

Gerência Ativa de Filas para Melhoria da Qualidade na Transmissão de Vídeo Adaptativo

Wladimir G. Morais, Carlos E. Maffini e Carlos M. Pedroso

Resumo—Para transmissões de vídeo em tempo real, minimizar parâmetros como atraso e perda de pacotes é fundamental para manter a qualidade em níveis satisfatórios. A ampliação da capacidade de *buffer* nos roteadores impulsiona o fenômeno conhecido por *bufferbloat*, que pode resultar em grande aumento da latência. O desenvolvimento de algoritmos para Gerência Ativa de Filas (*Active Queue Management - AQM*) complementam, na camada de rede, o trabalho de controle de congestionamento dos protocolos da camada de transporte e aplicação. O presente artigo propõe um método AQM que possibilita a melhoria da qualidade na transmissão de vídeo ao vivo em enlaces congestionados. O estudo foi realizado com DASH (*Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP*). A eficiência do método proposto é demonstrada a partir de transmissões reais de vídeo em conjunto com simulações computacionais. Os resultados indicam ganhos significativos em comparação à outros métodos disponíveis atualmente.

Palavras-Chave—Multimídia, Live Streaming, DASH, AQM

Abstract—Real time video streaming applications require guarantee of delay. The expanding buffers size in routers drives the phenomenon known as *bufferbloat* that results in increases in delay. The development of algorithms for Active Queue Management (AQM) complements the work of congestion control of transport and application layer protocols. In this article we present a new AQM method to improve the quality as perceived by the user. Performance evaluation was done with Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP (DASH), using real video streaming over a simulated network. Results indicate that the proposed model outperform the currently available methods.

Keywords—Multimedia, Live Streaming, DASH, AQM

I. Introdução

Com o aumento do número de dispositivos com acesso à Internet, várias aplicações acabam concorrendo pela largura de banda na última milha da rede de um ISP (*Internet Service Provider*), criando gargalos que afetam a qualidade do serviço [1]. Em 2020, o tráfego de vídeo representará 82% de todo o tráfego consumido pelos usuários da Internet [2]. O fluxo de vídeo codificado possui um comportamento denominado VBR (*Variable Bit Rate*). Dependendo do nível de utilização das filas dos roteadores, esse comportamento pode ocasionar congestionamentos, levando a possíveis perdas de pacotes e aumento do atraso, impactando negativamente na qualidade percebida pelo usuário.

Como alternativa para reduzir o descarte de pacotes, principalmente na última milha, onde tem-se gargalos na rede, as operadoras buscam aumentar a capacidade de *buffer* dos roteadores, na tentativa de melhor acomodar o tráfego. Esta

Carlos M. Pedroso, Carlos E. Maffini e Wladimir G. Morais. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil, E-mails: pedroso@eletrica.ufpr.br, carlos.maffini@ifpr.edu.br e wladirmorais@ufpr.br.

tendência foi impulsionada pela queda no preço das memórias [3]. O uso de *buffers* superdimensionados pode causar impacto na qualidade da transmissão de vídeo ao vivo, devido à alta latência na entrega dos pacotes, fenômeno conhecido por *bufferbloat* [4].

A entrega de fluxo de vídeo de modo dinâmico e adaptativo, através do protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), denominada DASH [5], vem se tornando um padrão para transmissões pela Internet. Mecanismos controle de congestionamentos são cruciais para aplicações de *live streaming* [6]. Métodos AQM surgem com o propósito de prevenir o congestionamento da rede, normalmente explorando a capacidade dos protocolos da camada de transporte, fazendo com que as fontes diminuam suas taxas de transmissão [7]. Métodos AQM tornaram-se importantes reguladores de congestionamentos e justiça no compartilhamento da largura de banda entre as aplicações. Apesar do considerável número de pesquisa na área, poucas delas exploram como o tráfego DASH interage com os métodos AQM [8].

