

Evaluación de la calidad de servicios de VoIP en presencia de AQM

Vitalio Alfonso Reguera

Correo electrónico: vitalio@uclv.edu.cu

Félix F. Álvarez Paliza

Correo electrónico: fapaliza@uclv.edu.cu

Pedro Arco Ríos

Correo electrónico: parco@vclv.cujae.edu.cu

Carlos A. Rodríguez López

Correo electrónico: cdrodriguez@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba

Resumen

Se presenta un comprensivo estudio sobre el impacto del manejo activo de colas (AQM) en la calidad de servicio de las aplicaciones de voz sobre IP (VoIP). Se analiza uno de los algoritmos AQM más representativos mediante extensas simulaciones, evaluando su efecto en la calidad de voz percibida. Diferentes escenarios de red son investigados cambiando la carga de tráfico y alterando los parámetros de control. La degradación de la transmisión es vinculada a la percepción de los usuarios por medio de modelos algorítmicos bien conocidos, expresando la satisfacción de estos en la escala MOS. Los principales resultados obtenidos muestran que el uso de mecanismos para el manejo activo de colas, como el de detección temprana aleatoria en su versión adaptativa (ARED), mejora significativamente la calidad de voz percibida.

Palabras clave: análisis de colas, Internet, protocolos

Recibido: octubre 2009

Aprobado: diciembre 2009

Publicado: *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, Vol. XXVII, No. 2-3, 2006*

INTRODUCCIÓN

El auge de Internet y su continuo incremento en usuarios y aplicaciones ha convertido a la red global en la plataforma de facto para la integración de los servicios. La tendencia actual muestra a la tecnología IP como el principal vehículo portador de los servicios en las redes de próxima generación. Un elemento indispensable a resolver es el requerimiento de calidad de las aplicaciones sobre el modelo del **mejor esfuerzo** de las redes IP.

Siendo muchos los factores involucrados en el desempeño de la red; uno de los más significativo es la congestión. Este fenómeno, que en lo adelante será entendido como la saturación de uno o más enrutadores debido a su incapacidad para evacuar con suficiente rapidez el tráfico que ingresa, provoca problemas tales como: pérdida de información;

retardos; variación de los retardos entre diferentes segmentos de información; así como la disminución sustancial de la utilización de los recursos de la red o incluso su colapso.

Muchos protocolos y mecanismos han sido diseñados para evitar la congestión, aplicando múltiples técnicas y operando en diferentes entornos de la red. El manejo activo de colas, conocido por sus siglas AQM (*Active Queue Management*), es un mecanismo que se implementa en los enrutadores para evitar la congestión. Su capacidad para reducir la longitud de las colas y sus oscilaciones parece ser una característica prometedora para aplicaciones sensibles a la demora y sus variaciones (*jitter*). Este puede ser el caso de las aplicaciones de voz sobre IP (VoIP). De hecho, varios estudios señalan que el manejo activo de colas mejora la calidad de servicio de las aplicaciones de multimedia. [1-3]

* Este artículo ha sido seleccionado de la base de publicaciones del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, sometido a revisión técnica y a una edición mejorada para su publicación en Revista Cubana de Ingeniería.

Sin embargo, estas aseveraciones están completamente basadas en mediciones de red (paquetes perdidos, demoras y variación de la demora) y no han sido consistentemente vinculadas a la percepción de los usuarios.

Varios diseños para el manejo activo de colas han surgido desde la propuesta original de *random early detection* (RED) hecha por Floyd y Jacobson en 1993. [3] La motivación de RED es disminuir los retardos de extremo a extremo manteniendo el tamaño de cola reducido, impedir la pérdida de un gran número consecutivo de paquetes y eliminar el sesgo de la razón de pérdidas contra el tráfico a ráfagas. Este mecanismo señala a las fuentes de tráfico antes de que se llene la cola física. La señalización se realiza marcando (usando por ejemplo ECN), [5] o "botando" los paquetes con cierta probabilidad dependiendo del tamaño medio de la cola. La IETF recomienda, [6] la utilización de AQM en los enrutadores, específicamente el documento promueve la implementación de RED en Internet.

La configuración de los parámetros de este esquema AQM es muy dependiente de las características de la red, lo cual representa un inconveniente para adaptarse a un conjunto heterogéneo de escenarios. [7,8] Estas deficiencias han originado serias críticas sobre su utilización. [9]

RED ha evolucionado desde su propuesta original para dar lugar a versiones más actualizadas como Gentle-RED[10], y Adaptive-RED. [11] Además de las variaciones de RED un gran número de nuevos mecanismos AQM han sido reportados, estudios recientes señalan más de cincuenta diseños AQM desarrollados en los últimos años. [12]

La calidad de voz de los sistemas de VoIP es severamente dañada por factores como la demora, el *jitter* y la pérdida de paquetes en ráfaga. La percepción de los usuarios también es afectada por el tratamiento realizado por los *codecs* a la señal de voz.

En una comunicación, los paquetes de voz viajan a través de la red encapsulados en diferentes protocolos sufriendo de eventuales degradaciones. La recomendación G.107 [13] de la UIT describe un algoritmo denominado el modelo-E para cuantificar el efecto de estas degradaciones en la calidad de la transmisión. El índice arrojado por el modelo-E puede ser fácilmente relacionado con la percepción de la calidad de voz experimentada por una persona.

