

Análise de Desempenho de Protocolos Multicaminho para Vídeo *Streaming* em Tempo Real

Guilherme Fernandes de Souza Miguel, Carlos Alexandre Gouvea da Silva, Carlos Marcelo Pedroso e Eduardo Parente Ribeiro

Resumo—A evolução tecnológica dos dispositivos móveis e o aumento da disponibilidade de redes IP (*Internet Protocol*), criaram novas oportunidades para distribuição de conteúdo *multimídia* pela Internet. Aplicações de tempo real requerem alta qualidade de serviço, não sendo tolerantes a atraso médio de pacotes maior que 200ms, variações no atraso fim-a-fim e redução do *throughput*. Estudos já mostram as vantagens utilizando técnicas de transmissão multicaminho para vídeo *streaming* em tempo real. Este trabalho apresenta um estudo de desempenho de vídeo *streaming* em alta definição usando protocolos de transporte multicaminho, comparando o comportamento dos padrões SCTP (*Stream Control Protocol*), CMT (*Concurrent Multi Transfer*) e uma estratégia de troca de caminhos baseada no menor atraso chamada *delay centric*.

Palavras-Chave—*Multihoming, multipath, video streaming.*

Abstract—The mobile devices technological evolution and the increased availability of IP (*Internet Protocol*) networks, created new opportunities for multimedia content distribution over Internet. Real-time applications require high quality service and are not tolerant to mean packet delay above 200ms, delay variations and throughput reduction. The use the multipath protocols in real-time video streaming presents several advantages, leading to a better quality and network resilience. This paper presents a study on performance of high definition video streaming, using multipath transport protocols, comparing the Stream Control Transfer Protocol (SCTP), Concurrent Multipath Transfer (CMT), and a path selection technique based on the lower path delay called *delay centric*.

Keywords—*Multihoming, multipath, video streaming.*

I. INTRODUÇÃO

A maioria dos atuais dispositivos possuem múltiplas interfaces de conexão com a *Internet*, mas não tem explorado esta característica para melhoria no desempenho da comunicação. Tais sistemas são chamados de multicaminho. O avanço dos dispositivos móveis e das interfaces de rede possibilitou ainda o desenvolvimento de serviços *multimídia* com alta qualidade e de comunicação em tempo real [1].

Os principais protocolos de transporte usados na *Internet* atualmente são o *Transmission Control Protocol* (TCP) [2] e o *User Datagram Protocol* (UDP) [3], sendo UDP o protocolo padrão para aplicações em tempo real. A competição entre fluxos TCP e UDP pode levar a situações de congestionamento

de rede. A inexistência de algoritmos de controle de congestionamento no UDP pode levar a injustiça no balanceamento de carga entre os diversos fluxos de rede. Enquanto o TCP reduz a taxa de envio de pacotes para prevenir problemas com o congestionamento de rede, o protocolo UDP continua enviando pacotes mesmo em situações de congestionamento [2]. A qualidade de serviço pode ser avaliada utilizando métricas como atraso, *jitter* e perda de pacotes. O atraso é o tempo absoluto que um pacote leva para ser transmitido de uma rede de origem a uma rede de destino [4] e o *jitter* é uma medida da variação do atraso. A perda de pacotes pode ser causada por problemas no meio físico ou por descarte de pacotes nos elementos de rede antes de chegarem ao destino final [5]. Aplicações de tempo real

