

Modelo ACK-Síncrono de Control de Congestión: Dinámica entre Ventanas y la Red

ACK-Synchronous Model for Congestion Control: Dynamics between Windows and the Network

Rodolfo Ignacio Ledesma-Goyzueta¹

¹Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú

Resumen — Este trabajo presenta un modelo ACK-síncrono preciso, el cual captura la dinámica de la cola del buffer de un enlace. Este es un modelo basado en un protocolo basado en ventanas como lo es TCP. El modelo desarrollado es modelado por ecuaciones integral-diferenciales tomando en cuenta el enfoque en tiempo continuo de la tasa de flujo siendo así derivado el modelo del enlace. Para sustentar esta derivación, simulaciones a nivel de paquete son mostradas tanto para fuentes homogéneas y heterogéneas.

Abstract— This paper introduces an accurate ACK-clocking model which captures the queue dynamics of links' buffer. This is a model based on window-based protocol such as is TCP. The model presented is modeled by integral-differential equations taking into account continuous time approach of flow rate then queue link model is derived. For bracing this derivation, packet level simulations are shown for both homogeneous and heterogeneous sources.

Palabras Clave— TCP, UDP, ACK-clocking, ventana

Key words— TCP, UDP, ACK-clocking, windows.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de comunicaciones, para ser más preciso, Internet, actualmente son el punto de concentración de los servicios tanto tradicionales de telecomunicaciones como los más actuales, e.g. *e-commerce*. Esta convergencia ha permitido que la Internet crezca de una manera exponencial los últimos años.

El Protocolo de Control de Transmisión (TCP) es el protocolo de transporte predominante, cargando con aproximadamente el 75% del volumen total de tráfico en Internet [1], esto hace que los esfuerzos por la actualización y mejora sean necesarios. En la descripción original de TCP [2] se describe las

especificaciones de este protocolo, sin embargo, no incluye los ajustes de ventana ante una congestión.

Debido al crecimiento, es que hacia 1986 Internet tuvo una de las primeras de una serie de “colapsos de congestión” [3]-[6]. Esto motivó a considerables esfuerzos e investigaciones sobre control de congestión. Una de las primeras propuestas, a partir de esa serie de “colapsos de congestión”, provino del trabajo de Van Jacobson [3] sobre el TCP Tahoe lanzado de BSD Unix en 1988.

El protocolo TCP ha sido mejorado a partir de esos “colapsos” con las propuestas posteriores. Los diferentes tipos de TCP pueden avalar el esfuerzo de las diferentes propuestas, ya sea de conceptos basados en pérdida de paquetes, e.g. [7], [8], [9]; retardos, e.g. [10], [11], o híbridos, e.g. [12], [13].

Las investigaciones hechas para las diferentes propuestas de TCP se basan en el modelamiento a nivel de paquete y a nivel de flujo. Basado en esos dos conceptos, se puede predecir la dinámica de la red, lo cual es una combinación de fuente-enlace.

Haciendo una breve descripción de este trabajo, en la Sección II se realiza una derivación de un modelo preciso para el lazo interno del modelo de control de congestión basado en ventana, el cual se basa en el modelamiento a nivel de flujo y que luego su estabilidad será analizada en lazo abierto en la Sección III. Para explicar brevemente lo que es lazo interno, véase la Fig. 1; el sistema de control se basa en dos lazos, el interno proporciona la característica de ACK-sincronismo y el lazo externo aloja el protocolo TCP, el cual realiza el ajuste del tamaño de ventana basado en los datos del estimador. Para la Sección IV se reservan las validaciones de dicho modelo en los diferentes casos propuestos tomando el modelo de la Sección II, con lo cual se muestra el comportamiento del modelo de nivel de flujo a nivel de paquete. Ya en la Sección V se plasman las conclusiones basadas en las validaciones presentadas en la Sección IV.

