

# Extended Evaluation of Loss-Based TCP Variants Performance Over Optical Burst Switching (OBS) Networks for Case

$$W_x = W_{max}$$

*Evaluación Extendida del Desempeño de las Variantes de TCP Basadas en Pérdidas sobre Redes de Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS, Optical Burst Switching) para el Case de*

$$W_x = W_{max}$$

## ARTICLE HISTORY

Received 30 September 2021

Accepted 23 November 2021

### Antonio Venegas

Facultad de Ingeniería  
Pontificia Universidad Católica del Ecuador  
Quito, Ecuador  
toni.venegas78@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-4981-1045

### Paola Venegas

Facultad de Ingeniería  
Pontificia Universidad Católica del Ecuador  
Quito, Ecuador  
pao\_vl87@hotmail.com

### Vinicio Freire

Sin afiliación  
Quito, Ecuador  
vini\_freire@yahoo.com  
ORCID: 0000-0002-3995-4704

# Evaluación Extendida del Desempeño de las Variantes de TCP Basadas en Pérdidas sobre Redes de Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS, Optical Burst Switching) para el Case de $W_x=W_{max}$

## Extended Evaluation of Loss-Based TCP Variants Performance Over Optical Burst Switching (OBS) Networks for Case $W_x=W_{max}$

Antonio Venegas  
Facultad de Ingeniería  
Pontificia Universidad Católica del Ecuador  
Quito, Ecuador  
toni.venegas78@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-4981-1045

Paola Venegas  
Facultad de Ingeniería  
Pontificia Universidad Católica del Ecuador  
Quito, Ecuador  
pao\_vl87@hotmail.com

Vinicio Freire  
Sin afiliación  
Quito, Ecuador  
vini\_freire@yahoo.com  
ORCID: 0000-0002-3995-4704

**Resumen:** Este artículo pretende mostrar un análisis extendido de un estudio anterior realizado por los autores, donde se abordó el desempeño de TCP sobre un modelo de red OBS basado en los procesos regenerativos y la teoría de renovación de Markov, y su evaluación mediante simulación con el programa network simulator ns-2. Sin embargo, en este nuevo estudio, se aporta con una versión ampliada del throughput de TCP sobre redes OBS para fuentes de velocidad genéricas, considerando una ventana de tiempos de ensamblado de  $\pm 10\%$ , en referencia al tiempo de ensamblado óptimo para el caso particular de  $W_x = W_{max}$ , que en un estudio previo quedó abierto para trabajos futuros. Este nuevo análisis se realiza utilizando las versiones más comunes del protocolo TCP basadas en pérdidas, tales como Reno, NewReno y SACK, cuyos resultados se contrastan mediante simulación por computador, en términos del throughput de TCP y sus correspondientes errores teórico y experimental, teniendo presente las expresiones analíticas obtenidas en un artículo previo y en el análisis original sobre el que se basan estos estudios, dadas las diferencias encontradas en cuanto al desarrollo matemático del tiempo de ensamblado óptimo; manteniendo también el análisis para los escenarios con y sin la opción de ACK retardado, para un estudio comparativo entre dichas versiones.

**Palabras Clave:** TCP, throughput, congestión, conmutación óptica de ráfagas, probabilidad de pérdida de ráfagas, simulador de redes ns-2.

**Abstract:** This article aims to show an extended analysis of the previous study carried out by authors, where the TCP performance on an OBS based network model was addressed based on regenerative processes and Markov renewal theory, and its evaluation by means of simulation using the network simulator program ns-2. However, in this new study, an expanded version of TCP throughput over OBS networks is provided for generic speed sources, taking into account an assembly time window of  $\pm 10\%$ , in reference to the optimal assembly time for the particular case of  $W_x = W_{max}$ , which in a previous study was left open for future work. This new analysis is performed using the most common versions of the loss-based TCP protocol, such as Reno, New Reno and SACK, whose results are contrasted by means of computer simulation, in terms of the performance of TCP and its corresponding theoretical and experimental errors, bearing in mind the analytical expressions obtained both in a previous article and the original analysis on which these studies are based, given the differences found in terms of its mathematical development on optimal assembly time expression; also maintaining the analysis for the scenarios with and without the delayed ACK option, for a comparative study between versions

**Keywords:** TCP, throughput, congestion, Optical Burst Switching (OBS), Burst Loss Probability (BLP), network simulator ns-2.

### I. INTRODUCCIÓN

Como se ha mencionado en los estudios previos [1][2], la tecnología OBS que se encuentra en estado de desarrollo e investigación, se podría visualizar como una alternativa prometedora para dar los primeros pasos hacia un Internet

óptico de nueva generación, y que podría adoptarse en el mediano plazo, dado que las constantes demandas de tráfico continuamente crecientes exigen cada vez nuevas soluciones más robustas y flexibles, que permitan transmitir grandes bloques de información a nivel 100% óptico, para garantizar una completa adaptación con el ritmo al que se incrementa la velocidad de transmisión a nivel óptico, en comparación con el dominio electrónico, donde a pesar de los avances tecnológicos que han surgido en los últimos años con el fin de incrementar cada vez más su capacidad de transmisión y procesamiento de la información, todavía continúa siendo un cuello de botella en comparación con su contraparte óptica.

En este sentido, las redes OBS ofrecen una solución atractiva para el Internet Óptico de próxima generación, ya que a través de un plano de control que requiere un reducido procesamiento electrónico y un plano de datos que utiliza bloques de información de mayor tamaño denominados ráfagas, constituidas de bloques agregados de datos (payload) que se transmiten de extremo a extremo a nivel todo óptico, pueden manejar de una forma más flexible y eficiente el tráfico por naturaleza a ráfagas de Internet, gracias a que aprovecha el beneficio de la multiplexación estadística, empleado en esta tecnología, la misma que se ubica en un nivel medio entre la conmutación de circuitos OCS (Optical Circuit Switching) y la conmutación de paquetes OPS (Optical Packet Switching).

