenta esto se procede con determinar cuál es el retardo entre paquete y paquete lo cual se logra restándole al tiempo de llegada de cada paquete el tiempo de llegada del paquete inmediatamente anterior, con esto ya se cuenta con todos los retardos de los paquetes recibidos por lo cual se puede implementar en MATLAB un algoritmo que realice el promedio de todos los retardos como lo muestra la ecuación del Delay.

Como ya se cuenta con todos los retardos en el mismo algoritmo se puede implementar la ecuación del PDV. Determinando el mínimo de todos los retardos y restándolo a los demás luego de esto solo se hace el histograma y ya se cuenta con el PDV.

4.2 Determinación de Delay, PDV y PLR para traza real y las trazas sintéticas en NS2.

Al simular la red creando un tráfico de video desde el nodo 10 que toma el papel de servidor, hacia los nodos 3 y 5 quienes hacen el papel de clientes como se muestra en la figura 25.

Fig.24. Simulación en proceso.

Para esta red se realizaron diferentes simulaciones, un total de 4, en las cuales se realizaron diferentes tipos de variaciones a la red como por ejemplo el protocolo de transmisión, el ancho de banda, el retardo entre los puntos y el manejo de colas, aclarando que las tres trazas siempre se trabajaban en las mismas condiciones. Se hizo uso de un algoritmo implementado en MATLAB que hace uso de los archivos que contienen los paquetes recibidos por los nodos 3 y 5, para determinar Delay y PDV de estos.

1) *Simulación 1*: esta simulación se tomará como punto de referencia para hacer la comparación con las demás, ya que a partir de ella se harán modificaciones de parámetros en la red relacionadas con capacidades de los canales, tamaño de buffer, drop tail, entre otros.

Las características de red son:

Protocolo de transmisión UDP, ancho de banda entre servidor y router de 10Mb/s, ancho de banda entre cualquiera de los routers y un cliente 10Mb/s, ancho de banda entre router y router 6Mb/s, con un retardo de 50 ms entre cualquiera de los nodos con sus nodos adyacentes, un manejo de las colas con un protocolo Drop Tail (FIFO) y un buffer para todos los enlaces de 20 paquetes.

2) *Simulación 2*: para esta simulación se modificó el tamaño de los buffers de 20 paquetes a solo 10 los demás datos se mantuvieron tal cual se dan en la simulación 1.

3) *Simulación 3*: para esta simulación se modificó el tamaño del ancho de banda entre cada cliente y el router al cual se conecta, esta conexión se reducirá de 10 Mb/s a 1Mb/s los demás datos se mantuvieron tal cual se dan en la simulación 1.

4) *Simulación 4*: para esta simulación se modificó el tamaño y el manejo de las colas reemplazando Drop Tail por SFQ SFQ (Stochastic Fair Queuing), los demás datos se mantuvieron tal cual se dan en la simulación 1.

5. Análisis de Resultados, Conclusiones y recomendaciones.

5.1 Análisis de Resultados.

5.1.1 Resultados de las simulaciones con la traza real Silence of The Lambs

Después de desarrollar las simulaciones bajo las condiciones de cada una de las cuatro simulaciones propuestas en el numeral 4.2, se obtienen los siguientes resultados.

Simulación 1

□ Para el cliente del nodo 5:

$$P_r = 27962$$

$$P_p = 1$$

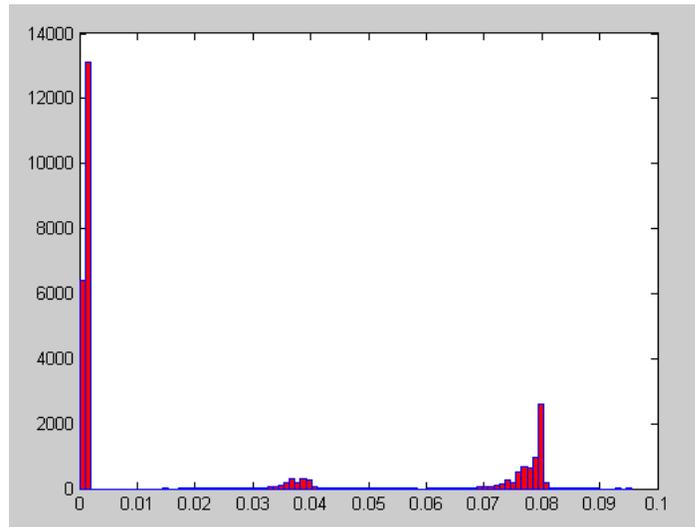
Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene como resultado.