La compleja interacción entre el mecanismo de control de congestión y el comportamiento de la red hace muy difícil evaluar analíticamente el impacto de AQM en la calidad de servicio de las aplicaciones de VoIP. May Martín *et al.*, [14] hace un simplificado acercamiento al tema asumiendo modelos de tráfico no reales, arrojando resultados desfavorables para los algoritmos AQM. En el documento que sienta las bases para soportar los servicios de emergencia para la telefonía IP en Internet, [15] los autores plantean que serían necesarios mecanismos más avanzados de AQM para manejar este tráfico.

La guía para la implementación de calidad de servicio de CISCO no recomienda el uso del manejo activo de colas en presencia de tráfico de voz, adoptando un esquema basado en prioridades. Lo anterior contrasta con los estudios que promueven el uso de AQM para mejorar la calidad de servicio de aplicaciones de VoIP.

Este trabajo está motivado por la ausencia de estudios más profundos sobre la influencia de los mecanismos subyacentes de control de red en la calidad de los servicios de voz y está estructurado a partir de un amplio conjunto de simulaciones utilizando uno de los algoritmos AQM más representativos. Las mediciones de red asociados a las comunicaciones de voz son expresadas en registro de calidad de la voz subjetivos por medio de algoritmos bien conocidos. Los resultados muestran que el uso del manejo activo de colas puede mejorar significativamente la calidad de servicio de las aplicaciones de voz con respecto a los mecanismos de cola tradicionalmente usados.

MANEJO ACTIVO DE COLAS

Un enrutador convencional mantiene una cola de tamaño finito donde son almacenados los paquetes que arriban cuando los enlaces de salida están ocupados. Si la razón de entrada supera la razón de salida, el número de paquetes almacenados en la cola comienza a crecer y eventualmente se llena, en estas circunstancias los paquetes que arriban son eliminados. Este esquema es conocido como *drop-tail* (DT) y es una práctica muy común en los enrutadores. Las colas DT provocan altas razones de pérdidas de paquetes al tráfico en ráfagas predominante en Internet. [16,17] Estas pérdidas de paquetes reducen el rendimiento y originan sincronismo entre las conexiones del **protocolo de control de transmisión** (TCP) que comparten los recursos del enrutador. Además, se introducen retardos significativamente altos debido a los tiempos de espera en la cola.

El principio de AQM se basa en explotar la naturaleza realimentada del protocolo TCP, señalizando a los emisores de tráfico el peligro de una inminente congestión antes de que esta ocurra para que actúen en consecuencia disminuyendo la razón de transmisión. Puede notarse que no todos los protocolos de transporte tienen la capacidad de reaccionar para evitar la congestión. Por ejemplo, el protocolo de datagrama de usuario, UDP, no responde a la señalización de congestión. Al tráfico soportado por este tipo de protocolos es denominado tráfico **no sensible**. Su presencia en enlaces congestionados puede causar una distribución no equitativa de la capacidad.

El algoritmo utilizado en RED señala a las fuentes de tráfico antes de que la cola física se llene. La señalización se realiza marcando (usando por ejemplo ECN)[4] o "botando" los paquetes con cierta probabilidad $p(a_q)$ dependiendo del tamaño medio de la cola.

Esta probabilidad es calculada con cada arribo de paquete como:

$$p(a_q) = \begin{cases} 0 & \text{if } a_q < \text{mín}_{th} \\ 1 & \text{if } a_q \geq \text{máx}_{th} \\ \text{máx}_p \left(\frac{a_q - \text{mín}_{th}}{\text{máx}_{th} - \text{mín}_{th}} \right) & \text{if } \text{mín}_{th} \leq a_q < \text{máx}_{th} \end{cases}$$

donde:

mín_{th} y máx_{th} : Cotas inferior y superior del tamaño medio de la cola, dentro de las cuales la probabilidad tiene un comportamiento lineal con pendiente positiva.

máx_p : Máximo valor de probabilidad en ese intervalo.

a_q : Tamaño medio de la cola, calculado a partir del valor instantáneo de la cola q , como:

$$a_q \leftarrow (1 - w_q) a_q + w_q q, \quad 0 < w_q < 1$$

La configuración de los parámetros del algoritmo ha demostrado ser muy dependiente de las características de la red [7-9]. Este estudio utiliza la versión adaptativa de RED (ARED). [11] Esta tiene la capacidad de ajustar dinámicamente los parámetros del algoritmo según las condiciones de tráfico imperantes en la red. De acuerdo con sus diseñadores solo es necesario establecer el tamaño medio de cola deseado, o equivalentemente, la demora media de los paquetes en la cola.

Una cuestión importante en la configuración del algoritmo AQM es la forma en que será medida la longitud de la cola. Esta medición puede ser relativa a la cantidad de paquetes (modo de paquetes) o la cantidad de bytes (modo de bytes) presentes en la cola. Un estudio presentado por L. Le [18] argumenta que existe un sesgo en la señalización hacia los paquetes de mayor tamaño cuando se opera en modo de bytes. Esto quiere decir que las aplicaciones que generan pequeños paquetes (ejemplo aplicaciones de VoIP) pudieran tener un tratamiento preferencial cuando se opera en modo de bytes.