¹Rodolfo Ignacio Ledesma-Goyzueta, e-mail: riledesmag@msn.com
Recepción: Febrero de 2009 / Abril de 2009

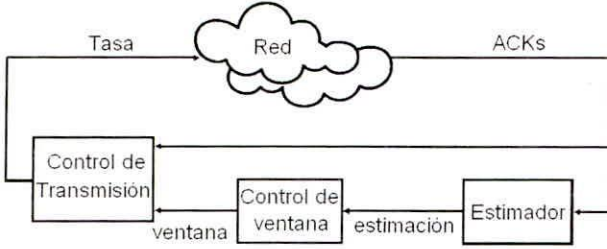


Fig. 1. Sistema de control de congestión basado en ventana

II. MODELAMIENTO

A. Preliminares

El modelamiento de una red consiste en definir un conjunto L de enlaces tal que $l \in L$, siendo $L = \{1, \dots, L\}$ además l tiene una capacidad c_l . El tráfico consiste de S flujos unidireccionales, tomando en cuenta que el destino es pasivo, por tanto, si hay una fuente transmitiendo S flujos a un destino o hacia S destinos se considerarán como S flujos de S fuentes diferentes. Denotaremos $w_s(t)$ como el tamaño de la ventana de congestión de la fuente s en el tiempo t , $s \in \{1, \dots, S\}$. Considerando que un paquete es enviado en el tiempo t , éste aparecerá en el cuello de botella en el tiempo $t + t_s^f$, siendo t_s^f el retardo de envío, el cual es el tiempo que toma en llegar de la fuente s al enlace. La tasa instantánea con la cual un flujo s ingresa al enlace l es $x_{l,s}(t)$ y $x_s(t)$ para un solo enlace. El tiempo de viaje (*round-trip time*, RTT) es el tiempo que toma en ser reconocido (*acked*) un paquete emitido por la fuente s desde que ingresó al enlace l , $\tau_{l,s}(t)$; y para un solo enlace $\tau_s(t)$. El RTT tiene una parte fija y la otra variable, la primera es denotada por la latencia de la fuente s , d_s , el cual es el tiempo mínimo alcanzado por el RTT cuando la cola está vacía y la segunda es el tamaño de cola en unidades de tiempo, $q_s(t)$, el cual es la cola vista desde la fuente s , si es un escenario de un solo enlace entonces $q_s(t) = q(t)$. Por tanto, $\tau_s(t) = d_s + q(t)$ para el caso de un solo cuello de botella.

El enlace l puede llevar tráfico no-controlado, e.g. proveniente de fuentes UDP, el cual se denotará como $x_{l,c}(t)$; para el caso de un solo cuello de botella $x_c(t)$. El tráfico cursado no-controlado es asumido por simplicidad para no usar más de un enlace y no está incluido en el enrutamiento.

Se asume para efectos del modelamiento que los *buffers* tienen capacidad ilimitada, así mismo la tasa de envío de los ACKs es infinito. Además los enlaces atienden a los paquetes en orden FIFO, tal y como sucede en la realidad.

B. Una sola fuente, un solo cuello de botella

Para iniciar el modelamiento, se tomará primero el caso más simple de una sola fuente y un solo cuello de botella.

La tasa instantánea es derivada conociendo el tamaño de ventana en estado estacionario. De la ley modificada de Little [1], [14]-[17], se puede deducir que la tasa de transferencia promedio en estado estacionario es $\bar{x}(t) = w(t)/\bar{\tau}(t)$ y además tomando en cuenta la definición de promedio se deduce la tasa media dentro de un ciclo $(0, \tau(t))$ como:

$$\bar{x} = \frac{1}{\bar{\tau}(t)} \int_0^{\tau(t)} x(z) dz.$$

Se observa que ambas ecuaciones anteriores se refieren a la tasa promedio de transferencia, pero apreciamos que la última toma en cuenta la tasa instantánea de transferencia. Adicional a este análisis matemático de la tasa instantánea, se deduce que los paquetes enviados en el tiempo t serán reconocidos en $t + \tau(t)$ y el número de paquetes en ese instante será igual al tamaño de ventana transmitido en el intervalo $[(t, t + \tau(t))]$, por lo tanto, igual a $w(t - t^f + \tau(t))$, si tomamos en cuenta el retardo de envío. Entonces se puede generalizar a la expresión:

$$\int_t^{t+\tau(t)} x(z) dz = w(t - t^f + \tau(t)). \quad (1)$$

Esta ecuación se presenta en [18], pero no está profundizada.

La mayoría de los trabajos sobre control de congestión [14]-[17], [19]-[22] asumen la tasa de transferencia como $x(t) = w(t)/\tau(t)$, de ello se derivó el *Integrator Link Model*, sin embargo no toma en cuenta la característica "autosincronizadora". Un modelo alternativo, el cual modela esta característica, está basado en la observación empírica que, debido a la "autosincronización", desprecia los efectos transitorios. Este modelo es también conocido como *Static Link Model* [23], [11].