O presente estudo encontra-se estruturado da seguinte forma: a Seção II apresenta uma visão geral da tecnologia DASH; na Seção III são apresentados os alguns dos métodos AQM mais relevantes; trabalhos relacionados são apresentados na Seção IV; o método proposto é descrito na Seção V; a Seção VI apresenta a avaliação de desempenho; resultados obtidos são apresentados e discutidos na Seção VII; finalizando, a Seção VIII apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

II. Transmissão de Vídeo Adaptativo com DASH

As plataformas modernas de distribuição de vídeo pela Internet adotaram o DASH como a principal tecnologia para entrega de vídeo aos clientes [8]. A fim de propor um padrão para a entrega de fluxos de vídeo sobre o HTTP, buscando compatibilidade entre os distintos fornecedores, o MPEG (*Moving Picture Expert Group*) criou o padrão denominado MPEG-DASH [9]. O vídeo é codificado em diferentes taxas de qualidade e dividido em segmentos de curta duração. De modo heurístico, o cliente decide em qual qualidade cada segmento deve ser solicitado, baseando-se em parâmetros como taxa de transferência, atraso e *buffer* [10]. Ao iniciar uma sessão, o cliente envia uma requisição ao servidor, solicitando o arquivo de manifesto, conhecido por MPD (*Media Presentation Description*). Nele, uma série de itens são descritos, como perfil, tempo de duração dos segmentos, qualidades disponíveis e respectivas taxas de transmissão.

No DASH, o vídeo possui representações apropriadas para determinadas taxas de transferência, possibilitando que a transmissão se adapte às flutuações que ocorrem na largura de

banda. O padrão H.264/AVC (*Advanced Video Coding*) é o mais utilizado na codificação de vídeo, com boa capacidade de compressão e manutenção da qualidade. A fim de garantir um fluxo contínuo na reprodução, os clientes devem possuir espaço para armazenar de 20 a 30 segundos de vídeo [11]. Porém, no caso de fluxos de vídeo de tempo real, como em transmissões ao vivo, é impraticável o armazenamento de vídeo por grandes períodos de tempo [12]. Entretanto, diminuir o tamanho do *buffer*, obrigando o cliente a armazenar de 2 a 3 segundos de vídeo, implica que o reprodutor reaja de forma rápida e robusta às mudanças no estado de congestionamento da rede [11].

III. Gerência Ativa de Filas

Métodos AQM são mecanismos controladores proativos de congestionamentos que atuam em um roteador [7]. São responsáveis pela Gerência Ativa de Filas no espaço de *buffer*, realizando descartes antecipados e/ou enfileiramento de pacotes, de forma a melhor acomodar o tráfego. O RED (*Random Early Detection*) [13] consiste em um método que se baseia no tamanho médio da fila, calculado através de uma média móvel exponencial EWMA (*Exponential Weighted Moving Average*). Dois principais limiares são utilizados: o inferior (min_{th}) e o superior (max_{th}). Se o valor do tamanho médio da fila estiver abaixo de min_{th} nenhum pacote será descartado. Caso esse valor seja maior que min_{th} , porém menor que max_{th} , pacotes podem ser descartados com probabilidade proporcional ao tamanho médio da fila. Quando a média da fila excede max_{th} todos os pacotes recebidos são descartados.

O ARED (*Adaptive RED*) [14] consiste em uma proposta de melhoria do RED. Por meio de adaptações que realizam o ajuste dinâmico dos parâmetros, conforme condições instantâneas, o ARED incrementa a robustez do algoritmo original. Se o comprimento médio da fila oscila em torno do limite mínimo, a detecção precoce é muito agressiva. Por outro lado, se o comprimento médio da fila oscila em torno do limite máximo, a detecção antecipada está sendo muito conservadora. Sendo assim, o ARED altera a probabilidade de descarte de acordo com a intensidade detectada, otimizando o mecanismo de descarte de pacotes.