TÉCNICAS DE VoIP Y QoS

Uno de los mayores retos en las redes de próxima generación (NGN) es ofrecer una calidad de servicio similar a la del sistema de telefonía tradicional. Las redes IP y su paradigma del mejor esfuerzo causa severos daños a la calidad de las aplicaciones de tiempo real. En los sistemas de VoIP, la demora, el *jitter* y la pérdida de paquetes deterioran la percepción de la voz. Varias técnicas han sido desarrolladas para reducir el impacto de estos factores en la calidad de voz.

a) Sistemas de VoIP

En una comunicación de VoIP la voz es digitalizada y codificada utilizando técnicas estandarizadas (ejemplo G.711, G.729, GSM, G.723, etcétera). Las tramas producidas por estos *codecs* son ensambladas en paquetes comúnmente

pertenecientes al **protocolo de tiempo real** (RTP), el cual a su vez es encapsulado en datagramas UDP. En el lado del receptor los paquetes que arriban son desensamblados y colocados en *buffer* para absorber las variaciones en la demora introducidas por la red. Finalmente, la señal de voz es reconstruida a partir de las muestras digitalizadas.

Como puede observarse en la tabla 1, los *codecs* difieren en la razón de bit producida. Esta reducción en el consumo de ancho de banda es al costo del deterioro de la calidad de la voz, expresada en este caso por el factor de degradación cuyo valor es un indicador de la severidad del deterioro. Subsiguientes aumentos en la eficiencia de la transmisión pueden lograrse utilizando técnicas de supresión de silencio. [19]

Tabla 1 Características de los <i>codecs</i>			
Codec	Referencia	Razón (kb/s)	Factor de degradación
MIC	G.711	64	0
CS-ACELP	G.729	8	10
VSELP	GSM	5,6	23
ACELP	G.723	5,3	19

Los *codecs* también pueden introducir demoras significativas debido al procesamiento de la señal. Además de la demora de codificación, a la demora de extremo a extremo también contribuyen la demora de empaquetamiento, la demora de red, la demora en el *buffer* de reproducción y la demora de decodificación. Cuando la demora total es mayor que cierto valor (aproximadamente 300 ms) se hace difícil mantener una comunicación fluida entre los interlocutores. Adicionalmente la combinación de la demora y el eco produce un efecto indeseable en la comunicación. [13] El *jitter*, mayormente debido a oscilaciones en la longitud de la cola de los enrutadores, causa la llegada de paquetes fuera del tiempo, los cuales son descartados en el extremo de la comunicación. El receptor introduce un margen de tiempo para absorber la variación de los retardos colocando los paquetes en un *buffer* hasta ser reproducidos. El tamaño requerido para este *buffer* de reproducción dependerá de la magnitud de las variaciones de los retardos y de la demora media de extremo a extremo.

Debido a la dinámica variación de la demora de red es difícil establecer a priori un tamaño máximo para el *buffer* de reproducción. Incluso para una misma comunicación de voz las demoras pueden variar significativamente. Para resolver este problema se han desarrollado varios algoritmos para establecer la máxima demora introducidas por el *buffer* de reproducción de forma adaptativa. [20,21] Estas técnicas permiten reducir significativamente la razón de pérdida de paquetes.

La pérdida de paquetes en ráfagas, principalmente ocasionada por la congestión de red, afecta severamente la calidad de la señal de voz. Según estudio [22] la localización de la ráfaga de pérdidas dentro de la comunicación de voz hace que esta sea percibida de forma diferente. Una ráfaga de pérdidas al final de la conversación tiene un efecto más perjudicial que si ocurriera al principio de la misma. Este efecto es conocido como **efecto cercano**.

La pérdida de paquetes, ya sea por congestión u otros problemas de red o por el arribo tardío de los mismos, puede ser mitigada adicionando redundancia. Por ejemplo, mediante el uso de las técnicas FEC (*forward error correction*) un paquete perdido puede ser recuperado por las copias acareadas por paquetes subsiguientes. [20]

Las pérdidas a ráfaga ocasionadas por la congestión de red reducen la eficiencia de estas técnicas. Un método simple para minimizar el efecto de la pérdida de paquetes es el uso de PLC (*packet loss concealment*). [23] Este mecanismo consiste en remplazar los paquetes perdidos infiriendo los datos de la información aportada por los paquetes que arribaron previamente. De la misma forma que ocurre con las técnicas FEC, los beneficios de las técnicas PLC se desvanecen cuando los paquetes se pierden en ráfaga. La combinación de un *buffer* de reproducción adaptativo con mecanismos PLC puede brindar una mejora significativa en la calidad de la señal audible. [20]

b) Evaluación de la calidad de servicio

El registro medio de opinión MOS (*mean opinion score*) [24] ha sido tradicionalmente usado para medir la percepción subjetiva de una comunicación de voz. El MOS establece una escala de 1-5, donde el mayor valor equivale a la mejor calidad. Dado que el MOS es un registro subjetivo, difícil de llevar a cabo, en algunas situaciones prácticas se emplean pruebas objetivas como por ejemplo PESQ [25] y PSQM. [26]

La recomendación G.107 de la UIT describe un modelo computacional, conocido como el modelo-E, que incorpora los factores de degradación presentes en los modernos sistemas de transmisión de datos. El resultado del modelo es un valor escalar de determinación de índice de calidad, R , el cual se calcula como:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e-eff} + A$$

donde:

R_0 : Representa en principio la relación señal/ruido básica.