Do ponto de vista da camada de transporte, cada interface apresenta um caminho diferente para acesso à rede. Através de mecanismos de monitoramento e de troca de caminhos, é possível aumentar a resiliência e estabilidade de uma conexão, garantindo a continuidade dos serviços mesmo no caso do caminho principal se tornar indisponível. Vários autores abordam a utilização do multicaminho na tentativa de aumentar a redundância da rede e/ou o desempenho da aplicação. Entretanto, a efetividade destas abordagens depende da diversidade natural dos caminhos entre destinos finais em termos de enlaces físicos, infraestrutura de roteamento, controle administrativo e distribuição geográfica. Se o tráfego entre dois *hosts* não for roteado entre caminhos completamente disjuntos, congestionamento ou falhas de um único enlace ou roteador compartilhado podem afetar o desempenho ou a disponibilidade destes caminhos [6]. Novas abordagens para remediar possíveis problemas na rede em um contexto fim-a-fim foram propostas, uma vez que os *hosts* de origem e/ou destino são tipicamente os primeiros a tomarem conhecimento na ocorrência de uma interrupção de um serviço [1].

Este artigo tem como objetivo analisar o desempenho de sistemas multicaminho em situações com competição de fluxos de vídeo H.264, avaliando diversas métricas de desempenho como o atraso, o *throughput*, o *goodput* e a justiça na divisão de recursos. Foram comparados sistemas utilizando SCTP (e sua variação *delay centric*), CMT (e sua variação CMT-PF) na transmissão de vídeo *streaming* utilizando um cenário com dois caminhos disjuntos no núcleo da rede. Os resultados indicam que as abordagens CMT-PF e *delay centric* apresentam significativa redução no atraso e melhoria de *throughput* e *goodput*.

Guilherme Fernandes de Souza Miguel, Carlos Alexandre Gouvea da Silva, Carlos Marcelo Pedroso e Eduardo Parente Ribeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba-PR, Brazil, E-mails: guilhermefsmiguel@gmail.com, carlos.gouvea@ufpr.br, edu@elettrica.ufpr.br, pedroso@elettrica.ufpr.br

Este trabalho está dividido da seguinte maneira. Além desta seção introdutória, a seção II apresenta os principais protocolos de transporte multicaminho e trabalhos relacionados. Na seção III é descrito o cenário utilizado para a avaliação de desempenho dos protocolos de transporte multicaminho. A seção IV apresenta os resultados e compara o desempenho de transmissão de vídeo nos diferentes protocolos. As conclusões e sugestão de trabalhos futuros são apresentados seção V.

II. PROTOCOLOS DE TRANSPORTE MULTICAMINHO

Protocolos da camada de transporte são os responsáveis por criar conexões virtuais entre processos hospedados em diferentes sistemas finais, tornando possível a troca de mensagens entre estes processos. Os principais protocolos de transporte atualmente utilizados são o UDP e o TCP, especificados nas RFC768 [3] e RFC793 [7], respectivamente. O UDP é um protocolo de transporte simples, orientado à transação que apenas provê entrega de dados entre processos que rodam em diferentes destinos finais, não garantindo a entrega, ordem ou duplicidade das mensagens.

O TCP é um protocolo de transporte orientado a conexão, concebido para ser parte de uma arquitetura de camada de protocolos, que provê comunicação confiável e ordenada entre pares de processos que são executados em *hosts* de redes de comunicação de dados distintas interconectadas. Ele pode operar por um grande espectro de sistemas de comunicação, de *hosts* diretamente conectados à redes de comutação de circuitos ou de comutação de pacotes. Ele também provê controle de congestionamento, permitindo que conexões TCP trafegando por um enlace de rede congestionado compartilhem de maneira igualitária o enlace. No entanto, os protocolos TCP e UDP não permitem o uso das múltiplas interfaces de rede normalmente disponíveis nos dispositivos.

A. Protocolos Multicaminho

1) *Stream Control Transmission Protocol (SCTP)*: Assim como o TCP, o SCTP oferece uma conexão confiável, *full-duplex* com mecanismos de controle de fluxo e congestionamento. No SCTP, o termo associação é utilizado para descrever esta conexão entre os dois sistemas finais. Uma associação tem um significado mais abrangente que o de uma conexão TCP, pois ela pode ser estabelecida utilizando múltiplos endereços IP em cada um dos sistemas finais [8].