O CoDel (*Controlled Delay Management*) [15] é um método auto-configurável que dispensa o ajuste manual de parâmetros. Sua operação baseia-se no controle do atraso na fila através da criação de uma estampa de tempo para cada pacote enfileirado. O CoDel monitora o atraso experimentado pelos pacotes, de forma que se o atraso for maior que um determinado limiar, o algoritmo entra em estado de descarte, excluindo um pacote e agendando tempo para o próximo evento, que por sua vez é inversamente proporcional a raiz quadrada do número de pacotes descartados da fila.

O PIE [16] (*Proportional Integral Controller Enhanced*) é um método que combina os benefícios do descarte randômico do RED com a detecção de congestionamento em função do atraso médio da fila proposto pelo CoDel. No PIE, a probabilidade de descarte é atualizada periodicamente, baseando-se da quantidade de pacotes desenfileirados e no limiar de atraso. Além disso, utiliza um valor máximo permitido para

que rajadas de pacotes sejam alocadas no *buffer* sem que ocorram descartes.

IV. Trabalhos Relacionados

O estudo de H. J. Kim et al [17] demonstra que a utilização de métodos AQM reduz a taxa de perda de pacotes e aumenta de maneira significativa a qualidade percebida pelos usuários na utilização de serviços multimídia, principalmente em transmissões através de enlaces congestionados.

Uma análise sobre os benefícios da implementação de métodos AQM, como o PIE e o FQ-CoDel (*Flow Queue-Controlled Delay*), para fluxos de vídeo DASH, é apresentada por J. Kua e G. Armitage [1]. O FQ-CoDel adiciona ao CoDel os benefícios do escalonamento de pacotes. Os resultados demonstram que o isolamento de fluxo e a capacidade de justiça no compartilhamento de tráfego do FQ-CoDel proporciona uma melhor experiência do usuário na presença de fluxos elásticos competitivos.

P. Branch et al [8] avalia os efeitos da aplicação dos métodos PIE, FQ-PIE e FQ-CoDel em transmissões de vídeo com a tecnologia DASH. O FQ-PIE (*Flow Queue-PIE*) consiste em um esquema híbrido que envolve os benefícios do PIE e FQ-CoDel. Os resultados indicam que o PIE possui maior tolerância às rajadas enquanto que o FQ-PIE fornece maior proteção aos fluxos DASH na presença de tráfego cruzado, proporcionando melhor desempenho.

V. Método Proposto

Este trabalho propõe um método AQM que realiza o descarte aleatório randômico baseado na estimação do tempo de permanência do pacote na fila do roteador. O tempo previsto para permanência do pacote P_i na fila é dado por $T_i = \sum_{j=1}^i B_j/C$, onde B_j é o tamanho do pacote em bits, e C é a capacidade do enlace em bits por segundo. A cada pacote P_i recebido será calculado o valor de T_i . Caso T_i seja menor que o limiar inferior T_{min} , o pacote P_i será enfileirado. Caso T_i exceda o limiar inferior T_{min} , porém ainda seja menor que o limiar superior T_{max} , o algoritmo realiza descartes aleatórios. Caso T_i exceda T_{max} , o pacote P_i será descartado. Nesse modelo, um controlador SDN (*Software Defined Network - SDN*) será responsável por informar ao plano de dados da rede as características de atraso máximo de propagação, que serão utilizados para estabelecer os limiares T_{min} e T_{max} para as filas dos roteadores.

A política enfileiramento é baseada no sistema FIFO (*First In First Out*). A probabilidade de descarte é diretamente proporcional ao limiar superior T_{max} . Ao descartar um pacote preventivamente espera-se que o mecanismo de estimação de recursos disponíveis e adaptação do DASH perceba a redução da taxa de transmissão pelo TCP. Dessa forma, o cliente pode reagir preventivamente através da seleção dos próximos segmentos de vídeo com menor qualidade, no qual será selecionada a representação mais adequada para a largura de banda disponível. O algoritmo resumido para o método proposto é dado por:

```

Para cada pacote  $P_i$ ;
 $T_i \leftarrow \sum_{j=1}^i B_j/C$ ;
se  $T_i < T_{min}$  então
    | enfileire ( $P_i$ );
fim
se  $T_{min} \leq T_i \leq T_{max}$  então
    |  $p \leftarrow T_i/T_{max}$ ;
    | se  $p > aleatorio()$  então
    | | descarte ( $P_i$ );
    | senão
    | | enfileire ( $P_i$ );
    fim
fim
se  $T_i > T_{max}$  então
    | descarte ( $P_i$ );
fim
    
```