Por otro lado, como es conocido que aproximadamente un 90% del tráfico que cursa a través de Internet utiliza TCP como protocolo de transporte [1], es importante su análisis en conjunto con nuevas tecnologías de conmutación ópticas como es el caso de OBS. En este sentido, y al igual que en el estudio previo, se utilizan las mismas variantes de TCP basadas en pérdidas como TCP Reno, TCP New Reno y SACK con indicaciones de TD y TO que suponen un nivel de congestión leve y severo respectivamente, y cuya principal diferencia radica en las fases de retransmisión y recuperación rápida (fast retransmit/fast recovery).

Este nuevo alcance se realiza con el fin de ampliar en la misma línea de investigación, el estudio del throughput de este protocolo para el caso particular de  $W_x = W_{max}$  empleando rangos de tiempos de ensamblado de  $\pm 10\%$  en referencia a sus valores óptimos para una fuente TCP con velocidad de acceso  $B_a = 200$  Mbps y sus correspondientes niveles de pérdida, a diferencia del estudio previo realizado por [2] que contempló únicamente el tiempo de ensamblado óptimo con un único valor para ( $pb = 0.01$  y  $B_a = 200$  Mbps); esto teniendo en cuenta que de acuerdo a las expresiones matemáticas definidas en los estudios previos de [1][3], el tiempo de ensamblado óptimo no es constante para cualquier nivel de pérdida como el caso de  $W_x < W_{max}$ , y sólo depende del tiempo de ida y vuelta sin ensambladores de ráfagas,  $RTT_0$ , mientras que para el caso de  $W_x = W_{max}$  el tiempo de ensamblado depende a más del  $RTT_0$ , del nivel de pérdidas de ráfagas,  $pb$ , el ancho de banda de acceso,  $\lambda$ , y el tamaño máximo de la ventana de TCP,  $W_{max}$ , por lo que se resulta ser más complejo; y es así que el hecho de esta nueva investigación, es justamente validar el impacto de la variación en los tiempos de ensamblado en torno a sus valores óptimos, con el fin de

determinar si el mismo es importante o puede ser despreciable, puesto que en un ambiente real sería más complicado implementar una solución que ajuste el tiempo de ensamblado en base al nivel de pérdidas experimentado.

En vista de que los resultados entre las diferentes variantes es similar para el caso de  $W_x = W_{max}$ , este análisis extendido se realizará con énfasis en la variante de TCP SACK, considerando que es la que mejor desempeño presenta en escenarios con múltiples pérdidas y además que, según las expresiones matemáticas obtenidas en los estudios previos, la expresión analítica que define el tiempo de ensamblado está asociada a dicha variante, cuyo análisis está centrado al régimen de estado estacionario del ciclo de vida de TCP cuando el throughput alcanza en su mayor parte la ventana de transmisión máxima, lo cual evidentemente se da cuando el nivel de probabilidad de pérdidas de ráfagas (BLP, *Burst Loss Probability*) es muy bajo ( $< 1 \times 10^{-3}$ ).

El desarrollo de esta investigación se justifica técnicamente porque plantea esencialmente un estudio extendido a trabajos previos efectuados por [1][2], complementando el fundamento teórico con un módulo práctico que consiste en la implementación de un escenario basado en simulación, que aparte de extender la comprensión de esta tecnología, permitirá modelar un determinado sistema en función de las nuevas condiciones de operatividad a fin de obtener un comportamiento estimado que podría presentarse en un entorno real, donde el principal aporte es evaluar el nivel de impacto y variación del throughput de TCP en las cercanías del valor óptimo del tiempo de ensamblado para diferentes valores de pérdidas de ráfagas, dado que el modelo matemático define para el caso de  $W_x = W_{max}$ , valores fijos de tiempos de ensamblado para un solo valor de pérdidas de ráfagas, mientras que en un ambiente real, normalmente se experimentarán ciertas variaciones o nivel de desviación con respecto a un determinado valor central.

### II. MATERIALES Y MÉTODOS

El método utilizado para el desarrollo de esta investigación extendida se basa en: 1) un módulo descriptivo derivado de estudios anteriores, que han conducido al desarrollo y definición de expresiones matemáticas que representan un modelo general para fuentes de velocidad genérica del protocolo TCP sobre redes OBS, para cada una de las variantes clásicas más conocidas basadas en pérdidas como TCP Reno, TCP New Reno y TCP SACK; y 2) un modelo práctico que emplea el simulador de redes ns-2, para la evaluación del throughput de TCP sobre este tipo de redes y así poder contrastar los resultados con los modelos analíticos utilizados, a fin de analizar las diferencias encontradas, y determinar el grado de aproximación alcanzado para el caso particular de  $W_x = W_{max}$ , considerando esta vez un rango de tiempos de ensamblado de  $\pm 10\%$  en referencia a los valores óptimos obtenidos en función de niveles de BLP definidos entre 0.00001 y 0.0006, utilizando una fuente TCP con una distribución de tráfico exponencial y una velocidad de acceso  $B_a = 200$  Mbps, la misma que para el estudio se considera como una fuente de velocidad rápida, que puede alcanzar en su mayor parte del ciclo de

vida de TCP, el valor máximo de la ventana de transmisión  $W_{max}$ .

**A. Método analítico de TCP basado en pérdidas**

Esta sección muestra el modelo analítico desarrollado a partir del principio de los procesos regenerativos o teoría de renovación de Markov con respecto a las implementaciones más comunes de TCP basadas en pérdidas analizadas, y su impacto en el throughput de TCP BLP (*Burst Loss Probability*) y el RTT para el caso de fuentes de velocidad genérica [4]:

$$S = \min(\lambda T_b + I, W_{max}) \quad (1)$$

Donde,

- S: Tamaño de la ráfaga medido en segmentos
- $\lambda$ : Ancho de banda de acceso expresado en segmentos por segundo (con  $\lambda=B_a/8/L$ , siendo L el tamaño del segmento)
- $T_b$ : Tiempo de ensamblado medido en segundos
- $W_{max}$ : Tamaño máximo de la ventana TCP expresada en segmentos

Para mayor comprensión de las siguientes expresiones analíticas, se exponen a continuación ciertas notaciones relacionadas con un flujo TCP:

Para esquematizar un resumen en cuanto a las diferencias encontradas en las expresiones analíticas en los estudios previos de [1][2] con respecto al trabajo original realizado en [3], en la Fig. 1 se presenta un ejemplo del throughput de TCP SACK para una fuente con velocidad  $B_a = 200$  Mbps considerando un  $T_b = 50$ ms para  $W_x < W_{max}$  y un  $T_b = 0.049$  ms (con  $p_b = 0.001$ ) para  $W_x = W_{max}$ , que permite visualizar la región y variables involucradas: throughput de TCP  $B(p_b, T_b)$  y el tiempo de ensamblado  $T_b$ .