O SCTP implementa novas formas de envio de dados assim como outras funcionalidades e serviços. Para regular a taxa de envio de dados, o SCTP utiliza os mecanismos já conhecidos do TCP de janela de congestionamento (*congestion window*, *cwnd* e *slow-start threshold*, *ssthresh*) [8]. O SCTP possibilita ainda o envio de dados por múltiplos caminhos (*multistreaming*), diferentes níveis de confiabilidade e ordenação das mensagens. Por padrão, o SCTP utiliza um dos caminhos disponíveis para transmissão dos dados, chamado caminho primário, mantendo os demais caminhos em redundância, chamados caminhos secundários. A ocorrência de congestionamento temporário ou falha permanente no caminho primário, ocasiona troca de caminho do fluxo de dados para um dos caminhos secundários. Diversas abordagens para

a troca de caminho foram propostas, considerando mobilidade, redundância, transmissão simultânea em múltiplos caminhos e troca de caminho baseado em atraso [8].

2) *Partial Reliability (PR-SCTP)*: O serviço de transporte parcialmente confiável, definido na RFC3758 [9], é uma extensão do SCTP que possibilita ao usuário especificar as regras sobre quão persistente o serviço de transporte deve ser na tentativa de entregar uma mensagem ao destino. Em conjunto com o *multistreaming*, o PR-SCTP pode ser utilizado para promover um melhor suporte à aplicações de tempo real. Um exemplo de serviço parcialmente confiável é o chamado serviço com confiabilidade temporal que permite ao usuário indicar o limite de tempo para que a mensagem seja enviada ou retransmitida. Para que o PR-SCTP funcione, foi adicionado um novo tipo de *chunk* no SCTP chamado FORWARD-TSN, que indica ao *host* de destino da mensagem que este deve avançar com o seu ponto de ACK cumulativo, possivelmente ignorando um ou mais pacotes de dados que até então não foram recebidos ou reconhecidos.

3) *Concurrent Multipath Transfer (CMT)*: O CMT é uma extensão do SCTP padrão que permite o uso simultâneo dos diversos caminhos disponíveis, exigindo que o controle de congestionamento trabalhe com reordenação de pacotes. Entretanto a reordenação de pacotes ainda leva a um problema adicional que impacta o controle de fluxo. Este problema é conhecido como bloqueio de *buffer* no *host* de destino, onde o *buffer* é preenchido com dados fora de ordem por conta de falhas contínuas ou de curto prazo e, por conta de limitações no tamanho do *buffer* no *host* de destino, o que pode levar o algoritmo de controle de fluxo do *host* de origem a não realizar novas transmissões de dados. O bloqueio de *buffer* no *host* de destino pode ser tratado através do uso de novas políticas para controle de congestionamento [10] [11]. Uma solução que mitiga parcialmente o problema de bloqueio de *buffer* no *host* de destino, chamada CMT *Potentially Failed* (CMT-PF), foi apresentada por Natarajan *et al.* [12] e posteriormente normatizada pela RFC7829 [13]. O CMT-PF marca o caminho onde foi encontrada a falha como potencialmente falho e para a transmissão de dados naquele caminho até que um retorno positivo de um pacote *Heartbeat* seja recebido. Uma extensa avaliação do CMT-PF mostra que o desempenho do CMT-PF é melhor ou no mínimo similar ao CMT padrão [14].

4) *Delay-centric*: Originalmente proposto por Kelly *et al.* [15], o *delay-centric* foi desenvolvido para aumentar a qualidade no transporte de voz sobre IP. Ele funciona em conjunto com o SCTP e se baseia em dados sobre o atraso apresentado por cada um dos caminhos envolvidos na associação. Baseado nestes dados, o *delay-centric* altera o caminho primário automaticamente para o caminho que apresente o menor atraso suavizado com uma média móvel, estimado através do SRTT (*Smoothed Round Trip Time*). O uso da estratégia *delay-centric* pode ocasionar a troca constante de caminho, em um efeito manada [16], levando a um problema de bloqueio de *buffer* no *host* de destino assim como observado no CMT. Para mitigar esse problema, o *delay-centric* pode utilizar um parâmetro de histerese, com o objetivo de não permitir a troca de caminho enquanto o menor valor de SRTT somado ao valor de histerese seja maior que o valor de SRTT do caminho primário.