$$\text{PLR} = 3.576154204 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Delay} = 0.0214 \text{ ms}$$

Respecto al **PDV** los resultados se observan el fig.26

Fig. 25. Histogramas de PDV's del nodo 5 de la red implementada en NS2 en la simulación 1 para la traza real Silence of the Lambs.



En el histograma de la figura 26 puede notarse que la mayoría de los paquetes tienen muy poca variabilidad ya que la mayor concentración de estos se presenta cerca al punto de origen por debajo de los 2ms, pero aun así se presentan concentraciones de importancia después de los 30ms y los 70ms, pero esto es natural debido a la forma como son transmitidos los paquetes ya que estos son transmitidos uno tras otro como un "tren" donde cada "tren" de paquetes es un fotograma y entre cada paquete y paquete de estos "trenes" hay retardos muy pequeños, por este motivo es que se presentan concentraciones tan altas tan cerca del origen, las concentraciones superiores se pueden deber al tráfico simultaneo desde la misma fuente a diferentes clientes y al hecho que entre fotograma y fotograma hay un retardo de tiempo de 80ms en las trazas de video que se implementaron en la simulación tal y como se evidencia en el histograma pues existe una gran concentración cerca de este valor de retardo.

□ Para el cliente del nodo 3:

$$P_r = 43077$$

$$P_p = 758$$

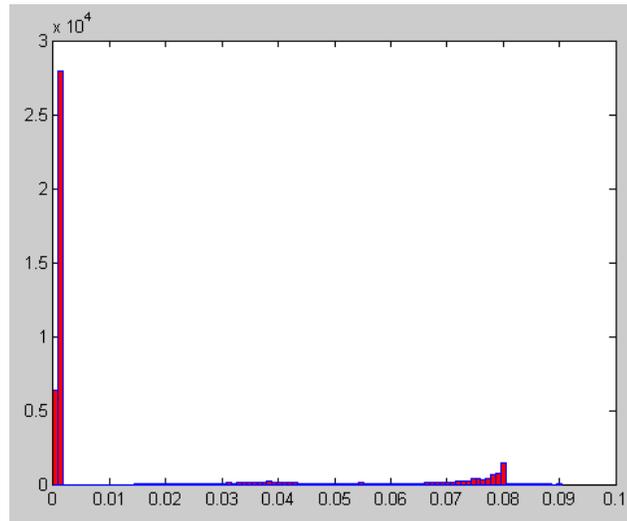
Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene como resultado.

$$\text{PLR} = 0.017292118$$

$$\text{Delay} = 0.01392$$

Histograma **PDV** (ver fig. 27.)

Fig. 26. Histograma de PDVs del nodo 3 de la red implementada en NS2 en la simulación 1 para la traza real Silence of the Lambs



Al momento de simular este cliente del nodo 3 presenta un mayor nivel de prioridad, por el número de saltos en la red desde la fuente de video (nodo 10), esto se puede notar ya que se envían muchos más paquetes desde la fuente de video hacia este cliente por este motivo es que la mayor concentración de retardos de paquetes está tan cerca del origen y las concentraciones que se presentan por encima de la concentración principal son mínimas pero aun así se vuelve a presentar un gran número de retardos alrededor de los 70ms lo cual nuevamente puede deberse al retardo entre fotogramas y al tráfico simultáneo.