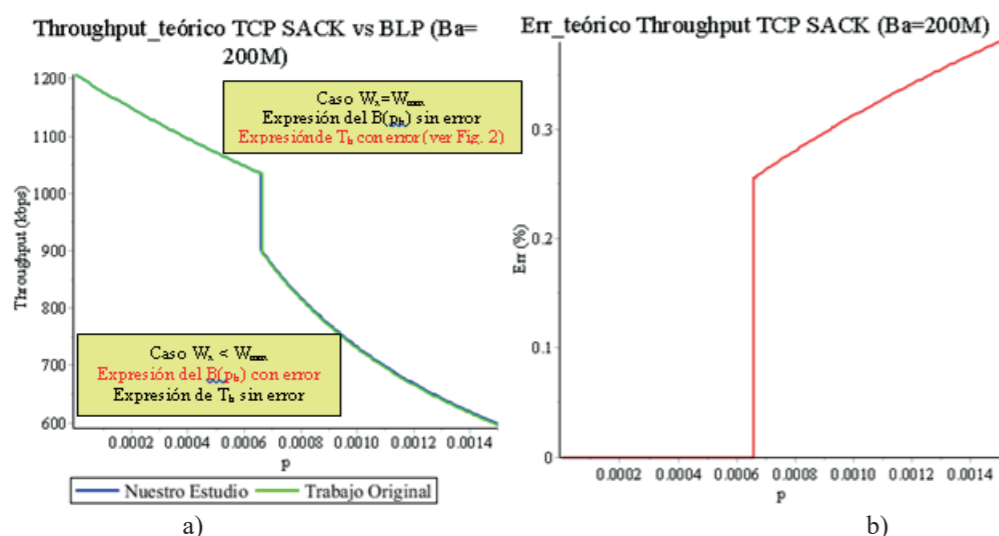


Fig. 1: Throughput TCP SACK con una fuente de velocidad  $B_a=200$  Mbps para: a) casos  $W_x = W_{max}$  y  $W_x < W_{max}$ ; y b) error teórico del throughput para los mismos casos

- TDP: Período de pérdidas por tiple ACK duplicados, que consiste en un período entre dos de estos eventos
- [TDPi]: Duración del i-ésimo TDPi (en segundos)
- Yi: Número de segmentos enviados en un TDPi
- Ya: Número de nuevos segmentos enviados en las rondas de envío adicionales que siguen a Xi
- Xi: Número de rondas enviadas en un TDPi
- Wj: Tamaño de la ventana de transmisión en la j-ésima ronda (en segundos) en un TDPi
- TOP: Período de Time Out (TO)
- [TOPi]: Duración del i-ésimo TOPi (en segundos)
- Hi: Número de segmentos enviados en un TOPi
- Q: Probabilidad de que la indicación de pérdida en la que termina un TDP sea un TO
- RTT<sub>0</sub>: Tiempo de ida y vuelta en segundos sin considerar los tiempos de ensamblado
- RTT: Tiempo de ida y vuelta en segundos considerando los tiempos de ensamblado
- RTO: Valor del temporizador de retransmisión por TO
- $\alpha_i+1$ : Primer segmento de la ( $\beta+1$ )-ésima ráfaga perdida en un TDPi
- $\gamma$ : Número de segmentos adicionales enviados en la misma ronda después de que se pierde la ( $\beta+1$ )-ésima ráfaga
- $p_b$ : Probabilidad de pérdida de ráfagas
- b: Número de rondas transmitidas antes de recibir un acuse de recibo (ACK).

De hecho, en el estudio previo de [2] se analizó el impacto de estas diferencias en cuanto al throughput para el caso de  $W_x < W_{max}$  y un caso particular para  $W_x = W_{max}$ , que en este nuevo estudio la idea es ampliarlo a un rango de valores en base a ciertos  $T_b$  óptimos, definidos para determinados niveles de pérdidas de ráfagas.

1) *TCP SACK*

Se toma como punto de partida la expresión inicial general base para el cálculo del throughput de un flujo para cualquier variante de TCP en una red OBS, basada en el modelo de [5], con pérdidas tanto por TD como por TO, que se presenta a continuación:

$$B = \frac{E[Y] + Q * E[H]}{E[TDP] + Q * E[TOP]} \quad (2)$$

Donde,

- B: *Throughput* de TCP en segmentos por segundo.
- E[Y]: Media del número de segmentos transmitidos en el período TDP
- E[H]: Media del número de segmentos transmitidos en el período TOP
- E[TDP]: Media de la duración del período TDP (con E[X] igual a la media del número de rondas enviadas en el período TDP).
- E[TOP]: Media de la duración del período TOP

Así como también ciertas ecuaciones y variables aleatorias definidas en los estudios previos, se puede obtener la expresión completa, definida para el *throughput* de TCP SACK sobre redes OBS, como:

$$B(p, T_b) = \begin{cases} \frac{\frac{3}{2} E[W_x] + \frac{1-p_b}{p_b} S + Q(E[W_x]) \frac{p_b}{1-p_b}}{RTT \left( \frac{b}{2} E[W_x] + 1 \right) + Q(E[W_x]) RTO \frac{f(p_b)}{1-p_b}} & \text{para } E[W_x] < W_{max} \\ \frac{\frac{3}{2} W_{max} + \frac{1-p_b}{p_b} S + Q(W_{max}) \frac{p_b}{1-p_b}}{RTT \left( \frac{S}{p_b W_{max}} + \frac{W_{max}}{8} + \frac{1}{2} + S \right) + Q(W_{max}) RTO \frac{f(p_b)}{1-p_b}} & \text{para } E[W_x] = W_{max} \end{cases}$$