Diferenciando en (1) con respecto al tiempo y considerando la igualdad $\tau(t) = d + q(t)$, resulta:

$$x(t + \tau(t)) = w(t - t^f + \tau(t)) + \frac{x(t)}{1 + \dot{q}(t)}. \quad (2)$$

Como se puede apreciar de (2), la tasa instantánea depende de la tasa de un RTT previo, además de la dependencia del tamaño de ventana y del RTT.

El modelamiento del ACK-sincronismo está dado por:

$$\dot{q}(t) = \frac{1}{c} (x(t) + x_c(t) - c). \quad (3)$$

Para plasmar el efecto “autosíncrono” en el modelamiento del lazo interno basta con tomar en cuenta la definición de la tasa instantánea de (2). Con ello todo el sistema se representa de manera general con las ecuaciones integral-diferenciales (EID).

C. Múltiples fuentes, un solo cuello de botella

Cuando más de una fuente o flujo comparten un cuello de botella, se deduce de (1) una ecuación análoga para S fuentes para derivar la tasa instantánea de cada una de ellas, resultando:

$$\int_t^{t+\tau_s(t)} x_s(z) dz = w_s (t - t_s^f + \tau_s(t)). \quad (4)$$

Análogamente a (3), se deriva la ecuación de la dinámica del *buffer* para S fuentes:

$$\dot{q}(t) = \frac{1}{c} \left(\sum_{s \in S} x_s(t) + x_c(t) - c \right). \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) representan el sistema para S fuentes y un solo cuello de botella.

III. ANALISIS

Para realizar el análisis, se asumen los valores estables o en equilibrio de las variables $x(t)$, $w(t)$, $\lambda(t)$, $q(t)$, o sea x , w , λ , q . Bajo esta condición de equilibrio no son considerados los argumentos de variables temporales.

D. Equilibrio

Se considera un ámbito de red de L enlaces con un retardo de enlace λ_l , $l \in L$. La red es compartida por S fuentes. La topología de la red puede ser cualquiera.

La relación de la red y la fuente se realiza por medio de la tasa de transferencia y el precio, este último como señal de realimentación proveniente de la red. En este caso el parámetro precio es el retardo q_s de la ruta de un flujo a través de un número de enlaces a una tasa de

transferencia x_s . Bajo estas especificaciones, definimos la función utilidad de las fuentes en función de las tasas de transferencia:

$$\begin{aligned} \max_{x_s \geq 0} \sum_{s \in S} U_s(x_s) \\ \text{s.a.} \quad \sum_{s \in S} x_s - c \leq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Tomando en cuenta desde la perspectiva de una fuente s , en el equilibrio se encuentran los valores óptimos que maximizan la función utilidad $U_s(x_s)$, (x_s^*, λ_l^*) , considerando que es un problema dual, $\forall s \in S$, $l \in L$. Esto da como resultado:

$$w_s = x_s^* (d_s + q_s^*); \quad q_s^*(t) = \sum_{l \in L} R_{l,s} \lambda_l^*; \quad \lambda_l^* \geq 0.$$

Se considera la siguiente relación, teniendo conocimiento de no faltar al principio de extremo a extremo (*end-to-end principle*):

$$x_s = f(q_s) \quad (7)$$

Como se puede apreciar, ésta es la función de retroalimentación del modelo ACK-síncrono. Además se asume que la inversa de la función f existe; considerando que U_s es una función diferenciable en x_s , $\forall x_s \geq 0$; y tomando en cuenta las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker, resulta:

$$U_s(x_s^*) = w_s \log(x_s^*) - x_s^* d_s. \quad (8)$$

La función utilidad es estrictamente cóncava, siendo su función de restricción y su condición conjuntos convexos.

La unicidad de x_s^* se deduce por inspección desde que la función de utilidad es cóncava.

E. Estabilidad

Para realizar el estudio de la estabilidad del sistema, se linealiza (4) y (5) alrededor de los valores x , w , q . Se considera $\delta(\cdot)$ las mínimas perturbaciones de cada valor alrededor del equilibrio.