Simulación 2

□ Para el cliente del nodo 5:

$$P_r = 27329$$

$$P_p = 634$$

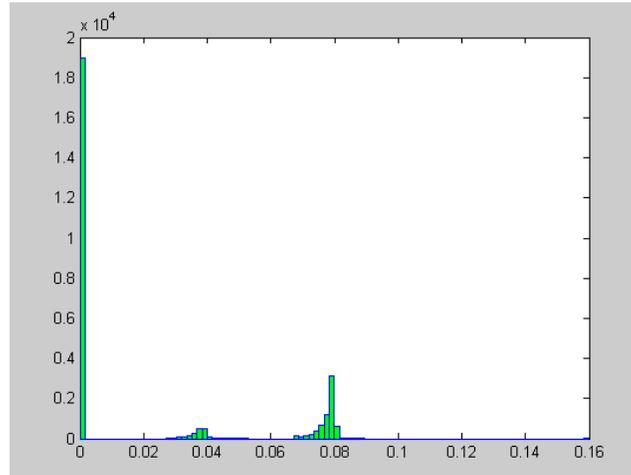
Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene como resultado.

$$PLR = 0.022672817$$

$$Delay = 0.0219$$

Histograma PDV (ver fig. 28.)

Fig. 27. Histogramas de PDV's del nodo 5 de la red implementada en NS2 en la simulación 2 para la traza real Silence of the Lambs.



Comparando con el mismo cliente de la simulación 1 puede notarse que en lo referente al retardo no existe mucha diferencia entre las dos simulaciones ya que se presentan comportamientos muy similares, pero aun cuando en los retardos no se puede evidenciar diferencias claras o muy marcadas si pueden notarse en el PLR y esto se debe a que se presenta una mayor pérdida de paquetes debido a la reducción significativa del buffer.

□ Para el cliente del nodo 3:

$$P_r=36855$$

$$P_p= 6980$$

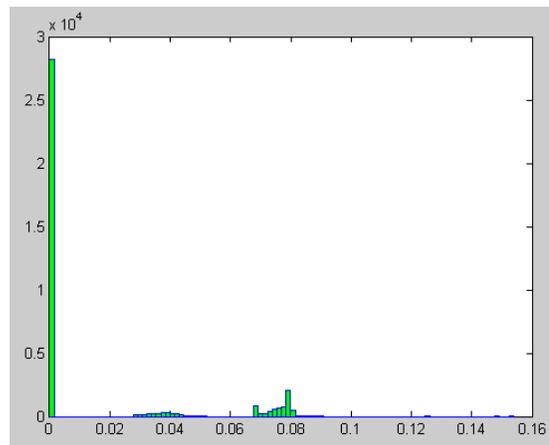
Reemplazando en la ecuación 1 obtiene como resultado.

$$\text{PLR}=0.159233489$$

$$\text{Delay}= 0.0163$$

Histograma **PDV** (ver fig. 29.)

Fig. 28. Histograma de PDVs del nodo 3 de la red implementada en NS2 en la simulación 2 para la traza real Silence of the Lambs



Al comparar los datos obtenidos en la simulación 2 con los de la simulación 1 se puede notar que nuevamente se presenta el mismo comportamiento para este cliente con respecto a los retardos

pero el PLR sufrió una gran variación lo cual es natural debido a la reducción del buffer.

Simulación 3

Para el cliente del nodo 5:

$$P_r = 27446$$

$$P_p = 517$$

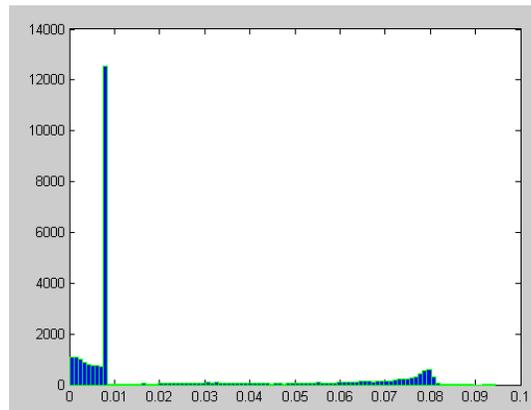
Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene como resultado.

$$\text{PLR} = 0.018488717$$

$$\text{Delay} = 0.0219$$

Histograma **PDV** (ver fig. 30.)

Fig 29. Histogramas de PDV's del nodo 5 de la red implementada en NS2 en la simulación 3 para la traza real Silence of the Lambs.