2) *TCP New Reno*

Teniendo como referencia que el número total de paquetes transmitidos en un TDP es similar que en SACK, pero el TDP en New Reno contiene S rondas adicionales, de manera análoga al caso anterior, se obtiene la siguiente expresión completa para el *throughput* de TCP New Reno sobre redes OBS:

$$B(p, T_b) = \begin{cases} \frac{\frac{3}{2} E[W_x] + \frac{1-p_b}{p_b} S + Q(E[W_x]) \frac{p_b}{1-p_b}}{RTT \left( \frac{b}{2} E[W_x] + 1 \right) + Q(E[W_x]) RTO \frac{f(p_b)}{1-p_b}} & \text{para } E[W_x] < W_{max} \\ \frac{\frac{3}{2} W_{max} + \frac{1-p_b}{p_b} S + Q(W_{max}) \frac{p_b}{1-p_b}}{RTT \left( \frac{S}{p_b W_{max}} + \frac{W_{max}}{8} + \frac{1}{2} + S \right) + Q(W_{max}) RTO \frac{f(p_b)}{1-p_b}} & \text{para } E[W_x] = W_{max} \end{cases} \quad (4)$$

Se considera de manera independiente el caso de pérdidas por TD y el de pérdidas mixtas por TD y TO, además el análisis realizado por [3], y las redefiniciones explicadas en [5], se consigue la siguiente expresión general del *throughput* de TCP New Reno sobre redes OBS:

$$B(p, T_b) = \begin{cases} \frac{\frac{S}{p_b}}{RTT \left( \sqrt{\frac{2bS}{p_b}} + S \right) + o \left( \frac{1}{\sqrt{p_b}} \right)} & \text{para } \log_2 E[W_x] > S \text{ o } \log_2 \sqrt{\frac{2S}{bp_b}} > S \\ \frac{\frac{S}{p_b}}{RTT \left( \sqrt{\frac{2bS}{p_b} + \log_2 \frac{2S}{bp_b}} \right) + RTO + o \left( \frac{1}{\sqrt{p_b}} \right)} & \text{para } \log_2 E[W_x] < S \text{ o } \log_2 \sqrt{\frac{2S}{bp_b}} < S \end{cases} \quad (5)$$

4) *Tiempo óptimo de ensamblado para TCP SACK*

A diferencia del estudio previo realizado por [2], donde para el caso  $W_x = W_{max}$ , se consideró únicamente el tiempo de ensamblado óptimo para una condición en particular ( $p=0.0001$  y  $B_a=200$  Mbps), este nuevo análisis mantiene la velocidad de la fuente TCP de  $B_a=200$  Mbps pero cubre un espectro ampliado en cuanto a los tiempos de ensamblado con una ventana de  $\pm 10\%$  con respecto a los valores óptimos basados en distintos niveles de pérdidas definidos, con valores muy bajos, que conducen al escenario donde las pérdidas de segmentos durante el ciclo de vida de una sesión TCP es mínimo, de manera que el *throughput* alcanza el máximo de la venta de transmisión de TCP. En este sentido, se expone a continuación la ecuación definida en cuanto al tiempo de ensamblado óptimo, que difiere significativamente de la expresión presentada en [3], como se puede apreciar en la Fig. 2; por lo que el error en la expresión original se puede deducir que es producto de una falla en cuanto a su desarrollo matemático:

$T_b$  óptimo rectificado del presentado en [3], para el caso de  $W_x = W_{max}$ :

$$T_b^{opt} = \sqrt{\frac{p_b W_{max}}{2\lambda} RTT_0 \left( \frac{W_{max}}{8} + \frac{3}{2} \right)} \quad (6)$$

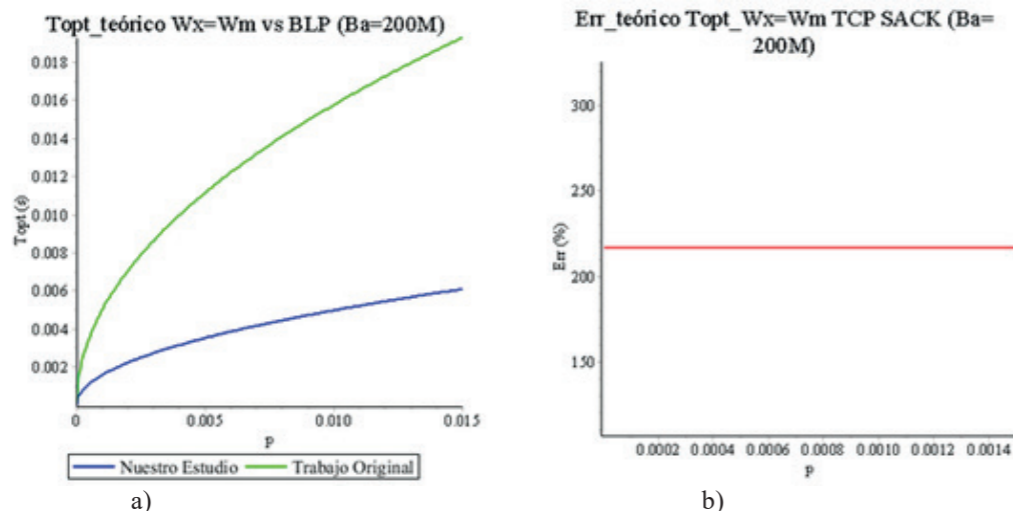


Fig. 2. Comparación  $T_{opt}$  Nuestro Estudio vs Trabajo Original para el caso  $W_x=W_{max}$ : a) Expresión analítica; y b) Error teórico

**B. Método práctico basado en simulación por ordenador**

Para la simulación por ordenador se utilizó la herramienta ns-2, con el módulo obs-0.9a, que fue adaptado en el estudio previo realizado por [6], donde se modificó principalmente el rango de pérdidas y sus correspondientes tiempos de ensamblado para el análisis.

En cuanto al procesamiento de la información obtenida del simulador ns-2, se emplearon funciones en lenguaje awk para filtrar los datos y variables de interés, fijando el tiempo de ensamblado a través de los rangos seleccionados, conjuntamente con programación sobre la herramienta gnuplot para construir gráficos en 3D que muestran el throughput en función de la BLP (*Burst Loss Probability*) y el tiempo de ensamblado  $T_b$ .

En la Fig. 3 se presenta el modelo a ser simulado, basado en el estudio realizado por [7]; mientras que en la Tabla 1 se indican los valores de los parámetros de configuración definidos, para la ejecución y posterior análisis de los resultados de la simulación.