Además en el equilibrio se verifica que los retardos de tiempo en los argumentos de variables son modelados así $x_s(t - t_s^f + \tau_s(t)) \Rightarrow x_s(t - t_s^f + \tau_s)$. Por lo tanto, se obtiene:

$$\delta\dot{q}(t) = \frac{1}{c} \left(\sum_{s \in S} \delta x_s(t) + \delta x_c(t) \right),$$

$$\delta x_s(t + \tau_s) - \delta x_s(t) - \delta \dot{w}_s(t - t_s^f + \tau_s) + x_s \delta \dot{q}(t) = 0$$

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones anteriores, resulta la ecuación del sistema linealizado:

$$\Delta Q(s) \left(c + \sum_{s \in S} \frac{x_s}{e^{s\tau_s} - 1} \right) = \sum_{s \in S} \frac{\Delta W_s(s) e^{-s(t_s^f - \tau_s)}}{e^{s\tau_s} - 1} + \frac{\Delta X_c(s)}{s} \quad (9)$$

Ahora se considera la condición de estabilidad asintótica [3] en el sentido que para una señal de entrada limitada existe una señal de salida limitada, esto ante una entrada impulso o delta Dirac, $\hat{w}(\omega)$. Tomando en cuenta ello se puede asumir que las perturbaciones alrededor del equilibrio son estables asintóticamente. Bajo esta condición, sabiendo que nuestro sistema es multivariable, se aplica las condiciones suficientes de control robusto [26] para demostrar la estabilidad del sistema linealizado (9) en el espacio H_∞ , las cuales son:

- (a) $G(s)$ es analítico en \mathbb{C}^+ ;
- (b) $\sup_{s \in \mathbb{C}^+} \bar{\sigma}(G(s)) < \infty$

siendo $\bar{\sigma}$ el valor singular más grande. El sistema se puede expresar de manera matricial: $\mathbf{Q} = \mathbf{G}\mathbf{W}$, siendo $\mathbf{Q}_{1 \times 1}$, $\mathbf{G}_{1 \times S}$ y $\mathbf{W}_{S \times 1}$. Entonces, se denomina \mathbf{G} a la matriz cuyos elementos son las funciones de transferencia para cada entrada ΔW_s . El elemento i de la matriz \mathbf{G} tiene la siguiente forma:

$$G_i(s) = \frac{1}{(1 - e^{-s\tau_s}) \left(c + \sum_{s \in S} \frac{x_s}{e^{s\tau_s} - 1} \right)} \quad (10)$$

Basta con realizar el análisis sobre (10) para demostrar la estabilidad de \mathbf{G} .

Considerando $0 < x_s \leq c$, $\tau_s > 0$, $s = \{1, \dots, S\}$. Se inicia el análisis demostrando que no existen singularidades en \mathbb{C}^+ , para ello se analiza el denominador de (10), considerando $s = \sigma + j\omega$ tal que $\sigma > 0$:

$$|1 - e^{-s\tau_s}| \geq |1 - |e^{-s\tau_s}|| = 1 - e^{-\tau_s\sigma} > 0 \quad (11)$$

Además, haciendo el análisis del segundo factor del denominador, se tiene que $1/(e^{s\tau_s} - 1)$ se puede expresar como $1/(e^{(\sigma+j\omega)\tau_s} - 1)$ el cual yace sobre un círculo de radio $r = |e^{\sigma\tau_s}| > 1$, con ello se determina que $c + \sum_{s \in S} x_s/(e^{s\tau_s} - 1) \neq 0$. De ahí se puede deducir que $G_i(s)$ es analítico en \mathbb{C}^+ para $\sigma > 0$.

Ahora para $\sigma = 0$, el primer factor presentaría singularidades en el denominador, ya que $1 - e^{-s\tau_s} = 0$ cuando $\sigma = 0$ y $\omega = 2\pi n/\tau_s$, $n \in \mathbb{Z}$. Este caso se analiza mediante límites, aplicando la regla de L'Hôpital:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow j2\pi n/\tau_s} \frac{1}{G_i(s)} &= (1 - e^{-s\tau_s}) \left(c + \sum_{s \in S} \frac{x_s}{e^{s\tau_s} - 1} \right) \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 2\pi n/\tau_s} (c(1 - e^{-j\omega\tau_s})) + x_i + \sum_{s \in S, s \neq i} x_s \frac{1 - e^{-j\omega\tau_s}}{e^{j\omega\tau_s} - 1} \\ &= x_i + \sum_{s \in S, s \neq i} x_s \frac{\tau_s}{\tau_s} \frac{1}{e^{j2\pi n\tau_s/\tau_s}} > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Por lo tanto, con la ecuación (12) se descarta cualquier singularidad en el plano $\{s: \text{Re}(s) \geq 0\}$, sosteniendo así la condición (a).