Para el cliente del nodo 3:

$$P_r = 37674$$

$$P_p = 6159$$

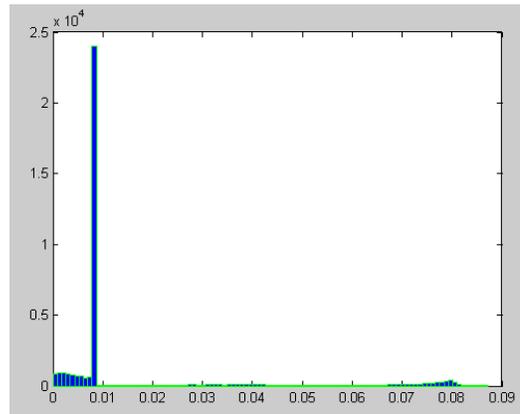
Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene como resultado.

$$\text{PLR} = 0.140510574$$

$$\text{Delay} = 0.0159$$

Histograma **PDV** (ver fig. 31.)

Fig. 30. Histograma de PDVs del nodo 3 de la red implementada en NS2 en la simulación 3 para la traza real Silence of the Lambs



En el resultado obtenido para los clientes 3 y 5 en la simulación 3 es evidente el comportamiento similar, aunque en escalas diferentes, del PDVs de las Fig. 27 y 28. Es mucho más desfavorable respecto al comportamiento que se presentó en la simulación 1, de igual manera los PLRs de ambos clientes se ven afectados, todo esto debido al ancho de banda reducido.

Para el cliente del nodo 5:

$$P_r = 27898$$

$$P_p = 65$$

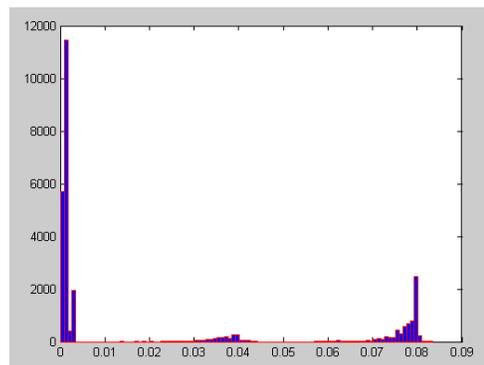
Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene como resultado.

$$\text{PLR} = 2.324500232 \times 10$$

$$\text{Delay} = 0.0215$$

Histograma PDV (ver fig. 32.)

Fig 31. Histogramas de PDV's del nodo 5 de la red implementada en NS2 en la simulación 4 para la traza real Silence of the Lambs.



□ Para el cliente del nodo 3:

$$P_r = 41439$$

$$P_p = 2396$$

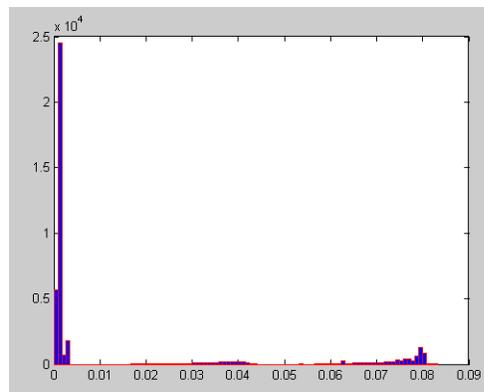
Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene como resultado.

$$\mathbf{PLR} = 0.054659518$$

$$\mathbf{Delay} = 0.0145$$

Histograma **PDV** (ver fig. 33.)

Fig. 32. Histograma de PDVs del nodo 3 de la red implementada en NS2 en la simulación 4 para la traza real Silence of the Lambs.



En los resultados obtenidos en la simulación 4 se pueden notar grandes distorsiones en las gráficas de los PDVs de las figuras 29 y 30 con respecto a las gráficas de las figuras 23 y 23 respectivamente de la simulación 1, aun cuando el comportamiento es muy similar de igual manera los PLRs se ven afectados de forma desfavorable debido a un número mayor de paquetes perdidos con respecto a los de la simulación 1.

5.1.2 Contraste de resultados de las Simulaciones con trazas sintéticas MMPP y FBM de Silence of The Lambs

Una vez realizados los mismos cálculos de P_r , P_p , PLR, Delay e Histograma PDV, para las trazas sintéticas MMPP y FBM de Silence of The lambs, se obtuvieron los siguientes resultados que se resumen en las tablas 10 y 11 junto con los datos obtenidos para la traza real:

Nodo 5:

Tabla 12. Contraste de resultados de las Simulaciones con trazas sintéticas MMPP y FBM de Silence of The Lambs para el nodo 5.