I_s : Combinación de todas las degradaciones que aparecen de forma más o menos simultánea con la señal vocal.

I_d : Representa las degradaciones producidas por el retardo.

El factor de degradación efectiva del equipo I_{e-eff} representa las degradaciones producidas por *codecs* de velocidad binaria baja incluyendo también la degradación debida a pérdidas de paquetes de distribución aleatoria, y el factor de mejora A permite compensar los factores de degradación cuando existen otras ventajas de acceso para el usuario.

El índice arrojado por el modelo-E puede ser fácilmente asociado al registro MOS. En la tabla 2 se muestra la relación entre ambos índices.

En un estudio publicado en ETSI TR 101 [27] se utiliza un modelo markoviano para incorporar el efecto de la pérdida de paquetes en ráfaga y el efecto cercano a las primeras versiones del modelo-E (las versiones actuales incluyen la pérdida de paquetes en ráfaga).

En el citado trabajo se utiliza un modelo de Gilbert-Elliott para capturar la naturaleza abrupta en que se manifiesta la pérdida de paquetes. Un período de tiempo con alta razón de pérdida es denominado **ráfaga** y al período de tiempo entre ráfagas se le denomina **calma**. El valor de la razón de pérdida que delimita la ráfaga de la calma es 6,25 %. Es sabido que la transmisión de calma a ráfaga, y viceversa, no tiene un efecto inmediato en la calidad de la voz percibida [22] como se ilustra en la figura 1. Este elemento es tomado en cuenta para calcular el factor de degradación efectiva del equipo. [27]

Recientemente el RFC 3611 [28] incorporó un bloque de reporte de mediciones de VoIP al protocolo de control de RTP (RTCP) que incluye las consideraciones de ITU-T [13] y ETSI-TR. [27] Estas mediciones están destinadas a monitorear las comunicaciones de voz sobre IP. En el presente trabajo se utiliza el procedimiento que aparece en T. Friedman [28] para evaluar el impacto de AQM en la calidad de servicio de las aplicaciones de VoIP.

Tabla 2
Equivalencia entre valores R y MOS

Satisfacción del usuario	Factor R (límite inf.)	MOS (límite inf.)
Muy satisfechos	90	4,34
Satisfecho	80	4,03
Algunos usuarios insatisfechos	70	3,60
Muchos usuarios insatisfechos	60	3,10
Casi todos los usuarios insatisfechos	50	2,58

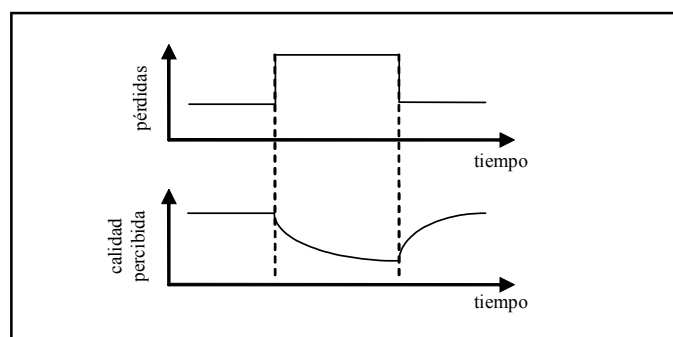


Fig. 1. Efecto de la razón de pérdida en la calidad de voz percibida.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Para medir el efecto del manejo activo de colas en la calidad de servicio de las aplicaciones de voz sobre IP se realizó un extenso conjunto de simulaciones utilizando el *network simulator* versión 2 (NS2). La topología de red usada está compuesta por un enlace saturado por una mezcla de flujos de larga y corta duración atravesando el enlace en ambos sentidos.

La figura 2 muestra la estructura topológica y las principales fuentes de tráfico usadas. Los tiempos de ida y retorno para las conexiones TCP varían en el rango de 20 a 400 ms y el tamaño de los segmentos se ajustó a 1000 bytes. También se simula tráfico no sensible al control de congestión introduciendo sesiones UDP.

El mecanismo de control de congestión en estudio fue activado en los enrutadores con una capacidad máxima en la cola para ciento veinte paquetes. Los parámetros de control del algoritmo AQM se establecieron siguiendo la guía que aparece en S. Floyd [11]. El tamaño de cola deseado se fijó en veinte paquetes. Esto equivale a una demora promedio en la cola de 40 ms, considerando un tamaño medio de los paquetes de 500 bytes.

Las comunicaciones de voz fueron simuladas utilizando tráfico de razón de bit constante (CBR). Para esto se establecieron sesiones UDP con carga útil de 92 bytes por paquete, ochenta correspondientes a las muestras de audio y doce a la cabecera RTP. Los paquetes fueron enviados con una periodicidad de 10 ms para simular un codificador G.711. No se usaron técnicas de supresión de silencio. La duración de las comunicaciones de voz se acotó a tres minutos y estas fueron iniciadas secuencialmente intercalando períodos de diez segundos entre ellas. Las trazas de los paquetes recibidos en el extremo de la comunicación fueron almacenadas en un fichero de datos.