VI. Avaliação de Desempenho

A avaliação de desempenho utilizou transmissão real de vídeo em uma rede IP simulada. O cenário foi implementado no simulador NS-3 (*Network Simulator 3*)[18]. Foi configurada uma topologia *dumbbell* contendo dois roteadores principais, conectados por um enlace de gargalo, com largura de banda de 10 Mbps. Os demais enlaces de acesso possuem largura de banda de 10 Gbps. A fim de transmitir fluxos reais de vídeo pelo simulador NS-3, duas máquinas virtuais foram configuradas, servidor de vídeo e respectivo cliente, e conectadas aos roteadores de acesso por meio do módulo *TapBridge NetDevice*.

A capacidade do enlace de gargalo baseia-se nos acessos domésticos de Internet, que apesar de muitas vezes possuírem largura de banda maior especificada, na prática são compartilhados por diversos dispositivos, resultando em menor capacidade disponível. A largura de banda referente aos demais enlaces de acesso, tem por objetivo gerar requisições e respostas em velocidade superior ao enlace de gargalo, provocando o congestionamento. A Figura 1 apresenta o cenário implementado para as simulações.

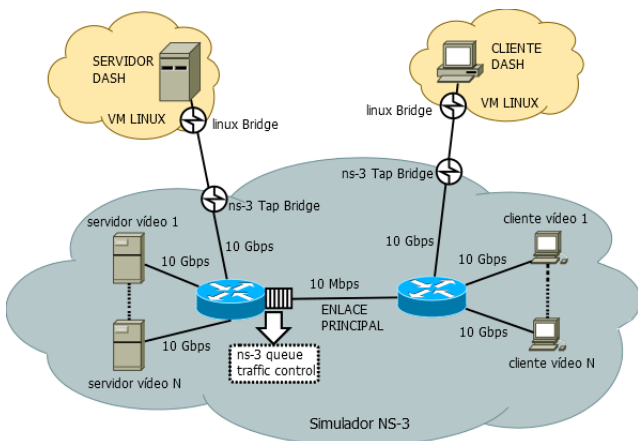


Fig. 1. Cenário de rede implementado.

A transmissão DASH foi realizada por meio de aplicações disponibilizadas pelo *Framework Multimedia GPAC*. A geração de segmentos foi realizada de forma ao vivo, seguindo o perfil *Live-H.264*, com 1 segundo de duração [10]. Segmentos expiram do servidor após determinado tempo de geração, o

que obriga o cliente a requisitar sempre o próximo segmento disponível, promovendo impacto negativo com a perda dos segmentos expirados. Os vídeos utilizados foram *Sunflower*, *Touchdown Pass*, *Big Buck Bunny*, *Pedestrian Area*, *Riverbed* e *Rush Hour*, disponíveis publicamente para testes. A Figura 2 ilustra um quadro intermediário de cada vídeo utilizado.

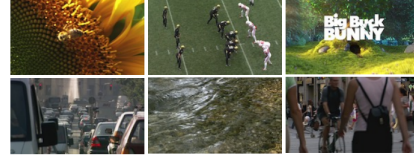


Fig. 2. Os vídeos, em sentido horário, Sunflower, Touchdown Pass, Big Buck Bunny, Pedestrian Area, Riverbed e Rush Hour.