Fig. 3. Modelo básico para la evaluación de TCP Reno, NewReno y SACK

TABLA 1 PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN

Parámetro	Valor
Esquema de ensamblado	Mixto, a diferencia del basado en temporizador utilizado en [3]
Ancho de banda red de acceso	200 Mbps
Retardo red de acceso	10 ms
Tamaño máximo del segmento	552 bytes
Ventana máxima de transmisión	70656 bytes (128 segmentos)
Versión de TCP	Reno, NewReno y SACK
Tipo de tráfico	TCP distribución Exponencial
Número de canales de control	2
Número de canales de datos	8
Ancho de banda por canal	1 Gbps
Tiempo de propagación	30 ms
Tiempo de ensamblado	0.1419 - 1.343 ms
Tamaño máximo de ráfaga	100000 bytes
Probabilidad de pérdida de ráfagas	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-4}$
Tiempo de simulación	1000 seg por muestra

Sobre este modelo de red se realizaron simulaciones en el rango de pérdidas establecido, considerando rangos de  $T_b$  con referencia a los tiempos de ensamblado óptimos obtenidos de la ecuación (6) para  $B_a = 200$  Mbps y diferentes niveles de pérdida definidos de  $p_b=0.00001, 0.0025, 0.0005, 0.0001, 0.00025$  y  $0.0006$ , correspondientes a puntos centrales desde los cuales se generan rangos de  $\pm 10\%$  para obtener sus correspondientes rangos de  $T_b$ , con el fin de evaluar el throughput de TCP en las cercanías del punto más idóneo dentro de una ventana de  $\pm 10\%$  de los  $T_b$  óptimos antes mencionados, para analizar sus diferencias, teniendo presente que en una implementación real siempre existen variaciones que pueden fluctuar entre un rango de valores. Además, se pretende encontrar el impacto de dicha variación, en cuanto al nivel de diferencia encontrado en el estudio previo, derivado de la divergencia en las expresiones matemáticas que se mencionaron anteriormente.

**A. Análisis sin la opción de ACK retardado**

A continuación, se presenta en la Fig. 4, el throughput de TCP en función de la BLP y los rangos de  $T_b$  obtenidos de los niveles de BLP (*Burst Loss Probability*) seleccionados, tanto a nivel teórico empleando las ecuaciones antes definidas, así como a nivel práctico según

las estadísticas adquiridas por simulación, contrastando estos resultados para TCP SACK, TCP Reno y TCP New Reno. En el análisis, se hace énfasis en TCP SACK puesto que los diferentes valores de  $T_b$  óptimos están relacionados con esta variante.

Por otro lado, se presenta también el error experimental comparando la expresión analítica del throughput con los valores simulados, que para niveles de pérdidas inferiores al  $1 \times 10^{-4}$  son menores al 0.7% y por lo tanto el modelo analítico es bastante cercano al ambiente de simulación. Adicionalmente, al comparar la diferencia del error experimental entre el obtenido para el  $T_b$  óptimo y los valores cercanos de  $\pm 10\%$ , se encontró que la diferencia es muy pequeña con valores inferiores al 0.15%, por lo que se puede considerar que el impacto de la variación de  $T_b$  con respecto a su valor óptimo es prácticamente nulo. Por otra parte, para valores de pérdidas mayores a  $1 \times 10^{-4}$  y cercanos al límite superior de 0.00063 el error experimental es inferior del modelo analítico en comparación con los resultados simulados incrementa a cerca del 4%, mientras que la diferencia entre el error experimental entre el obtenido para el  $T_b$  óptimo y los valores cercanos de  $\pm 10\%$  incrementa a valores entre el 0.9% y el 1.4%, que todavía podrían ser aceptados.