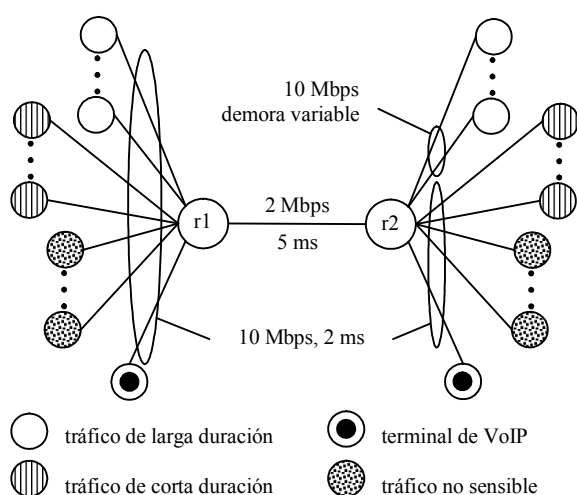


Fig. 2. Topología de red.

Para evaluar la calidad de servicio resultante se procesó el fichero de trazas postsimulación. Para asemejar el comportamiento de un receptor real se introdujo un *seudo-buffer* de reproducción adaptativo, programando la reproducción de los paquetes en un tiempo equivalente a la demora media de extremo a extremo más cuatro veces la desviación estándar de la demora.

Los paquetes que arribaron tardíamente son considerados como perdidos en el cálculo del factor de degradación efectivo del equipo. Debido a la localización aleatoria de las ráfagas de pérdidas paquetes dentro de la comunicación de voz no se tuvo en cuenta el efecto cercano. Para el cálculo del factor de degradación por retardo se asumió una perfecta cancelación de eco. Las mediciones reportadas siguen la metodología propuesta por T. Friedman. [28]

IMPACTO DE AQM EN VoIP

a) Botando paquetes

Dado que descartar los paquetes es la forma tradicional de señalar la presencia de congestión a las fuentes de tráfico, primero se analizará este caso. La tabla 3 recoge las mediciones reportadas por dos llamadas no superpuestas en el escenario de la figura 2 utilizando una cola DT.

Las llamadas de prueba se mezclaron con cincuenta conexiones TCP de larga duración, así como con tráfico generado por conexiones de corta duración. Las mediciones reportadas en la tabla 3 siguen las definiciones empleadas en Friedman, [28] excepto para la **demora m²e**, la cual es la demora media en un solo sentido percibida por los usuarios.

Los resultados muestran un comportamiento similar en ambas llamadas. El registro medio de opinión de calidad conversacional indica la insatisfacción de prácticamente la totalidad de los usuarios. La pérdida de paquetes en ráfagas y la demora tienen un peso similar en el deterioro de la calidad de la voz. El mayor aporte a la demora la hacen el retardo sufrido por los paquetes en la cola y la demora en el *buffer* de reproducción. La alta carga de tráfico provoca oscilaciones en la cola próximas a la zona de desborde; causando pérdida de paquetes en ráfaga, retardos y variación de los retardos.

La figura 3 muestra la demora de red sufrida por los paquetes de una de las comunicaciones de voz. Puede observarse que la demora es muy variable, lo que implica una gran cantidad de espacio en el *buffer* de reproducción para absorber el *jitter*. Por otra parte, la alta ocupación de la cola resulta en una plena utilización del enlace.

Una reducción de la demora en la cola y sus variaciones manteniendo o reduciendo la razón de pérdida de paquetes debe producir un incremento significativo de la calidad de la voz. En el resto de esta sección se analiza el impacto del manejo activo de cola en la calidad de servicio de las aplicaciones de VoIP. Primero se analizará la operación de AQM en el modo de bytes teniendo en cuenta que esta pudiera ser favorable para los paquetes de voz. El análisis de la operación en modo de paquetes se verá posteriormente en esta sección.

Manteniendo la configuración de red antes descrita y activando ARED en los enrutadores de la figura 2 se puede observar una significativa disminución del retardo. Como se ilustra en la figura 4, el mecanismo AQM estabiliza la longitud media de la cola en un valor próximo al deseado (40 ms). La demora de red promedio es de 58,20 ms con una desviación estándar de 35,65 ms. Debe notarse que la demora que sufren los paquetes que no tienen que esperar en la cola es de 9,67 ms por lo que la demora promedio en la cola es de 48,53 ms.

Si la reducción del retardo por la acción del mecanismo AQM es algo esperado, la dramática disminución de la razón de pérdidas es un resultado sorprendente (ver tabla 3). Esta reducción es causada por el incremento del período de tiempo entre ráfagas y la disminución de su densidad. Esto significa que ARED es capaz de estabilizar el tamaño de la cola alrededor del valor deseado sin imponer una razón de pérdidas agresiva. La reducción de los factores de degradación eleva el valor del índice R , dando lugar a un registro medio de opinión para la calidad conversacional por encima de 4,20 puntos. Esto representa una satisfacción de los usuarios similar a la del sistema telefónico tradicional.

El precio pagado por el aumento de la calidad de servicio para las aplicaciones de VoIP es la disminución de la utilización del enlace, el cual es ahora de un 95 %. En una situación práctica este efecto puede ser mitigado ajustando el valor de cola deseado de forma razonable, en virtud de la relación de compromiso que existe entre la utilización y la demora.