Ahora se realizará la comprobación de la condición (b). Se introduce la matriz Σ , que es una matriz diagonal que contiene los valores singulares que actúan como controles de ganancia, de esta manera \mathbf{G} se puede expresar de la siguiente forma:

$$\mathbf{G}(j\omega) = \mathbf{Y}(j\omega)\Sigma(j\omega)\mathbf{Q}^T(j\omega) \quad (13)$$

Entonces, sea $\mathbf{G}(j\omega)$ una función estable multivariable. Para cada valor ω los valores singulares son ordenados ($\sigma_i \in \mathbb{R}$): $\sigma_1(\omega) \geq \sigma_2(\omega) \geq \dots \geq \sigma_m(\omega) \geq 0$, $m = \min\{I, S\}$, $s \in S$. Considerando esto, entonces $\bar{\sigma}(\omega) := \sigma_1(\omega) > 0$. Por lo tanto, tomando la norma H_∞ de $\mathbf{G}(s)$ se tiene:

$$\|\mathbf{G}(s)\|_\infty := \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \bar{\sigma}(\mathbf{G}(j\omega)) = \frac{\|\mathbf{G}(j\omega)\dot{w}(\omega)\|}{\|\dot{w}(\omega)\|} \leq \sigma_1(\omega) < \infty \quad (14)$$

Considerando la ecuación (14) demostrada y verdadera, se cumple la condición (b). Por lo tanto, se puede afirmar que el sistema linealizado multivariable es estable en el espacio H_{∞} .

IV. VALIDACIÓN

En esta sección se realizarán las validaciones del modelo derivado en la sección II mediante ejemplos. Los ejemplos se realizaron verificando el cambio de tamaño de ventana siguiendo la forma de una entrada escalón. Para evitar generalidades asumimos $t_s^f = 0$.

F. Una sola fuente, un solo cuello de botella

1) Sin tráfico cursado: El enlace de cuello de botella tiene una capacidad de 40 Mbps. La fuente tiene una latencia de $d = 150$ ms. Y su tamaño de ventana inicial es $w_0 = 750$ paquetes y cuyo tamaño de paquete es $\delta = 1040$ bytes. En el tiempo $t = 5$ s. el sistema es perturbado del equilibrio, incrementándose el tamaño de la ventana a 850 paquetes. En la Fig. 2. se muestra que la línea punteada pertenece al modelo EID. Se observa un crecimiento inmediato en el tamaño de la cola (segundos).

2) Con tráfico cursado: Considerando la fuente del caso anterior, el enlace de cuello de botella es de 220 Mbps de capacidad, con un tráfico cursado no controlado (e.g. tráfico UDP) de 200 Mbps. En el tiempo $t = 10$ s. el sistema es perturbado desde el equilibrio incrementándose el tamaño de la ventana de $w_0 = 750$ paquetes a 850 paquetes. En la Fig. 3 las líneas punteadas pertenecen al modelo EID. Se observa un crecimiento amortiguado en el tamaño de la cola (segundos). Con ello se demuestra la dinámica del buffer con presencia de tráfico cursado no controlado.

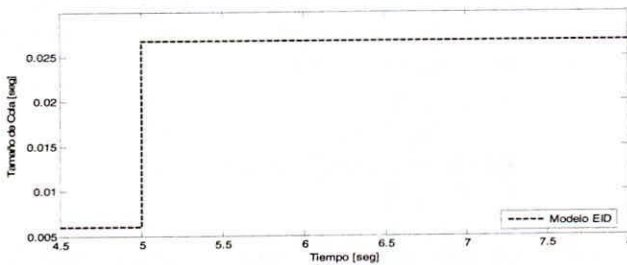


Fig. 2. Ejemplo de validación. Sin tráfico cursado. Modelo EID (1) y (3).