A codificação dos vídeos foi realizada de forma *offline* através da ferramenta *FFmpeg*. Buscando uma compactação razoável, sem que a qualidade fosse prejudicada por grandes perdas na compressão, foi utilizado o GOP (*Group of Picture*) de 6 quadros, com 2 quadros *B* intercalados entre o quadro *I* e o *P* [19]. Os vídeo foram codificados nas seis distintas representações a seguir: 2.1 Mbps, 2.5 Mbps, 3.1 Mbps, 3.5 Mbps, 3.8 Mbps e 4.2 Mbps [8]. A Tabela I apresenta às principais características dos vídeos utilizados nos experimentos, como a duração total de tempo em segundos, a quantidade total de quadros que compõe a sequência, a respectiva taxa de amostragem em quadros por segundo, além do formato original em que os vídeos foram disponibilizados para os testes.

TABELA I

PARÂMETROS DOS VÍDEOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Vídeo	Duração	Frames	Frame Rate	Original
Big Buck Bunny	60s	1440	24	YUV420
Rush Hour	20s	500	25	YUV420
Sunflower	20s	500	25	YUV420
Touchdown Pass	19s	570	30	YUV422
Pedestrian Area	15s	375	25	YUV420
Riverbed	10s	250	25	YUV420

Para seleção do conteúdo, foram levadas em consideração as medidas objetivas de padrão de movimento e de detalhes da imagem, conhecidas respectivamente por *Motion Activity* e *Detail* [20]. A tabela II apresenta a relação dos vídeos e os respectivos valores para *Motion Activity* e *Detail*, além de especificar o gênero (*Genre*), conforme classificação realizada no estudo de *Zakerinasab* e *Wang* [20]. Foi acrescentado o vídeo *Touchdown Pass*, que consiste em cenas de um evento esportivo, uma vez que diversos usuários utilizam serviços de *live streaming* para acompanhar jogos transmitidos ao vivo.

TABELA II

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE IMAGEM E MOVIMENTO DOS VÍDEOS

Vídeo	Detail	Motion Activity	Genre
Big Buck Bunny	3.52	1.63	Animation
Rush Hour	3.17	3.12	Scene
Sunflower	4.04	2.57	Nature
Pedestrian Area	3.15	4.42	Scene
Riverbed	4.72	4.13	Nature

A fim de inserir tráfego de fundo no cenário, foram criadas dez fontes geradoras e seus respectivos clientes. A geração

de tráfego concorrente é baseada no modelo PPBP (*Poisson Pareto Burst Process*) [21], que consiste na sobreposição de múltiplas rajadas, representando de forma realística a agregação de tráfego na Internet. O modelo possui características de auto-similaridade e cauda pesada. Rajadas chegam de acordo com um processo de *Poisson* e seu comprimento segue uma distribuição de *Pareto*. Os resultados obtidos no estudo de *Ammar et al* [21] comprovam as características LRD (*Long-Range Dependence*) através de plotagem da função de auto-correlação.

Foi realizada transmissão real dos vídeos por meio da rede simulada com seis diferentes níveis de utilização do enlace principal: 60%, 70%, 80%, 90%, 95% e 99%. Além do método proposto, foram avaliados o RED, ARED, CoDel e PIE. Todos contendo um *buffer* com capacidade máxima de 500 pacotes, possibilitando perceber os efeitos dos descartes durante a transmissão dos vídeos. Também foi realizada a comparação com o método DropTail, utilizando um *buffer* com capacidade suficiente para que não ocorra descartes. Como o DropTail realiza descartes somente quando a fila é preenchida em sua capacidade máxima, foi possível perceber, em menor escala, os efeitos do *bufferbloat*.

O método proposto é implementado no simulador NS-3, realizando conversão entre o número de pacotes na fila e tempo estimado para permanência dos mesmos, através da Lei de *Little* [22]. Os demais métodos foram utilizados em sua configuração padrão, conforme o módulo *Traffic Control layer - Queue disciplines* [18] da versão 3.29 do NS-3. A qualidade do vídeo recebido foi estimada com o PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) [23]. Quanto maior o PSNR, melhor a qualidade percebida, pois imagens com mais similaridade resultam em valores mais altos de PSNR.