Subsiguientes simulaciones revelan que ARED exhibe excelentes resultados en diferentes condiciones de carga. La figura 5 muestra los valores de MOS obtenidos cuando el número de flujos TCP de larga duración varía de 10 a 100. En todos los casos, el índice está por encima de los 4,03 puntos (límite inferior para alcanzar una adecuada satisfacción de los usuarios).

Puede notarse además la diferencia en relación con la cola DT, en cuyo caso la calidad decrece progresivamente con el aumento de la carga.

Cuando el número de flujos TCP está por debajo de 10, el registro medio de opinión para calidad conversacional logrado por ARED coincide con los resultados antes expuestos. Experimentos de adiciones disminuyendo el tráfico ofrecido por debajo de la capacidad del enlace también muestran una adecuada satisfacción de los usuarios de acuerdo con los registros obtenidos.

b) Usando ECN

Se analiza el impacto del manejo activo de cola en las aplicaciones de VoIP cuando los paquetes, en vez de ser descartados, son marcados utilizando ECN. En este caso una cuestión importante a tener en cuenta es la forma en que es tratado el tráfico no sensible cuando se produce un evento de marca. La implementación de ARED utilizada descarta los paquetes que no soportan ECN, en contraste con otros algoritmos AQM que los dejan pasar sin realizar ninguna acción sobre estos. Este comportamiento puede ayudar a evitar que el tráfico no sensible devore la capacidad disponible, pero pudiera imponer una razón de pérdida significativa a los paquetes de voz. Por otra parte, cuando no se toma ninguna acción sobre los flujos no sensibles se hace más difícil lograr la estabilidad del tamaño de la cola. Ambos aspectos, el tamaño de la cola y la razón de pérdida de paquetes, impactan severamente la calidad de las aplicaciones de voz.

Repitiendo el experimento, ahora con el uso de ECN, se obtienen los resultados mostrados en la figura 6. El registro medio de opinión prácticamente no difiere del obtenido con el régimen de pérdida de paquetes (figura 5).

Tabla 3
Mediciones reportadas para las llamadas de prueba

Medición	Llamada No. 1		Llamada No. 2	
	Cola DT	ARED	Cola DT	ARED
Razón de pérdida (%)	6,26	1,00	6,04	0,91
Razón de descarte (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
Densidad de ráfaga (%)	30,95	19,57	31,06	17,62
Densidad de calma (%)	0,71	0,75	0,56	0,69
Duración de ráfaga (ms)	142,33	106,82	143,00	119,47
Duración de calma (ms)	630,81	7 723,91	650,57	8 886,5
Demora $m2e$ (ms)	354,47	205,2	363,25	202,35
Factor R	50,24	85,30	50,05	85,95
MOS _{CQ}	2,59	4,21	2,58	4,23

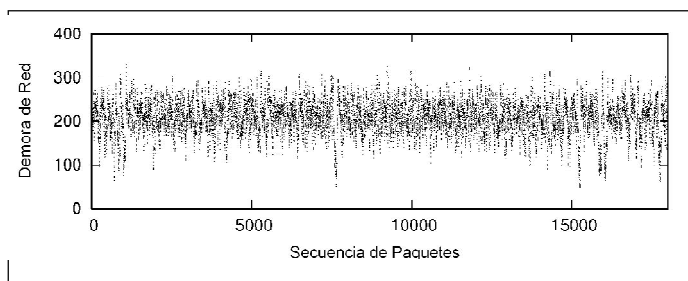


Fig. 3. Demora de red (ms) usando DT.

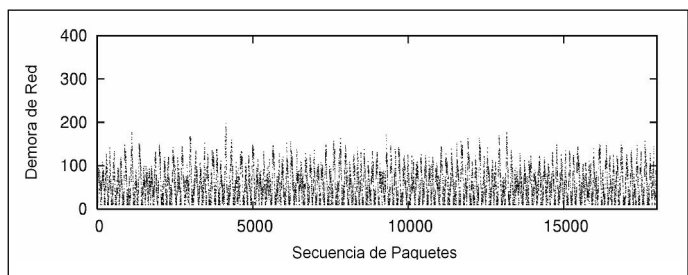


Fig. 4. Demora de red (ms) usando ARED.

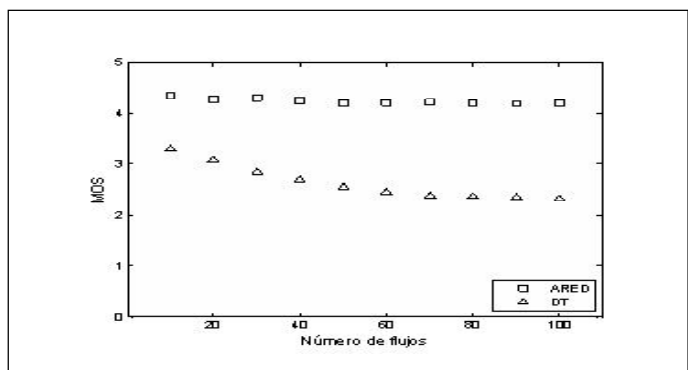


Fig. 5. Registro medio de opinión incrementando la carga.