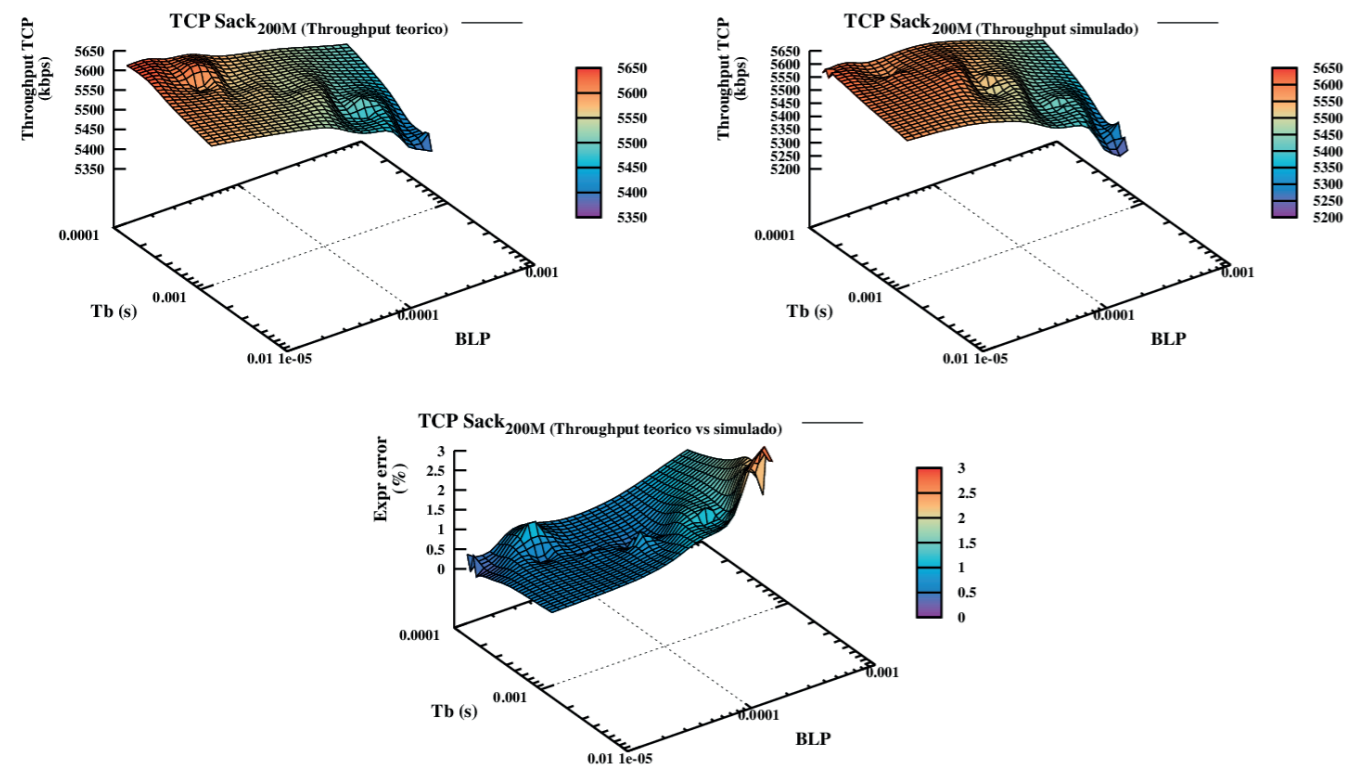


Fig. 4. Throughput de TCP y error teórico/experimental en función de BLP y  $T_b$  para TCP SACK con  $B_a=200$  Mbps sin ACK retardado

**B. Análisis con la opción de ACK retardado**

Al igual que en el caso anterior, en la Fig. 5 se presentan los resultados de las mismas simulaciones antes mencionadas para el caso de TCP SACK, con la diferencia de que se utilizó la opción de ACK retardado, que se emplea usualmente en los sistemas actuales para reducir el overhead de los reconocimientos o acuses de recibo, y que dentro del desempeño de TCP sobre redes OBS, se observa una reducción mínima inferior al 1.1% para valores de pérdidas inferiores a  $1 \times 10^{-4}$ , que por el contrario se incrementa a valores considerables de entre el 2% y 6% para niveles de BLP (*Burst Loss Probability*) superiores, que se puede deducir se deben al mayor impacto de la BLP en el throughput sumado al tiempo adicional que tiene que esperar el emisor para recibir los ACKs, y por ende, que los mismos se puedan ensamblar en el router de edge de la red OBS, dando lugar a un menor throughput; además se presenta el error experimental comparando la expresión

analítica del throughput con los valores simulados, que para niveles de pérdidas inferiores a  $1 \times 10^{-4}$  son menores al 1.7% y por lo tanto el modelo analítico es bastante cercano a los datos obtenidos del ambiente de simulación. Adicionalmente, al comparar la diferencia del error experimental entre el obtenido para el  $T_b$  óptimo y los valores cercanos de  $\pm 10\%$ , se encontró que la diferencia es muy pequeña con valores inferiores al 0.1%, por lo que se puede considerar que el impacto de la variación de  $T_b$  con respecto a su valor óptimo es prácticamente nulo. Por otra parte, para valores de pérdidas mayores a  $1 \times 10^{-4}$  y cercanos al límite superior cercano a 0.00063, el error experimental del modelo analítico en comparación con los resultados simulados se incrementa a cerca del 5%, mientras que la diferencia entre el error experimental entre el obtenido para el  $T_b$  óptimo y los valores cercanos de  $\pm 10\%$  se incrementa a valores entre el 0.3% y el 4%, que ya no se tornan despreciables, y por ende no se pueden considerar aceptables.

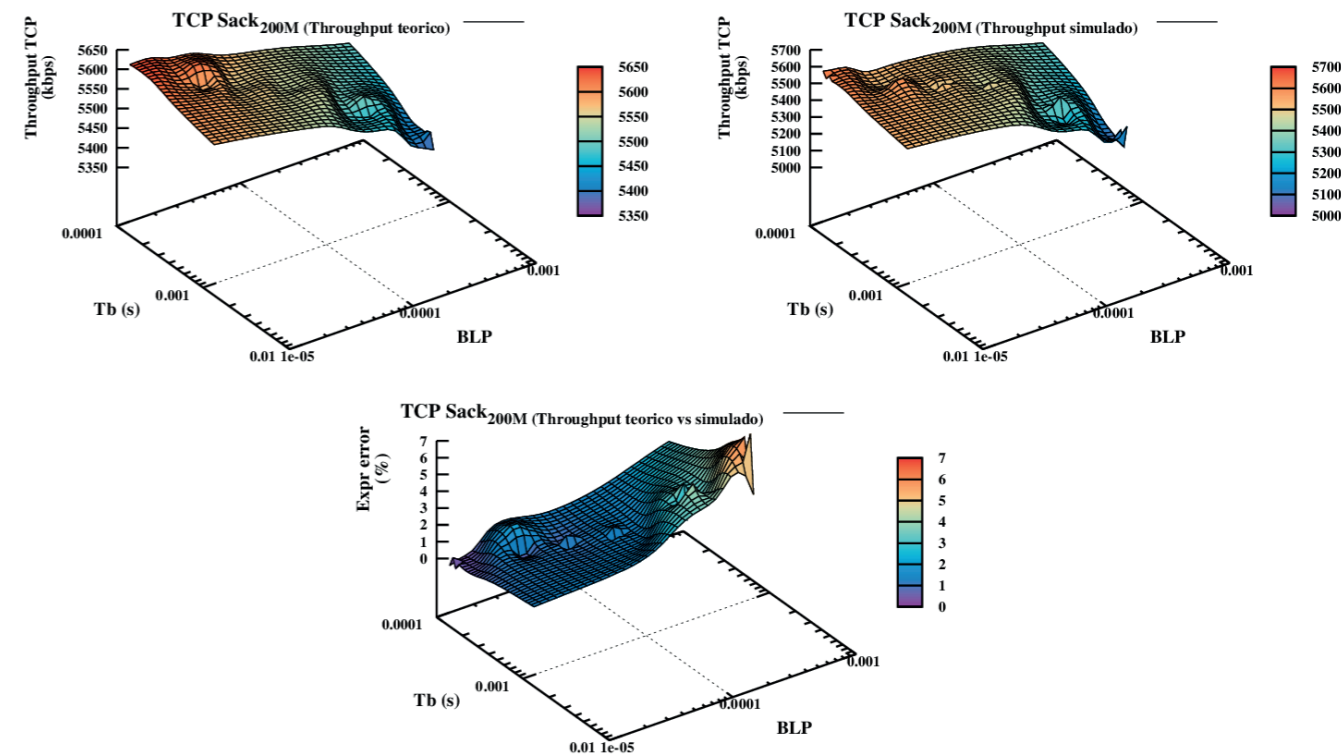


Fig. 5. Throughput de TCP y error teórico/experimental en función de BLP y  $T_b$  para TCP SACK con  $B_a=200$  Mbps con ACK retardado