B. Demais trabalhos relacionados

A utilização de sistemas *multihoming* para aumentar a performance e resiliência de comunicações é objeto de estudo de vários autores.

Hussein, Hassan e Landolsi [17] avaliaram a performance de transmissões de vídeo em ambientes multicaminho, avaliando a utilização de múltiplas interfaces e políticas de priorização de determinados tipos de quadros H.264. Os nós de roteamento foram os responsáveis por enviar os pacotes pelo caminho com menor nível de congestionamento e foram testados os níveis de diversidade de 3 ou 4 caminhos disjuntos, comparando com o sistema com apenas um caminho e um caminho com prioridade de determinados tipos de pacotes. Os autores observaram que o melhor cenário para as transmissões de vídeo é a transmissão simultânea por 3 ou 4 caminhos.

Considerando o desempenho na transmissão de vídeo em sistemas multicaminho, Xu *et al.* [18] analisaram o desempenho na transmissão de conteúdos multimídia através de redes sem fio. Foram utilizadas duas abordagens do protocolo SCTP *Single Path Transfer (SPT)*, que realiza a transmissão de dados em apenas um dos caminhos disponíveis, e o CMT, que realiza a transmissão de dados por todos os caminhos disponíveis. Como métrica de desempenho, foi utilizada a qualidade percebida pelo usuário, em ambientes com diferentes taxas de transmissão, atraso e perda de pacotes. Os resultados obtidos mostraram melhora da qualidade percebida com o uso do CMT.

III. METODOLOGIA

A avaliação de desempenho dos protocolos multicaminho será realizada através de simulações computacionais. Os diversos protocolos foram implementados no simulador NS-2 (*Network Simulator*, versão 2).

A. Cenário de simulação

O cenário proposto para simulação foi elaborado supondo a presença de duas redes de acesso para um *host*. Utilizando identificadores numéricos para cada nó de acesso, nós pares (incluindo os com índice zero) proveriam interfaces de 25 Mbps e nós ímpares proveriam acessos de 50 Mbps.

A Figura 1 apresenta o modelo de cenário de simulação, que é constituído de dois caminhos disjuntos no núcleo da rede. As linhas pontilhadas em vermelho e azul identificam estes caminhos. As interfaces dos clientes e servidores estão ligadas de maneira alternada aos nós de acesso que por sua vez, estão conectados aos nós do núcleo da rede.

O caminho identificado pela cor vermelha é composto pelos nós Ac_0 , Cr_0 e As_0 . Ao nó de acesso Ac_0 estão ligadas a interface 0 do cliente 0 e a interface 1 do cliente 1. Ao caminho identificado pela cor azul pertencem os nós Ac_1 , Cr_1 e As_1 e a este caminho estão conectadas a interface 1 do cliente 0 e a interface 0 do cliente 1.

A forma como as interfaces foram conectadas aos nós de acesso permite que os agentes realizem a transmissão do vídeo por caminhos distintos, dependendo das condições de rede e do método de seleção do caminho primário. As simulações utilizaram o vídeo Aspen [19], codificado utilizando o *codec*