VII. Resultados

Em um primeiro experimento foram utilizados os primeiros 60 segundos do vídeo *Big Buck Bunny*. O desenho proporciona maior compactação espacial e temporal. A Figura 3(a) mostra que a medida em que se intensifica o nível de ocupação do enlace principal, se amplia a distância entre o PSNR médio resultante entre os métodos testados, com expressiva vantagem para o método proposto a partir de 70%. Já no segundo experimento utilizou o vídeo *Rush Hour*, constituído de cenas reais de intenso tráfego de veículos. Conforme resultado apresentado na Figura 3(d), nota-se, com exceção do DropTail, todos os demais métodos AQM produzem resultados próximos até 80%, com leve vantagem para o método proposto em 99%.

Em um terceiro experimento, utilizou-se o vídeo *Sunflower*, que possui pouca variação de movimento entre cenas de uma abelha com um girassol ao fundo. Através da Figura 3(e), percebe-se que o PSNR médio foi semelhante até 80%, porém após 90%, observa-se que o método proposto produz maior qualidade. Na sequência, o quarto experimento utilizou o vídeo *Touchdown Pass*, contendo cenas de um jogo de futebol americano, com bastante movimento. De acordo com a Figura 3(f), a partir de 90%, observa-se o benefício da utilização do método proposto, que apresenta melhor resultado.

Para o quinto experimento, utilizou-se o vídeo *Pedestrian Area*, com cenas reais de intenso tráfego de pedestres em um

centro urbano. Conforme pode-se observar na Figura 3(b), a partir de 90%, quando se intensifica o congestionamento, o método proposto leva vantagem, com maiores valores de PSNR médio. Finalizando, o sexto experimento utilizou o vídeo *Riverbed*, composto de cenas de vibrações na superfície da água. Com apenas 10 segundos de duração, possui o menor tempo dentre os avaliados. Através da Figura 3(c), pode-se constatar que, a partir de 90%, o método proposto mostra ligeira vantagem em relação aos demais métodos.

Observa-se que, para moderados níveis de utilização do enlace principal, como em 60% e 70%, não há diferença expressiva entre o PSNR médio obtido pelos métodos avaliados. Contudo, ao aumentar o nível de utilização a partir de 80%, os métodos atuam de forma a descartar pacotes antecipadamente, cada um utilizando seus respectivos mecanismos e características particulares para seleção e descarte, o que impulsiona diferentes valores de PSNR médio. De forma geral, percebe-se que o DropTail não é benéfico para o fluxo de vídeo adaptativo, pois apresentou os piores resultados a partir de 80%. Apesar do descarte antecipado precoce e muito agressivo, o método proposto alcança seu objetivo, obtendo melhor desempenho quando considerando o congestionamento em níveis críticos.

Os resultados apresentaram ganhos significativos na utilização do método proposto para vídeos com maior compactação espacial e temporal, como no vídeo *Big Buck Bunny*, que possui o menor valor para *Motion Activity*. A perda de segmentos em vídeos menos compactados é muito mais severa, como nos vídeos *Pedestrian Area* e *Riverbed*, que possuem os maiores valores para *Motion Activity*. Ao analisar os diferentes tipos de conteúdo transmitidos em relação às diferentes técnicas AQM, observa-se que o vídeo de maior duração, *Big Buck Bunny*, tende a favorecer maior valor de PSNR médio, pois a perda de alguns poucos segmentos de vídeo não tem grande impacto no resultado final da média. Já em vídeos de curta duração, como o *Riverbed*, percebe-se que por menor que seja o congestionamento, já há impactos no PSNR médio, uma vez que há uma menor quantidade de quadros envolvidos.