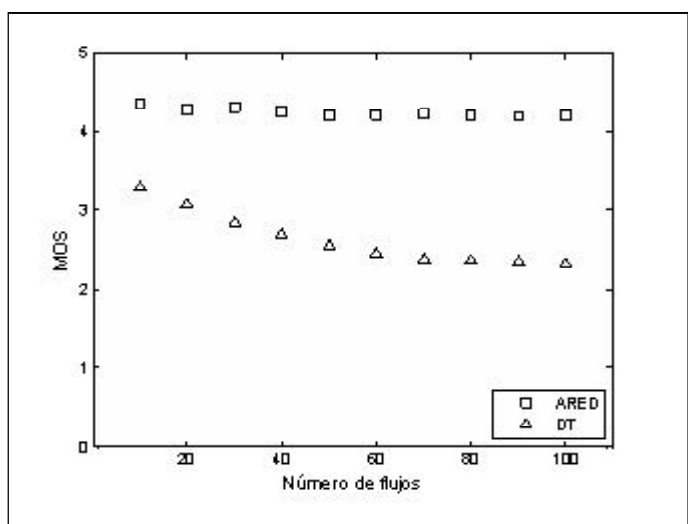


Fig. 6. Registro medio de opinión utilizando ECN.

Tabla 4

Otras mediciones reportadas con ARED

Medición	Modo de paquetes	Tráfico no sensible
Razón de pérdida (%)	1,02	1,78
Razón de descarte (%)	0,00	0,00
Densidad de ráfaga (%)	19,54	19,14
Densidad de calma (%)	0,71	0,84
Duración de ráfaga (ms)	116,15	138,81
Duración de calma (ms)	6554,81	2510,29
Demora m ² e (ms)	197,35	231,72
Factor <i>R</i>	85,83	78,05
MOS _{CQ}	4,22	3,95

Ahora la demora de extremo a extremo oscila alrededor de los 190 ms (unos 14 ms por debajo de la antes obtenida tabla 3). Mientras la razón de pérdida de paquetes permanece casi idéntica a la anterior. Esto quiere decir que el mecanismo AQM marca los paquetes acertadamente para controlar la razón de emisión de las fuentes TCP. La utilización del enlace es del 96 %, la cual es ligeramente superior a la observada cuando los paquetes eran descartados.

c) Simulaciones complementarias

Las simulaciones anteriores se realizaron operando el mecanismo AQM en modo de bytes. Repitiendo el experimento inicial para una llamada, pero ahora operando en modo de paquetes se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 4. Usando ARED en este modo se observa un ligero decrecimiento de la demora de extremo a extremo, manteniéndose prácticamente la misma razón de pérdida de paquetes. La utilización del enlace permanece en el 95 %.

El último experimento fue conducido mezclando treinta flujos TCP con tráfico no sensible. La carga de tráfico ofrecida por este último se fijó en $\frac{1}{4}$ de la capacidad del enlace congestionado. Para el caso de una cola DT se encontró una exagerada razón de pérdida de paquetes, lo que dio lugar a un MOS de 2,53. Usando ARED se mejora ostensiblemente el registro alcanzado con el esquema tradicional de manejo de cola según se aprecia en la tabla 4. El registro medio de opinión obtenido es de 3,95 (valor próximo al registro que indica la satisfacción de los usuarios), con una utilización del enlace de aproximadamente el 97 %.

CONCLUSIONES

Se realizó un extenso conjunto de simulaciones para evaluar el impacto del manejo activo de colas en la calidad de servicio de VoIP. Los factores de degradación de red fueron vinculados a la percepción subjetiva de los usuarios por medio

de modelos algorítmicos bien conocidos. El estudio se centró en uno de los algoritmos AQM más representativos (ARED). Los principales resultados obtenidos son:

- ARED operando en modo de bytes provee un excelente tratamiento a los paquetes de voz, incluso en condiciones de alta carga de tráfico. Ofreciendo una percepción de la calidad de voz similar a la del sistema telefónico tradicional.
- Cuando se usa ECN los resultados son similares a los obtenidos trabajando en el régimen de pérdida.
- No hay variación significativa en la calidad de servicio cuando el algoritmo opera el modo de paquetes.

Se puede concluir, basados en las simulaciones realizadas, que el uso de mecanismos para el manejo activo de colas, como ARED, significativamente mejoran la calidad de servicio de las llamadas de voz que atraviesan enlaces congestionados. Sin embargo, resulta difícil atrapar en un modelo de simulación la diversidad de escenarios presentes en la red global, por lo que se requiere continuar la investigación en este campo mediante la experimentación en escenarios reales.