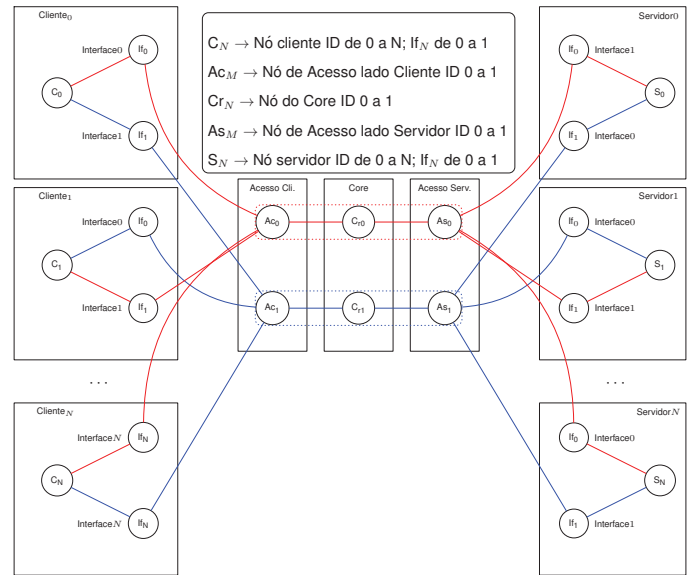


Fig. 1. Dois caminhos completamente disjuntos

H.264, com GOP (*Group of Picture*) (15,3) e GOP (60,3). A fim de tornar o cenário simulado mais próximo de um cenário real, o início da transmissão foi aleatório ao longo do tempo de vídeo, que foi repetido continuamente ao longo da simulação, sendo analisados os níveis de qualidade de serviço durante toda a transmissão de dados. Cada cenário foi simulado 100 vezes e o erro para confiança de 95% foi calculado. O aumento do atraso médio, baixos níveis de justiça na divisão do *throughput* entre os fluxos, queda do *goodput* são indicadores de que os sistema não se manteve estável durante a transmissão.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foram verificados os níveis de atraso médio por ocupação, utilizando o vídeo Aspen, com GOP (60,3) (Figura 2, coluna esquerda) e GOP (15,2) (Figura 2, coluna direita). Observa-se que o CMT e CMT-PF não apresentaram variações no nível de atraso médio. Já o SCTP padrão e o *delay-centric*, sem histerese e com histerese de 10 ms, apresentaram um aumento no atraso médio para ocupações maiores que 70%. Nos resultados obtidos, observa-se maiores níveis de atraso médio para o SCTP padrão durante a transmissão do vídeo.

O *goodput* foi calculado utilizando os pacotes que chegaram ao destino em tempo de serem decodificados. Ao analisar o *goodput* em relação as diferentes técnicas, observa-se que o vídeo de GOP maior apresenta um *goodput* menor quando a taxa de ocupação é maior que 71%, sendo que no vídeo de GOP menor essa redução do *goodput* fica menor com taxa de ocupação em 79%. O CMT e o CMT-PF apresentaram degradação do *goodput* em ocupações maiores que: 88% para o GOP (60,3) e 57% para GOP (15,2). O *delay-centric* não apresentou queda no *goodput*, independente da histerese utilizada para o maior GOP, mas apresentou redução do *goodput* em ocupações maiores que 92% para o menor GOP.