VIII. Conclusões e Trabalhos Futuros

Dada a prevalência do tráfego de vídeo na Internet, o desenvolvimento de mecanismos para Gerência Ativa de Filas, visando melhoria de qualidade para o usuário, ganha importância significativa. O presente estudo apresentou uma proposta de método AQM para melhoria do tráfego de vídeo ao vivo em redes congestionadas, utilizando a tecnologia DASH e conteúdo H.264/AVC. Através da avaliação de desempenho, com seis diferentes tipos de vídeo, transmitidos em um cenário relativamente realista, é possível perceber que a proposta é promissora, especialmente quando o enlace de gargalo na rede tem um nível de ocupação alto. Os resultados demonstram que, na medida em que o congestionamento se torna crítico, o método proposto possibilita melhor qualidade, quando comparado com outros métodos avaliados.

Trabalhos futuros envolvem a avaliação da capacidade de adaptação do vídeo utilizando diferentes resoluções e taxas de quadros por segundo, além das representações em qualidades distintas. Análises complementares compreendem a variação

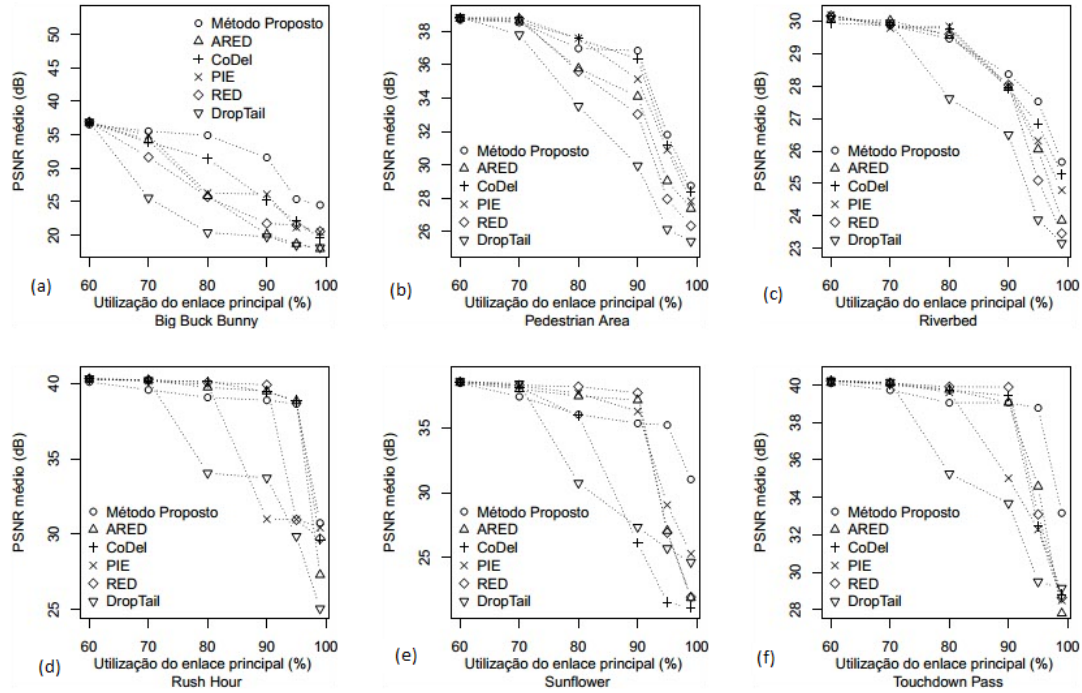


Fig. 3. PSNR médio para os vídeos utilizados na avaliação de desempenho.