Finalmente, podemos ver en la Fig. 6, una comparación entre todos los resultados de simulación de las variantes de TCP, donde tanto para el caso sin ACK retardado como para el caso con ACK retardado, si el nivel de pérdidas es muy bajo ( $< 0.00025$ ) todas las variantes presentan resultados similares, con un throughput cercano al máximo en el rango de valores de  $\pm 10\%$  en el que varía el tiempo de ensamblado respecto de sus valores óptimos para cada nivel de pérdidas definidos, siendo evidente que para el segundo caso, el throughput de todas las variantes de TCP es menor, debido a un menor número de segmentos transmitidos, ya que la tasa con la que se inyectan los segmentos a la red, depende de la tasa de recepción de ACKs (menor número con ACK retardado).

Por otro lado, a medida que las pérdidas se incrementan, TCP SACK presenta un rendimiento superior al resto de versiones, debido a que esta implementación es más robusta frente a múltiples pérdidas, dado su mecanismo recuperación selectiva de segmentos, a diferencia del esquema de recuperación acumulativa que utilizan las demás variantes, de TCP Reno y NewReno. De igual manera en la mayoría de los casos, TCP Reno presenta el menor desempeño de las tres variantes debido a que no se puede recuperar frente al caso de múltiples pérdidas.

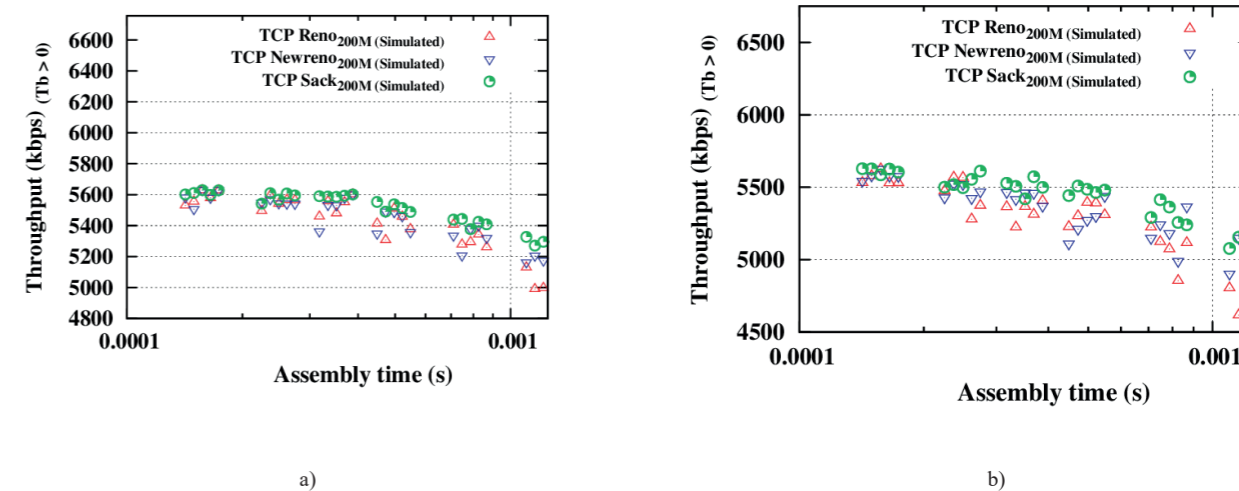


Fig. 6. Comparativo del rendimiento de TCP por simulación, entre las tres variantes basadas en pérdidas para el rango elegido de  $T_b$  en los valores de  $p_b$  definidos, con  $B_a = 200$  Mbps considerando: a) sin ACK retardado; y b) con ACK retardado

#### IV. CONCLUSIONES

En comparación con el estudio anterior, se puede apreciar que para niveles de pérdidas bajos ( $< 1 \times 10^{-4}$ ) el modelo analítico presenta un buen grado de aproximación en contraste con los datos obtenidos del ambiente de simulación, dado que la expresión analítica del throughput cae dentro del régimen de estado estacionario del ciclo de vida de un flujo TCP, donde el nivel de correlación es alto y en su mayor parte la ventana de TCP es igual a la ventana de transmisión máxima, y además que TCP se puede recuperar de las pérdidas aleatorias presentes, ya que no se llega al estado de inicio lento (*slow start*), donde se reinicia la transmisión. Las diferencias principales se evidencian para valores de mayor nivel de pérdida ( $> 0.0006$ ) y se deben a que para una BLP (*Burst Loss Probability*) alta, el valor del tamaño de la ráfaga se reduce significativamente, conduciendo a que el valor de ecuación se encuentre entre los valores máximo y mínimo, debido a que la ventana de TCP se reinicia a la fase de inicio lento (*slow start*), la cual no se considera en este análisis, que está enfocado en el régimen de estado estacionario de TCP.

El throughput de TCP experimenta una disminución mínima, inferior al 1.1% cuando se utiliza la opción de ACK retardado, para niveles de pérdidas bajos ( $< 1 \times 10^{-4}$ ), mientras que se incrementa entre un 2% y 6% para niveles de pérdidas mayores, debido al mayor impacto de la BLP sumado a la reducción de tasa de transmisión de ACKs, que resultan en el envío de un menor número de paquetes por ráfaga, acentuando en mayor medida esta diferencia.

Para las versiones de TCP analizadas, se encontró que SACK ofrece normalmente un mayor throughput que las demás variantes, dado el esquema de reconocimiento selectivo que le permite recuperarse más eficientemente de las pérdidas que podrían presentarse en la red de manera aleatoria, debido a las contenciones que se pueden experimentar en este nuevo paradigma de OBS.