Parámetro QoS	Simulación1			Simulación2			Simulación3			Simulación4		
	Traza Real	Traza MMPP	Traza FBM	Traza Real	Traza MMPP	Traza FBM	Traza Real	Traza MMPP	Traza FBM	Traza Real	Traza MMPP	Traza FBM
P_r	27962	21509	27329	27329	21595	27474	27446	22618	27269	27898	20829	27807
P_p	1	6454	876	634	6368	489	517	5345	694	65	7134	156
PLR	3,5762 E-05	0,2308 05	0,03105 83	0,02267 28	0,22772 95	0,01748 74	0,01848 87	0,19114 54	0,02481 85	0,00232 45	0,25512 28	0,00557 88
Delay	0,0214	0,0289	0,022	0,0219	0,0304	0,0216	0,0219	0,0284	0,0215	0,0215	0,0222	0,0219
PDV	0,0001 2	0,0004 5	0,00022	0,00013	0,00067	0,00012	0,00012	0,00048	0,00013	0,00012	0,00013	0,00013

Nodo 3:

Tabla 13. Contraste de resultados de las Simulaciones con trazas sintéticas MMPP y FBM de Silence of The Lambs para el nodo 3.

Parámetro QoS	Simulación1			Simulación2			Simulación3			Simulación4		
	Traza Real	Traza MMPP	Traza FBM	Traza Real	Traza MMPP	Traza FBM	Traza Real	Traza MMPP	Traza FBM	Traza Real	Traza MMPP	Traza FBM
P_r	43077	38203	42848	36855	32589	37460	37676	33468	37849	41439	39103	41430
P_p	758	5632	987	6980	11246	6375	6159	10367	5986	2396	4732	2405
PLR	0,017292 12	0,12848 18	0,02251 63	0,15923 35	0,2565 53	0,14543 17	0,14050 42	0,23650 05	0,13655 75	0,05465 95	0,10795 03	0,05486 48
Delay	0,01392	0,02001	0,01578	0,0163	0,0193 8	0,01629	0,0159	0,01356	0,0176	0,0145	0,0203	0,01302
PDV	0,00013	0,00045	0,00023	0,00022	0,0003 6	0,00019	0,00019	0,00042	0,00019	0,00015	0,00023	0,00015

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Se presenta una metodología que pretende desarrollar fuentes sintéticas de video de manera sencilla, buscando dar respuesta a la dificultad de disponer de fuentes de tráfico de video más diversas para el desarrollo de simulaciones que sean más acertadas para representar este tipo de tráfico. Esta metodología será punto de partida de desarrollo de otros trabajos de investigación que profundicen en la temática propuesta

En el presente trabajo se analizaron diferentes tráficos generados a partir de trazas de video, para encontrar algunas de sus propiedades estadísticas, como la autosimilaridad. En todos los casos el parámetro de Hurst ha sido mayor a 0,5, por lo que se puede inferir que el tráfico de video presenta un comportamiento autosimilar de dependencia de rango largo, confirmando que inclusive el modelo MMPP puede ser representativo del tráfico de video, como algunos autores lo mencionaron, pero con evidencias de LRD bajas, lo que no lo hace el más adecuado.

Esta Autosimilaridad se detecta a diferentes escalas ya sea de milisegundos a horas, por lo tanto la cantidad de valores que se tomen no afecta las diferentes simulaciones y cálculos.

Los modelos de tráfico no correlacionados (procesos de renovación, en especial el proceso de Poisson) ofrecen una gran tratabilidad matemática, pero no son capaces de capturar muchas de las características más relevantes del tráfico moderno, en particular las asociadas con la Autocorrelación observada en el tráfico real.

El modelo MMPP si posee una Autosimilaridad con H superior a 0,5, cercana a la del tráfico de video, y tal vez por eso es un modelo propuesto para modelar el tráfico de video, pero existe un problema, su correlación decrece de manera exponencial lo que indica una dependencia de rango corto bastante marcada, y es opuesto a lo visto en el comportamiento del tráfico de video real cuya correlación cae de manera hiperbólica.