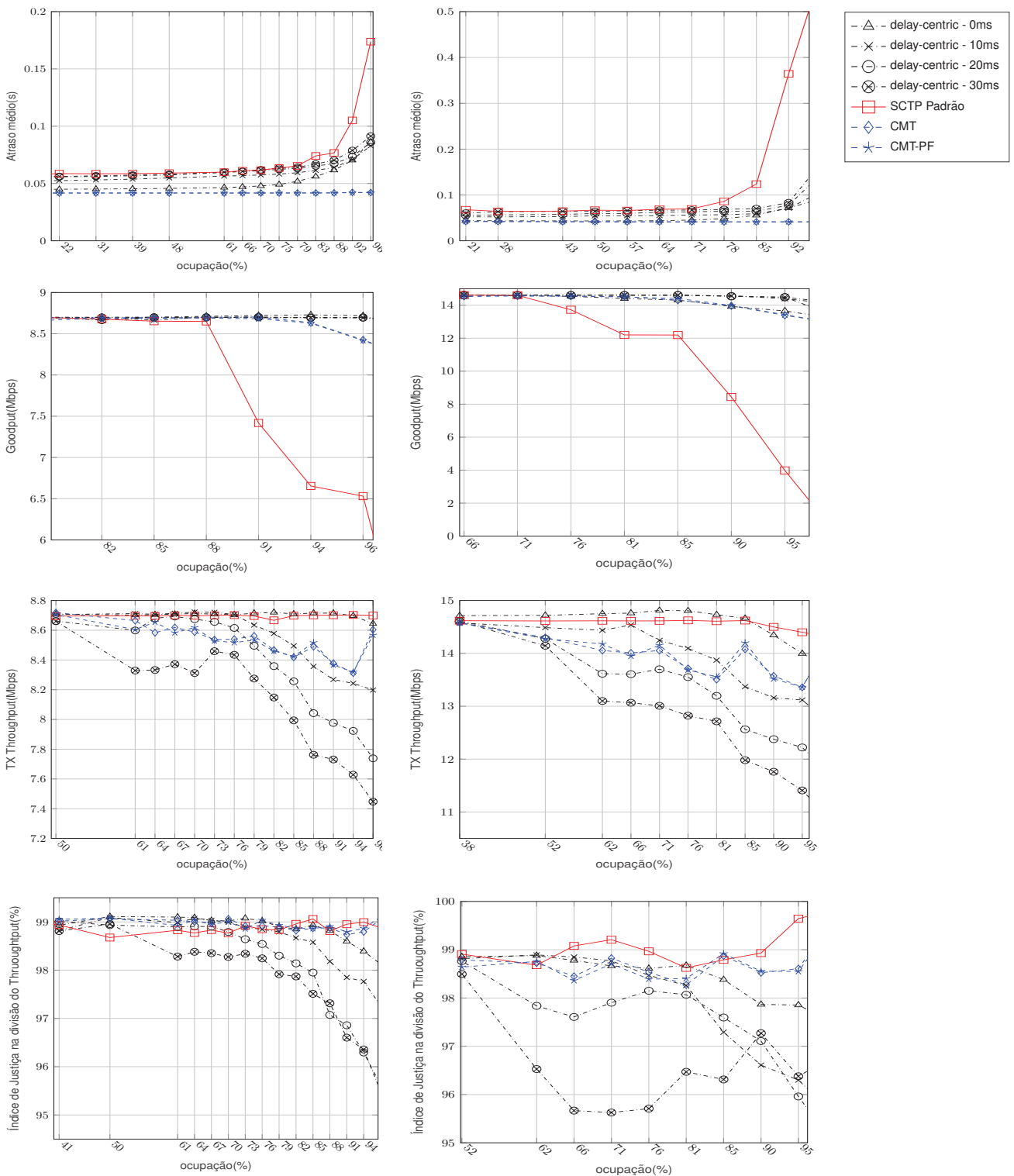


Fig. 2. Métrica avaliadas vs. ocupação em transmissão de vídeo: (coluna esquerda) GOP (60,3) e (coluna direita) GOP (15,2)

O CMT e o CMT-PF apresentaram redução do *goodput* em ocupações maiores que: 88% para o maior GOP, 57% para o menor GOP. A queda do *goodput* do SCTP padrão e do *delay-centric*, independente da histerese utilizada, observados nos gráficos, é justificada pelo aumento do atraso médio observado. Entretanto, apesar da redução do *goodput* pelo CMT e CMT-

PF, não foi encontrado aumento do atraso médio para estes protocolos, o que dá indicativos de atuação do mecanismo de controle de congestionamento. A atuação do algoritmo de controle de congestionamento, é evidenciada com a redução da taxa de envio de pacotes pelo nó de origem com a finalidade de se reduzir o congestionamento da rede como um todo.