de parâmetros, como o tamanho da fila e a capacidade do enlace de gargalo, para fornecer uma gama maior de resultados, de forma a revelar outras perspectivas sobre o desempenho da proposta.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Kua and G. Armitage, "Optimising DASH over AQM-Enabled Gateways Using Intra-Chunk Parallel Retrieval (Chunklets)," in *2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, July 2017, pp. 1–9.
- [2] I. Cisco Systems, "Forecast and Methodology 2015 to 2020." *Cisco Visual Networking Index*, 2016.
- [3] E. Grigorescu, C. Kulatunga, and G. Fairhurst, "Evaluation of the Impact of Packet Drops due to AQM over Capacity Limited Paths," in *2013 21st IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, Oct 2013, pp. 1–6.
- [4] J. Gettys and K. Nichols, "Bufferbloat: Dark Buffers in the Internet," *Queue*, vol. 9, no. 11, pp. 40:40–40:54, Nov. 2011.
- [5] J. Kua, G. Armitage, and P. Branch, "A Survey of Rate Adaptation Techniques for Dynamic Adaptive Streaming over HTTP," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1842–1866, thirdquarter 2017.
- [6] Y. Xiaogang, J. Liu, and L. Ning, "Congestion Control Based on Priority Drop for H.264/SVC," in *MUE.2007.107*, 05 2007, pp. 585 – 589.
- [7] R. Adams, "Active Queue Management: A Survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1425–1476, 2013.
- [8] J. Kua, G. Armitage, and P. Branch, "The Impact of Active Queue Management on DASH-Based Content Delivery," in *2016 IEEE 41st Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Nov 2016, pp. 121–128.
- [9] T. Stockhammer, "Dynamic Adaptive Streaming over HTTP – Standards and Design Principles," in *Proceedings of the Second Annual ACM Conference on Multimedia Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2011, pp. 133–144.
- [10] S. Lederer, C. Müller, and C. Timmerer, "Dynamic Adaptive Streaming over HTTP Dataset," in *Proceedings of the 3rd Multimedia Systems Conference*, ser. MMSys '12. New York, NY, USA: ACM, 2012, pp. 89–94.
- [11] N. Bouten, M. Claeys, S. Latré, J. Famaey, W. V. Leekwijck, and F. D. Turck, "Deadline-Based Approach for Improving Delivery of SVC-Based HTTP Adaptive Streaming Content," in *2014 IEEE Network Operations and Management Symposium*, May 2014, pp. 1–7.
- [12] T. Lohmar, T. Einarsson, P. Fröjdh, F. Gabin, and M. Kampmann, "Dynamic Adaptive HTTP Streaming of Live Content," in *2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, June 2011, pp. 1–8.
- [13] S. Floyd and V. Jacobson, "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, no. 4, pp. 397–413, 1993.
- [14] S. Floyd, R. Gummadi, and S. Shenker, "Adaptive RED: An Algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management," .., 2001.
- [15] K. Nichols and V. Jacobson, "Controlling Queue Delay," *Queue*, vol. 10, no. 5, pp. 20:20–20:34, May 2012.
- [16] R. Pan, P. Natarajan, C. Piglion, M. Suryanarayana Prabhu, V. Subramanian, F. Baker, and B. Versteeg, "PIE: A Lightweight Control Scheme to Address the Bufferbloat Problem," in .., 07 2013.
- [17] H. J. Kim, P. K. Park, H. S. Yoon, and S. G. Choi, "QoS-aware Active Queue Management scheme for multimedia services," in *13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2011)*, Feb 2011, pp. 1037–1042.
- [18] G. F. Riley and T. R. Henderson, *The ns-3 Network Simulator*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 15–34.
- [19] C. Silva, G. Souza, J. Sauer and C. Pedroso, "Evaluation of impairment caused by mpeg video frame loss." *Engineering*, pp. 493–503, 2017.
- [20] M. R. Zakerinasab and M. Wang, "Dependency-aware distributed video transcoding in the cloud," in *2015 IEEE 40th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, October 2015, pp. 245–252.
- [21] D. Ammar, T. Begin, and I. Guerin-Lassous, "A New Tool for Generating Realistic Internet Traffic in NS-3," in *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, Brussels, Belgium, 2011, pp. 81–83.
- [22] R. Jain, "Book Review: The Art of Computer Systems Performance Analysis," *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, vol. 19, no. 2, pp. 5–11, Sep. 1991, reviewer-Al-Jaar, Robert Y.
- [23] R. Serral-Gracià, E. Cerqueira, M. Curado, M. Yannuzzi, E. Monteiro, and X. Masip-Bruin, "An overview of quality of experience measurement challenges for video applications in ip networks," in *Proceedings of the 8th International Conference WWIC*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.