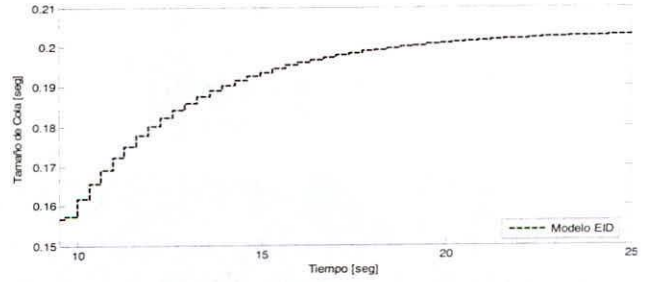


Fig. 3. Ejemplo de validación. Con tráfico cursado. Modelo EID (1) y (3).

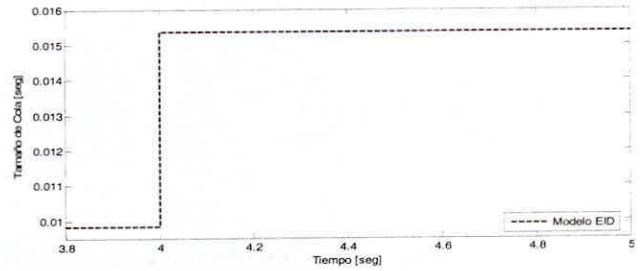


Fig. 4. Ejemplo de validación. Un solo cuello de botella. Sin tráfico cursado. Dos flujos $d_1 = d_2 = 100$ ms. Modelo EID (4) y (5).

G. Múltiples fuentes, un solo cuello de botella

1) Fuentes homogéneas, sin tráfico cursado: Se considera dos fuentes homogéneas, i.e. $d_1 = d_2 = 100$ ms., los tamaños de las ventanas iniciales es $w_1 = w_2 = 990$ paquetes. La capacidad del enlace es de 150 Mbps. En el tiempo $t = 4$ s, el sistema es perturbado desde el equilibrio incrementándose el tamaño de ventana de $w_1 = 990$ paquetes a 1090 paquetes. En la Fig. 4, las líneas punteadas pertenecen al modelo EID. Se observa un crecimiento inmediato en el tamaño de la cola (segundos).

2) Fuentes heterogéneas, sin tráfico cursado: Se considera veinte fuentes heterogéneas, por tanto $d_f = 50$ ms y $d_s = 250$ ms., los tamaños de las ventanas iniciales es $w_f = 148$ paquetes y $w_s = 135$ paquetes, además cabe señalar que no existe tráfico no-controlado. La capacidad del enlace es de 100 Mbps. El sistema es perturbado desde el inicio, $t = 0$ s.. En la Fig. 5 las líneas punteadas pertenecen al modelo EID. Se aprecia un crecimiento transitorio el cual es ajustado posteriormente cerca de los 250 ms. Debido al ajuste de las demás fuentes frente a las nuevas condiciones del enlace, siguiéndose de un decremento del tamaño en la cola (segundos) y así consiguiendo llegar al equilibrio.

3) Fuentes heterogéneas, con tráfico cursado: Se considera dos fuentes heterogéneas, $d_1 = 10$ ms. y $d_2 = 190$ ms., los tamaños de las ventanas iniciales es $w_1 = 300$ paquetes y $w_2 = 1500$ paquetes, además cabe señalar que existe tráfico no-controlado, $x_c = 600$ Mbps. La capacidad del enlace es de 750 Mbps. En el tiempo $t = 0$ s. el sistema es perturbado. En la Fig. 6 las líneas punteadas pertenecen al modelo EID. Se observa un

crecimiento amortiguado, debido a la presencia de tráfico cursado, en el tamaño de la cola (segundos).

4) *Modelo linealizado*: Dos flujos basados en ventanas envían datos sobre un solo enlace de capacidad $c = 100$ Mbps., y $x_c = 0$. El modelo es simulado desde un punto de equilibrio cuando las ventanas son $w_1 = 70$ paquetes y $w_2 = 2000$ paquetes, además $d_1 = 10$ ms. Y $d_2 = 190$ ms. Cabe resaltar que el tamaño de paquete es de 1040 bytes. El sistema es perturbado del punto de equilibrio en $t = 0.8$ ms., con un pulso del 10 % del tamaño de w_1 de 200 ms. De duración. La respuesta es la variación (desviación) con referencia al punto de equilibrio del sistema, ello se aprecia en la Fig. 7.