Com relação ao *throughput*, o SCTP padrão apresentou pequena degradação somente em 82% de ocupação. O *delay-centric* sem histerese apresentou pequena redução do *throughput* em ocupações maiores que 94%. Quando utilizada histerese no *delay-centric* de 10ms, 20ms e 30ms, houve uma redução do *throughput* em ocupações maiores que 76%, 67% e 57% respectivamente. O CMT e o CMT-PF por sua vez, apresentaram redução do *throughput* em ocupações a partir 50%. No segundo GOP (15,2), verifica-se que tanto o SCTP padrão quanto o *delay-centric* sem histerese, reduzem o *throughput* apenas em ocupações maiores que 85%. Já o *delay-centric* com histerese de 10 ms reduz o *throughput* em ocupações maiores que 66%. O CMT, CMT-PF e *delay-centric* com histerese de 20 ms e 30 ms, reduziram o *throughput* em ocupações maiores que 38%. Para o GOP maior, verifica-se que tanto o SCTP padrão quanto o *delay-centric* sem histerese, reduzem o *throughput* apenas em ocupações maiores que 85%. Já o *delay-centric* com histerese de 10 ms reduz o *throughput* em ocupações maiores que 66%. O CMT, CMT-PF e *delay-centric* com histerese de 20 ms e 30 ms, reduziram o *throughput* em ocupações maiores que 38%.

Para avaliação da justiça na distribuição de recursos, foi calculado o índice de Jain [20]. Para o GOP (60,3), o SCTP padrão, o CMT e o CMT-PF não apresentaram redução significativa do índice de justiça de divisão do *throughput*. O *delay-centric* sem histerese apresentou redução do índice de justiça de divisão do *throughput* em ocupações maiores que 88%.

Quando utilizada histerese no *delay-centric* de 10ms, 20ms e 30ms, houve uma redução do índice de justiça de divisão do *throughput* em ocupações maiores que 79%, 67% e 50% respectivamente.

No gráfico de GOP (15,2), observa-se que o SCTP Padrão, o CMT, o CMT-PF oscilam o índice de justiça na divisão do *throughput* em torno de 99%. O *delay-centric* sem histerese e com histerese de 10 ms, apresenta redução do índice de justiça de divisão do *throughput* em ocupações maiores que 81%. Já o *delay-centric* com histerese de 20 ms e 30 ms, apresentaram redução do índice de justiça de divisão do *throughput* em ocupações maiores que 52%.

V. CONCLUSÕES

Os resultados da simulação mostram que *delay-centric* sem histerese foi o protocolo que apresentou melhor desempenho na transmissão de vídeo *streaming*, mantendo boa relação entre o *throughput* e o atraso médio. A medida que se aumenta a histerese, o atraso médio aumenta, o *throughput* é reduzido e a justiça na divisão do *throughput* piora. No entanto, observa-se que o *goodput* na transmissão do vídeo é sempre melhor para o *delay-centric*.

O SCTP padrão apresentou o pior desempenho entre os protocolos avaliados. O CMT e CMT-PF apresentaram um atraso médio menor em relação às demais estratégias. Além disso, o atraso médio não foi afetado pelo aumento do congestionamento da rede, o que é surpreendente. Apesar disso, o *goodput* observado cai levemente em situações de maior congestionamento, o que não ocorre para a estratégia *delay-centric*.

Os testes realizados indicam que o uso do CMT e CMT-PF apresenta vantagens para transmissão de dados, mas a estratégia *delay-centric* ainda é melhor para transmissão de vídeo *streaming*.

Os trabalhos futuros incluem a realização novos testes variando o nível de compartilhamento do núcleo da rede, usando caminhos parcialmente disjuntos.