El modelo MMPP presenta algunas de las características del tráfico de video pero de forma dimensionada en escalas de tiempo cortas. Por el contrario, la comparación de las características estadísticas que muestra el tráfico generado por el modelo FBM presenta

características más similares al tráfico real de video por estar dimensionada en escalas de tiempo largas, por lo anterior se ha demostrado la posibilidad de modelar el tráfico de video mediante Movimiento Browniano Fraccional.

Para medir la fidelidad de las fuentes sintéticas de tráfico de video es necesario considerar su efecto en el desempeño de las redes de telecomunicaciones, para lo cual se hizo necesaria la realización de simulaciones usando en conjunto Network Simulator y Matlab en diferentes escenarios.

La aparición de los modelos fractales en el campo de la modelación estocástica del tráfico ha resultado fundamental, debido a su capacidad de exhibir dependencia de rango largo sobre todas las escalas temporales mediante el uso de pocos parámetros.

Según el análisis y el estudio de modelos matemáticos empleados para el tráfico multimedial en redes, los modelos correlacionados con LRD son los más adecuados ya que presentan correlación en los modelos de tráfico, debido a que la llegada de paquetes se encuentra fuertemente correlacionada.

Al observar las imágenes de todos los histogramas puede notarse que todos tienen una concentración de retardos alrededor de los 80ms, lo cual coincide con el retardo que existe entre fotograma y fotograma que es de 80ms, lo cual indica que el comportamiento de las trazas es reflejado en el momento de la transmisión.

Las grandes concentraciones que se presentan cerca del origen en la gráfica de los histogramas, se deben a que por cada fotograma se envía un grupo de paquetes y el retardo entre los paquetes pertenecientes a estos grupos es muy pequeño.

Al contrastar los resultados de las simulaciones de las dos fuentes sintéticas en los diferentes escenarios de red, se observan los evidentes efectos de la fuente MMPP en parámetros como el PLR y el PDV, este fenómeno se debe al hecho de que una mayor aleatoriedad y una menor autosimilaridad generan paquetes de tamaños más grandes lo que afecta directamente métricas como el retardo y su variación.

La variación del retardo y la tasa de paquetes perdidos elevada en comparación con la traza real de video, muestran que modelos con bajo LRD tienen impacto significativo en la calidad de servicio de aplicaciones como el streaming y videoconferencia. Los cuales requieren una alta estabilidad en el retardo para el cálculo del buffer.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda avanzar en otros modelos matemáticos que puedan ampliar el trabajo con fuentes sintéticas y ajustarlas a parámetros estadísticos de diferentes tipos de escenas y películas. Esto se podría lograr haciendo una caracterización de diferentes estilos de escenas versus los parámetros estadísticos de las mismas.