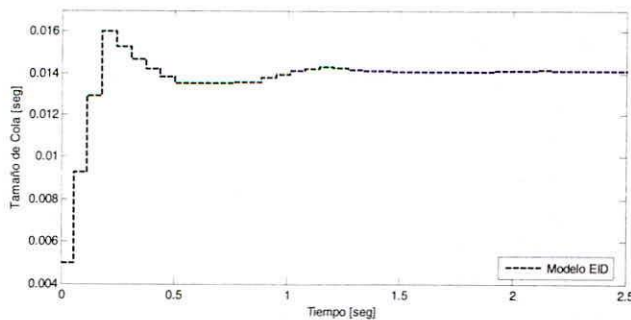


Fig. 5. Ejemplo de validación. Un solo cuello de botella. Sin tráfico cursado. Veinte flujos $d_1 = 50$ ms. Y $d_2 = 250$ ms. Modelo EID (4) y (5).

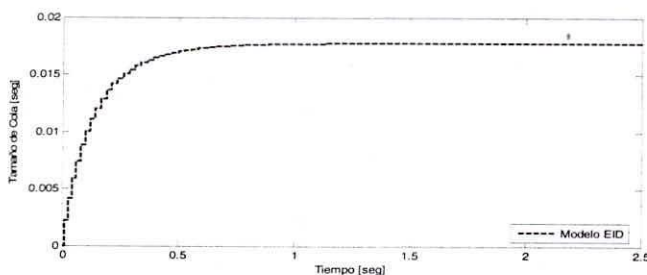


Fig. 6. Ejemplo de validación. Un solo cuello de botella. Con tráfico cursado. Dos flujos $d_1 = 10$ ms. Y $d_2 = 190$ ms. Modelo EID (4) y (5).

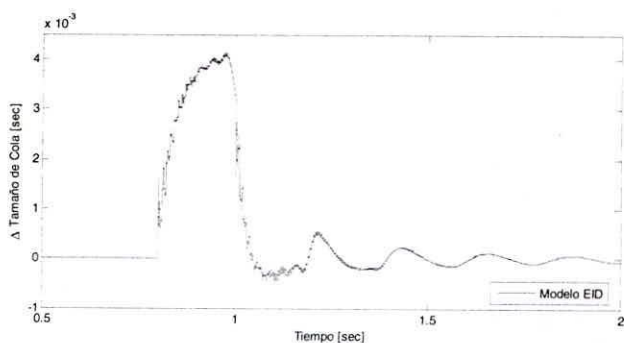


Fig. 7. Simulación del modelo linealizado. Modelo EID (9).

V. CONCLUSIONES

El modelo presentado captura la dinámica del enlace ante un cambio en las fuentes basadas en ventanas, además de capturar el efecto del sincronismo por ACK. Esto hace que el modelo muestre cuantitativamente su comportamiento a nivel de paquete y se refleje cualitativamente en la dinámica del enlace. Las validaciones sirvieron para reflejar estos dos aspectos, cuantitativos y cualitativos, frente a casos de fuentes homogéneas, heterogéneas con y sin presencia de tráfico no-controlado. Mediante las mismas validaciones se pudo apreciar que el sistema no-linealizado es estable, pues siempre tiende a un punto de equilibrio del enlace, reflejando así que el sincronismo por ACK es estable por sí mismo, demostrando que es una característica importante del lazo interno de un modelo de control de congestión basado en ventanas. Aplicando el criterio de control robusto se demostró la estabilidad del modelo linealizado alrededor de un punto de equilibrio. Además el modelo sirvió para predecir el comportamiento del *buffer* y así ver el desempeño del mismo. Las validaciones se llegaron a realizar discretizando tanto el modelo no-linealizado y linealizado para su posterior codificación en MATLAB.

Para extender este trabajo hay muchos caminos, por ejemplo el análisis de un protocolo TCP, y así poder analizar su estabilidad. Además el trabajo se puede mejorar haciendo comparaciones cualitativas con otros modelos de control de congestión derivados por otros autores, adicionalmente del uso de NS-2 como herramienta de simulación de redes.

AGRADECIMIENTO

El autor agradece la colaboración de Flavio Carrillo, profesor de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Electrónica UNMSM, por la revisión de este trabajo y por sus valiosas discusiones.