REFERÊNCIAS

- [1] J. P. Rohrer, "End-to-end resilience mechanisms for network transport protocols," Ph.D. dissertation, The University of Kansas, Lawrence, KS, Novembro 2011.
- [2] A. Zimmermann, W. Eddy, and L. Eggert, "Moving Outdated TCP Extensions and TCP-Related Documents to Historic or Informational Status - RFC 7805," RFC 7805 (Informational), Internet Engineering Task Force, Abril 2016.
- [3] J. Postel, "User Datagram Protocol - RFC 768," RFC 768 (INTERNET STANDARD), Internet Engineering Task Force, Agosto 1980.
- [4] J. Greengrass, J. Evans, and A. C. Begen, "Not all packets are equal, part i: Streaming video coding and sla requirements," *IEEE Internet Computing*, vol. 13, no. 1, pp. 70–75, Janeiro 2009.
- [5] S. Floyd and K. Fall, "Promoting the use of end-to-end congestion control in the internet," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 7, no. 4, pp. 458–472, Agosto 1999.
- [6] J. Han, D. Watson, and F. Jahanian, "An experimental study of internet path diversity," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 273–288, Outubro 2006.
- [7] J. Postel, "Transmission Control Protocol," RFC 793 (INTERNET STANDARD), Internet Engineering Task Force, Setembro 1981.
- [8] R. Stewart, "Stream Control Transmission Protocol - RFC 4960," RFC 4960 (Proposed Standard), Internet Engineering Task Force, Setembro 2007.
- [9] R. Stewart, M. Ramalho, Q. Xie, M. Tuexen, and P. Conrad, "Stream Control Transmission Protocol (SCTP) Partial Reliability Extension," RFC 3758 (Proposed Standard), Internet Engineering Task Force, Maio 2004.
- [10] J. Iyengar, P. Amer, and R. Stewart, "Receive buffer blocking in concurrent multipath transfer," in *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM '05. IEEE*, vol. 1, Novembro 2005.
- [11] R. Iyengar, P. Amer, and R. Stewart, "Performance implications of a bounded receive buffer in concurrent multipath transfer," *Computer Communications*, vol. 30, no. 4, pp. 818 – 829, 2007.
- [12] P. Natarajan, J. Iyengar, P. Amer, and R. Stewart, "Concurrent multipath transfer using transport layer multihoming: Performance under network failures," in *Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE*, Outubro 2006, pp. 1–7.
- [13] Y. Nishida, P. Natarajan, A. Caro, P. Amer, and K. Nielsen, "SCTP-PF: A Quick Failover Algorithm for the Stream Control Transmission Protocol," RFC 7829 (Proposed Standard), Internet Engineering Task Force, Abril 2016.
- [14] N. Preethi, E. Nasif, A. Paul, and R. Stewart, "Concurrent multipath transfer during path failure," *Computer Communications*, vol. 32, no. 15, pp. 1577 – 1587, 2009.
- [15] A. Kelly, G. Muntean, P. Perry, and M. J., "Delay-centric handover in SCTP over WLAN," *Transactions on Automatic Control, Computer Science*, vol. 49, pp. 211–216, 2004.
- [16] V. Leung, E. Ribeiro, A. Wagner, and J. Iyengar, *Multihomed Communication with SCTP (Stream Control Transmission Protocol)*, ser. ENGnetBASE 2015. CRC Press, 2012.
- [17] D. Hussein, M. Hassan, and T. Landolsi, "Performance evaluation of a path diversity-based video streaming approach over best effort networks," in *2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, Março 2014, pp. 536–541.
- [18] C. Xu, E. Fallon, Y. Qiao, L. Zhong, and G. M. Muntean, "Performance evaluation of multimedia content distribution over multi-homed wireless networks," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 57, no. 2, pp. 204–215, Junho 2011.
- [19] derf. Xiph.org video test media [derf's collection]. [Online]. Available: <http://media.xiph.org/video/derf/>
- [20] R. Jain, *The art of computer systems performance analysis - techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. Wiley, 1991.