#### REFERENCIAS

- [1] A. Venegas & M. Jimenez, "Evaluación del Desempeño de las Variantes de TCP basadas en pérdidas sobre Redes de Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS, Optical Burst Switching)". Maskana. ISSN: 1390-6143. Número Especial, pag. 133-148. Actas del IV Congreso Ecuatoriano de Tecnologías de la Información y Comunicación – TIC.EC 2018.
- [2] A. Venegas, P. Venegas, and J. Freire, "Extended Evaluation of Loss-Based TCP Variants Performance over Optical Burst Switching (OBS) Networks case of  $W_x < W_{max}$  and a particular case of  $W_x = W_{max}$ ", International Conference on Intelligent Information Technology (pp. 294-305). Springer, Cham, 2020.
- [3] Yu, X., Qiao, C., Liu, Y., & Towsley, D.: Performance evaluation of TCP implementations in OBS networks. Tech. Rep. 2003-13, 2003.
- [4] Venkatesh, T., Murthy, C. S. R., & Murthy, C. S. R.: An analytical approach to optical burst switched networks (Vol. 2010). New York: Springer, 2010.
- [5] Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D., & Kurose, J.: Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation. In Proceedings of the ACM SIGCOMM'98 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication, pp. 303-314, 1998
- [6] Martínez-Yelmo, I., Soto, I., Larrabeiti, D., & Guerrero, C.: A simulation based study of TCP performance over an Optical Burst Switched backbone with 802.11 access. In Meeting of the European Network of Universities and Companies in Information and Communication Engineering (pp. 120-127). Springer Berlin, Heidelberg, 2007.

- [7] Detti, A. & Listanti, M.: Impact of segments aggregation on TCP Reno flows in optical burst switching networks. In INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE Vol. 3, pp. 1803-1812, 2002.

# AUTHORS



## Antonio Venegas

MSc. Ing. Antonio Javier Venegas López, Ingeniero Electrónico con Especialización en Automatización y Control, graduado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con una Maestría en Redes de Comunicaciones obtenida en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, donde se hizo acreedor a un reconocimiento como mejor “Graduado de Posgrado” del programa de Maestría correspondiente al año académico 2017-2018. En su etapa inicial trabajó como profesor hora clase en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en las Facultades de Ingeniería Electrónica, hoy Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, e Ingeniería de Sistemas, hoy Departamento de Ciencias de la Computación, impartiendo asignaturas como Programación Visual, Métodos Numéricos y Control Industrial, y, participando además como co-director en direcciones de tesis de Ingeniería.

Con más de 18 años de experiencia en la industria de las telecomunicaciones, ha desempeñado diversos cargos técnicos en empresas del sector como CELEC EP - TRANSELECTRIC y TRANSNEXA S.A. EMA “EN LIQUIDACIÓN”, como Profesional Técnico I, II, III, Ingeniero de Proyectos, Ingeniero de Servicios, e Ingeniero de Desarrollo y Soporte a Clientes, en áreas desde el NOC (Network Operation Center), Operación, Administración y Mantenimiento de Redes de Fibra Óptica, Preventa y Posventa para soluciones Técnicas y Comerciales enfocadas principalmente a clientes del sector portador, eléctrico, y de acceso a Internet, tanto a nivel nacional como internacional. En la actualidad desempeña el cargo de Leader Of Transmission en la empresa Ufinet - NEDETEL S.A.

Su experiencia en investigación inició a partir del desarrollo de su tesis de Magíster titulada “Estudio y Evaluación del Desempeño de TCP sobre OBS Mediante un Prototipo basado en Simulación”, donde exploró un primer estudio de esta tecnología que se encuentra en estado de desarrollo e investigación, y del cual se han derivado algunos artículos presentados en diferentes Congresos Académicos de Tecnología e Investigación, publicados en algunas revistas indexadas en Latindex como Maskana y Latin American Journal of Computing, así como también en Springer.



## Paola Venegas

MSc. MBA. Ing. Betty Paola Venegas López, Ingeniera Electrónica con Especialización en Telecomunicaciones, graduada en el año 2011 en la Universidad Politécnica de las Fuerzas Armadas del Ecuador ESPE, cuenta con una Maestría en Redes de Comunicaciones y una Maestría en Administración de Empresas con mención en Gerencia de la Calidad y Productividad, graduada en los años 2014 y 2017, respectivamente, ambas maestrías obtenidas en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Con más de 10 años de experiencia en el sector de las telecomunicaciones, inicialmente trabajó como ingeniera en proyectos en el área de soterramiento de redes en la Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda del Municipio de Quito; posteriormente trabajó como Jefe de la Unidad de Reordenamiento de Redes en la Empresa Eléctrica Quito; luego desempeñó sus funciones como Coordinadora de Regulación, ordenamiento y soterramiento de redes en Telconet; posterior se desempeñó como Subsecretaria de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información y Comunicación en el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, desempeñando también subrogaciones como Viceministra de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información y Comunicación; y actualmente trabaja como Coordinadora de Contratos Públicos en Telconet.

Durante su trayectoria profesional, ha combinado sus funciones como docente a nivel de pre grado y postgrado en materias tanto técnicas como administrativas, prestando sus servicios en la Universidad de las Américas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador y Universidad Técnica del Norte, entre sus actividades docentes realizó algunos artículos publicados en revistas indexadas en Latindex como Latin American Journal of Computing, al igual que una publicación también en Springer.



## Vinicio Freire

José Vinicio Freire Rumazo, Ingeniero Electrónico con Especialización en Telecomunicaciones, graduado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con una Maestría en Seguridad Informática obtenida en la Universidad Internacional de la Roja de España, una Maestría en Gerencia de Seguridad y Riesgo obtenida en de las Fuerzas Armadas ESPE de Ecuador y una Maestría en Gerencia de Seguridad y Riesgo obtenida en de las Fuerzas Armadas ESPE de Ecuador. El inicio de las actividades profesionales estuvieron enmarcadas en el análisis de la Voice over IP VoIP para llamadas internacionales a través de ciber cafés y profesor encargado de la materia Electrónica I, en la carrera de pregrado de Ingeniería Electrónica.

Con 19 años de experiencia en el sector de regulación de las telecomunicaciones, ha participado en la elaboración de normativas para el sector, tanto técnicas como administrativas. Los ámbitos de especialización profesional para la regulación y control son la seguridad de redes de telecomunicaciones y telefonía móvil.

Las actividades de investigación técnica y bibliográfica se iniciaron con el interés en el mundo de la seguridad de la información, y posteriormente tanto como alumno y profesor invitado en programas de posgrado.