REFERENCIAS

1. **HOLLOT, C. et al.** "Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flow". *IEEE Trans. Automat. Contr.* June, 2002, vol. 47, nº. 6, p. 945-959.
2. **WYDROWSKI, B. and ZUKERMAN, M.** "GREEN: An Active Queue Management Algorithm for a Self Managed Internet". En *Proc. ICC'02*. May, 2002, vol. 4, p. 2368-2372.
3. **PARRIS, M.; JEFFAY, K. and SMITH, F. D.** "Lightweight Active Router-Queue Management for Multimedia Networking". En *Proc. of SPIE, Conf. on Multimedia Computing and Networking*, January, 1999.
4. **FLOYD, S. and JACOBSON, V.** "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance". *IEEE/ACM Trans. Networking*. August, 1993, vol. 1, nº. 4, p. 397-413.
5. **RAMAKRISHNAN, K.; FLOYD, S. and BLACK, D.** "The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP", *RFC 3168*, September, 2001.
6. **BRADEN, B. et al.** "Recommendations on Queue Management and Congestion Avoidance in the Internet". *RFC 2309*, April, 1998.
7. **FENG, W. et al.** "A Self-Configuring RED Gateway". En *Proc. of IEEE Infocom'99*, New York, March, 1999.
8. **FLOYD, S. and KOHLER, E.** "Internet Research Needs Better Models". *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* January, 2003, vol. 33, nº1, 29-34.
9. **MAY, M. et al.** "Reasons not to Deploy RED". En *Proc. of 7th Int. Workshop on Quality of Service (IWQoS '99)*, London, June, 1999.
10. **FLOYD, Sally:** *Recommendation on Using the Gentle Variant of RED*. March, 2000, disponible en: <<http://www.icir.org/floyd/red/gentle.html>>
11. **FLOYD, S.; GUMMADI, R. and SHENKER, S.** *Adaptive RED: An Algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management*. August, 2001, disponible en: <<http://www.icir.org/floyd/papers/adaptiveRed.pdf>>
12. **BITORIKA, A.; ROBIN, M. and HUGGARD, M:** "An Evaluation Framework for Active Queue Management Schemes". En the *11th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS'03)*. October, 2003, p. 200-206.
13. **ITU-T Recommendation G.107.** *The E-model, a Computational Model for Use in Transmission Planning*, March, 2005.
14. **MAY, Martin; BONALD, Thomas and BOLOT, Jean-Chrysostome.** "Analytic Evaluation of RED Performance". En *Proceedings of IEEE Infocom*, March, 2000.
15. **CARLBERG, K.; BROWN, I. and BEARD, C.** *Framework for Supporting Emergency Telecommunications Service (ETS) in IP Telephony*. *RFC 4190*, November, 2005.
16. **PAXSON, V. AND FLOYD, S.** "Wide Area Traffic: the Failure of Poisson Modeling", *IEEE/ACM Trans. Networking*, June, 1995, vol. 3.
17. **ABRY, P. et al.** "Wavelets for the Analysis, Estimation, and Synthesis of Scaling Data", *Self-Similar Network Traffic Analysis and Performance Evaluation*, 1999.
18. **LE, L. et al.** "The Effects of Active Queue Management and Explicit Congestion Notification on Web Performance", *ACM SIGCOMM*, 2003.
19. **JIANG, W. and SCHULZRINNE, H.** "Analysis of on-off Patterns in VoIP and their Effect on Voice Traffic Aggregation". En *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Communication Networks*, October, 2000, p. 82-87, Las Vegas, NV.
20. **ROSENBERG, J.; QIU, L. and SCHULZRINNE, H.** "Integrating Packet FEC into Adaptive Voice Playout Buffer Algorithms on the Internet". En *Proc. IEEE INFOCOM 2000*. March, 2000, vol. 3, p. 1705-1714, Tel Aviv, Israel,
21. **SREENAN, C. J. et al.** "Delay Reduction Techniques for Playout Buffering", *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 2, p. 88-100, June, 2000.
22. "Study of the Relationship Between Instantaneous and Overall Subjective Speech Quality for Time-Varying Quality Speech Sequences: Influence of a Recency Effect", *ITU-T Contribution COM12-D139 France Télécom R&D (Q14/12)*, May, 2000.
23. **WAH, B. W.; SU, X. and LIN, D.** "A Survey of Error-Concealment Schemes for Real-Time Audio and Video Transmissions Over the Internet". En *Proc. Int. Symposium on Multimedia Software Engineering, IEEE*, December, 2000, p. 17-24, Taipei, Taiwan.

24. "Methods for Subjective Determination of Transmission Quality", ITU-T *Recommendation*, p. 800, August, 1996.
25. "Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)", ITU-T *Recommendation*, p. 862, November, 2005.
26. "Objective Quality Assessment of Telephone Band Speech *codecs* (PSQM)", ITU-T *Recommendation*, p. 861, February, 1998.
27. ETSI TR 101 329-5. "Quality of Service (QoS) Measurement Methodologies", January, 2000.
28. FRIEDMAN, T.; CACERES, R. and CLARK, A. "RTP Control Protocol Extended Reports (RTCP XR)", *RFC 3611*, November, 2003.

AUTORES

Vitalio Alfonso Reguera

Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba

Félix F. Álvarez Paliza

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba

Pedro Arco Ríos

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba

Carlos A. Rodríguez López

Ingeniero en Electrónica, Máster en Telecomunicaciones, Profesor Auxiliar, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba

Evaluation of the Quality of Service of Voice Over Internet Protocol (VoIP) Using Active Queue Management (AQM)

Abstract

This paper presents a comprehensive study about the impact of active queue management (AQM) on Voice over Internet Protocol (VoIP) quality of service. One of the most representative AQM scheme is analyzed through extensive simulation and its effect on the perceived quality of voice calls is evaluated. Different network scenarios, changing network loads and different scheme control parameters are investigated. Network impairments are related to user perception by means of well known algorithmic models, expressing user satisfaction in the MOS scale. The main results obtained show that the use of active queue management schemes like adaptive random early detection (ARED) significantly improve the perceived quality of voice calls

Key words: queuing analysis, Internet, protocols