Bibliografía

- [1] Alzate Marco, Peña Nestor, Modelos de Tráfico en Análisis y Control de Redes de Comunicaciones.
- [2] K. Park and W. Willinger, "Self-similar network traffic: an overview", in Self-similar network traffic and performance evaluation}. Edited by K. Park and W. Willinger, Wiley, New York, 2000, pp. 1-38.
- [3] J. Beran, R. Sherman, and W. Willinger, Long Range Dependence in Variable Bit Rate Video traffic, IEEE Trans. Commun., 43(3):1566, 1995.
- [4] M.E. Crovella and A. Bestavros, Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes . In Proc. ACM SIGMETRICS '96, p. 160, 1996.
- [5] N.G. Duffield, J.T. Lewis, N. O'Connell, R. Russell, and F. Toomey, Predicting quality of service for traffic with long-range fluctuations. In Proc. IEEE ICC, Seattle, WA, 1995.
- [6] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, And D.V. Wilson, On The self-similar nature of Ethernet traffic (extended version) IEEE/ACM Trans. Networking, 2((1):1, 1994.
- [7] Hae-Duck J. Jeong, Jong-Suk R. Lee, Don McNickle, Krzysztof Pawlikowski, Suggestions of efficient self-similar generators Simulation Modelling Practice and Theory, vol 15, 2007. Science Direct.
- [8] Guang-Liang Li and Victor O.K. Li, "Análisis Of Transient Loss Performance Impact Of Long-Range Dependence in Network Traffic" in Self-Similar Network Traffic And Performance Evaluation, edited by K. Park and W. Willinger Jhon Wiley & Sons, Inc. 2000, pp 319 - 347.
- [9] Ramírez Pacheco Julio César and Torres Román Deni, Local and Cumulative Analysis of Self-similar Traffic Traces, IEEE Computer Society Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP 2006).
- [10] Daniel P. Heyman, T.V. Lakshman, "Long-range Dependence and queueing effects for VBR Video", in Self-similar network traffic and performance evaluation, edited by K. Park and W. Willinger, Wiley, New York, 2000, pp. 285-318.
- [11] José C. López-Ardao, Pablo Argibay-Losada, and Raúl F. Rodríguez-Rubio, "On Modeling MPEG Video at the Frame Level Using Self-Similar Processes", V. Roca and F. Rousseau (Eds.): MIPS 2004, LNCS 3311, pp. 37-48, 2004
- [12] ITU-D, Study Group 2, Question 16/2 Handbook, TELETRAFFIC ENGINEERING" UIT, June 2006.
- [13] Seeling Patrick, H.P. Fitzek Frank, Reisslein Martin. Video Traces For Network. Performance Evaluation. Published by Springer, Dordrecht, The Netherlands. 2007.
- [14] Savera Tanwir and Harry Perros, Fellow, IEEE. A Survey of VBR Video Traffic Models. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 15, NO. 4, FOURTH QUARTER 2013.
- [15] [Frost'94] Frost, V. S. y Melamed, B., "Traffic Modeling for Telecommunications Networks", IEEE, Communications Magazine, Marzo, 1994, pp. 70-81.

- [16] Sheluhim, Oleg I., Smolskiy, Sergey M., Osin, Andrey V. *Self-similar Processes in Telecommunications*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2007.
- [17] M. Alzate. "Simulation model for MPEG-II Video Traffic", ENEE 608 class project final report, University of Maryland, spring 1998.
- [18] Shahram Shah-Heydari, Tho Le-Ngoc. MMPP models for multimedia traffic. *Telecommunication Systems*. December 2000, Volume 15, Issue 3–4, pp 273–293. Springer.
- [19] Daniel P. Heyman and David Lucantoni. Senior Member Modeling Multiple IP Traffic Streams With Rate Limits, IEEE. IEEE/ACM TRANSACTION ON NETWORKING, VOL 11 NO 6, DECEMBER 2003.
- [20] <https://es.mathworks.com/help/wavelet/ref/wfbm.html>.
- [21] Abry, P.; F. Sellan (1996), "The wavelet-based synthesis for the fractional Brownian motion proposed by F. Sellan and Y. Meyer: Remarks and fast implementation," *Appl. and Comp. Harmonic Anal.*, 3(4), pp. 377–383.
- [22] Bardet, J.-M.; G. Lang, G. Oppenheim, A. Philippe, S. Stoev, M.S. Taqqu (2003), "Generators of long-range dependence processes: a survey," *Theory and applications of long-range dependence*, Birkhäuser, pp. 579–623.
- [23] Network Working Group, A. Morton. "Packet Delay Variation Applicability Statement", AT&T Labs Request for Comments 5481, pag. 4, 11-13.
- [24] "A Guide to Understanding and Characterizing Timing Jitter". Tektronix Inc. Firmenschrift, 2003, pp. 8.
- [25] Jun Du, Chunxiao Jiang, YiQian, Zhu Han, *Fellow, IEEE*, and Yong Ren, Resource Allocation With Video Traffic Prediction in Cloud-Based Space Systems. IEEE TRANSACTIONS ON MULTIMEDIA, VOL. 18, NO. 5, MAY 2016.
- [26] Liji P I, Dipin A, Real Time Data Traffic Analysis Using Poisson Process in Next Generation Network. 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICT).
- [27] Pu Wang and Ian F. Akyildiz, On the Stability of Dynamic Spectrum Access Networks in the Presence of Heavy Tails. IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 14, NO. 2, FEBRUARY 2015