REFERENCIAS

- [1] Caida-Sd-Nap, Datos disponibles online, <http://www.caida.org/dynamic/analysis/workload/sdnap/0_0/ts_proto_packets.html>
- [2] J. Postel, *Rfc 793*, Darpa Internet Program – USC – Information Science Institute, Septiembre 1981.
- [3] V. Jacobson, *Congestion avoidance and control*, in Proceedings of SIGCOMM '88, Standford CA, ACM, 1988.
- [4] J. Nagle, *Rfc 896*, Ford Aerospace and Communications Corporation, Enero 1984.
- [5] S. Floyd, K. Fall, *Promoting the Use of End-to-End Congestion Control in the Internet*,

- IEEE/ACM Transactions on Networking, Agosto 1999.
- [6] S. Floyd, *Rfc 2914*, Aciri, Septiembre 2000.
- [7] S. Floyd, T. Henderson And A. Gurtov, *RFC 2582*, ICSI – Boeing – TeliaSonera, Abril 2004.
- [8] L. Xu, K. Harfoush And I. Rhee, *Binary Increase Congestion Control for Fast Long-Distance Networks*, In Proceedings IEEE INFOCOM, 2004.
- [9] S. Floyd, *Rfc 3649*, ICSI, Diciembre 2003.
- [10] L. S. Brakmo, S. W. O'Malley, and L. L. Peterson, *TCP Vegas: new techniques for congestion detection and avoidance*, In Proceedings ACM SIGCOMM pp. 24–35, 1994.
- [11] D. Wei, C. Jin, S. H. Low, And S. Hegde, *Fast TCP: Motivation, Architecture, Algorithms, Performance*, IEEE/ACM Trans. Networking, Diciembre 2006.
- [12] R. King, R. Baraniuk And R. Riedi, *TCP-Africa: An Adaptive and Fair Rapid Increase Rule for Scalable TCP*, In Proceedings IEEE INFOCOM, 2005.
- [13] S. Liu, T. Basar And R. Srikant, *TCP-Illinois: A loss and delay-based congestion control algorithm for high-speed networks*, In Proceedings First Int. Conf. on Perform. Eval. Methodol. Tools (VALUETOOLS), 2006.
- [14] J. Wang, D. Wei, Joon-Young Choi And S. H. Low, *Modelling and Stability of FAST TCP*, in Proceedings of IEEE INFOCOM, 2005.
- [15] Ao Tang, K. Jacobsson, Lachlan L. H. Andrew, S. H. LOW, *An Accurate Link Model and Its Application to Stability Analysis of FAST TCP*, in Proceedings of IEEE INFOCOM, 2007.
- [16] T.V. Lakshman, U. Madhow, *The performance of TCP/IP for networks with high bandwidth-delay products and random loss*, IFIP Transactions C-26, High Performance Networking V, pp. 135-150, North-Holland, 1994.
- [17] T.V. Lakshman, U. Madhow, *Window-based error recovery and flow control with a slow acknowledgement channel: a study of TCP/IP performance*, in Proceedings of IEEE INFOCOM, 1997.
- [18] J. Mo, R. La, V. Anantharam, And J. Walrand, *Analysis and comparison of TCP Reno and TCP Vegas*, In Proceedings of IEEE INFOCOM, 1999.
- [19] F. Baccelli And D. Hong, *Aimd, fairness and fractal scaling of TCP traffic*, In Proceedings of IEEE INFOCOM, 2002.
- [20] S. H. Low, F. Paganini, And J. C. Doyle, *Internet congestion control*, IEEE Control Systems Magazine, 22(1): 28–43, Febrero 2002.
- [21] E. Altman, C. Barakat And V. Ramos, *Analysis of AIMD protocols over paths with variable delay*, In Proceedings of IEEE INFOCOM, 2004.
- [22] S. Liu, T. Basar And R. Srikant, *Pitfalls in the fluid modeling of RTT variations in window-based congestion control*, In Proceedings of IEEE INFOCOM, 2005.
- [23] J. Wang, A. Tang, And S. H. Low, *Local stability of FAST TCP*, In Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Diciembre 2004.
- [24] F. Kelly, A. Maulloo, And D. Tan, *Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability*, J. Op. Res. Soc., 49:237 – 252, 1998.
- [25] S. H. Low And D. E. Lapsley, *Optimization flow control–I: Basic Algorithm and Convergence*, IEEE/ACM Trans. Networking, 7(6):861 – 874, 1999.
- [26] A. Damen And S. Wieland, *Robust Control*, Holanda, Julio 2002.