

# Avaliação de Desempenho do DCCP, CTCP e CUBIC, Usando Padrões de Tráfego VoIP e CBR

Priscila Doria, Ricardo Salgueiro, Marco Aurélio Spohn

**Resumo**—Trabalhos anteriores comparam o desempenho do DCCP com protocolos clássicos sob tráfego CBR. Neste trabalho, o DCCP (CCID2 e CCID3) é comparado a duas variantes do TCP (CTCP e CUBIC), utilizando-se os padrões de tráfego VoIP e CBR. No cenário proposto, os protocolos disputam o mesmo enlace em contenção. Os resultados sugerem que, sob contenção, o desempenho do CCID2 é superior ao do CTCP e do CCID3; o CUBIC obtém melhor vazão, porém com menor taxa de entrega; o CTCP supera apenas o CCID3.

**Palavras-Chave**—DCCP, CUBIC, CTCP, VoIP

**Abstract**—Previous works have compared the performance of DCCP with standard transport protocols using the CBR pattern. In this paper, we compare the performance of DCCP (CCID2 and CCID3) with two TCP variants (CTCP and CUBIC), adopting VoIP and CBR traffic patterns. In the proposed scenarios, the protocols contend for the same link. Results show that CCID2 performs better than CTCP and CCID3, while CUBIC has achieved better throughput, but with lower delivery rate; CTCP outperform only CCID3.

**Keywords**—DCCP, CUBIC, CTCP, VoIP

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço e a proliferação dos dispositivos computacionais multimídia, as aplicações multimídia ganharam uma importância especial nas redes de computadores modernas. Na Internet, deseja-se que os protocolos empregados para transmitir multimídia estejam em harmonia com os demais protocolos de rede. Muitos aplicativos multimídia adotam o protocolo UDP como protocolo de transporte com o intuito de privilegiar o desempenho, a despeito da confiabilidade. Entretanto, é típico dos fluxos UDP transmitir a uma taxa constante, sem observar a largura de banda disponível. O impacto do congestionamento causado pelas transmissões multimídia via UDP motivou o *Internet Engineering Task Force* (IETF) a propor um novo protocolo padrão da Internet: o *Datagram Congestion Control Protocol* (DCCP) [1]. A principal inovação do DCCP é o conceito híbrido de priorização do desempenho, como ocorre com o UDP, mas com capacidade de realizar controle de congestionamento, como ocorre com o TCP. Dentre os aplicativos indicados a usar o DCCP estão aqueles que priorizam o desempenho de entrega de pacotes em vez da confiabilidade, tais como VoIP, videoconferência e jogos interativos. O DCCP é uma alternativa ao UDP para entrega eficiente de conteúdos multimídia porque o controle

de congestionamento possibilita cooperar de forma mais justa com outros protocolos de transporte.

Novos algoritmos de controle de congestionamento têm sido propostos para o TCP, visando sua adequação ao tráfego e à velocidade das redes modernas. Para redes de alta velocidade e com atraso significativo, o TCP padrão pode levar muito tempo para restaurar a taxa de envio após um evento de perda de pacote. Uma maneira simples de contornar a limitação do TCP padrão é modificar as regras de incremento/decremento do seu mecanismo de controle de congestionamento, de forma que o remetente aumente sua janela de congestionamento mais rapidamente e a diminua mais suavemente. Para contornar o problema da baixa utilização em redes de grande atraso e alta velocidade, foram propostas novas variantes do TCP: o *Compound TCP* (CTCP) [2] e o CUBIC [3].

O CTCP é um algoritmo de controle de congestionamento proposto pela *Microsoft*<sup>TM</sup> para otimizar o TCP para uso em conexões com grandes janelas de congestionamento. A ideia principal do CTCP é adicionar um componente escalável, baseado em atraso, ao controle de congestionamento do TCP padrão, que é baseado em perdas. A taxa de envio do CTCP é controlada por ambos os componentes, atraso e perda de pacotes. Ele se tornou um protocolo relevante devido à sua ampla adoção, como parte do *Windows Server 2008*<sup>TM</sup>, do *Windows Vista*<sup>TM</sup> e do *Windows 7*<sup>TM</sup>.

O CUBIC também é um algoritmo recente de controle de congestionamento do TCP que, em vez de uma função linear, adota uma função cúbica para aumento da janela de congestionamento. O ponto de inflexão desta função cúbica é ajustado pelo valor da janela de congestionamento anterior ao último evento de perda de pacote. Os idealizadores do CUBIC defendem que ele proporciona escalabilidade e estabilidade nas transmissões em redes velozes e de longa distância. O CUBIC tornou-se um protocolo relevante devido à sua adoção como implementação padrão de TCP no *Linux*.

Os algoritmos de controle de congestionamento do DCCP são módulos independentes do protocolo, chamados de *Congestion Control Identifier* (CCID). Atualmente, estão implementados três algoritmos de controle de congestionamento: o CCID2 [4], o CCID3 [5] e o CCID4 [6]. O CCID2 é similar ao TCP SACK, com confirmações seletivas e janela de congestionamento. O CCID3 utiliza informações fornecidas pelo receptor para ajustar a sua taxa de envio. A taxa de transmissão é ajustada usando a Equação TCP *Throughput*. Embora o CCID4 tenha sido especificado, ainda é considerado experimental e por isso não é alvo de estudo neste trabalho.

## II. METODOLOGIA

Foram realizadas simulações no simulador de redes *Network Simulator 2* [7], na versão 2.34, objetivando conduzir um comparativo de desempenho entre os protocolos DCCP CCID2, DCCP CCID3, CTCP e CUBIC, usando padrões de tráfego VoIP e CBR. A topologia está detalhada na Seção II-A. Os protocolos foram combinados em pares, de forma a ser possível perceber a propriedade da **justiça** de cada protocolo. Os pares de protocolos foram combinados da seguinte forma: (a) DCCP CCID2 *versus* CTCP, (b) DCCP CCID2 *versus* CUBIC, (c) DCCP CCID2 *versus* DCCP CCID3, (d) DCCP CCID3 *versus* CTCP e (e) DCCP CCID3 *versus* CUBIC.

### A. Cenário de Simulação

Considerou-se uma topologia (vide Figura 1) em que quatro redes locais (LAN) estão interconectadas por seus respectivos roteadores,  $R = \{R_1, R_2, R_3, R_4\}$ , e enlaces WAN adjacentes,  $L = \{L_1, L_2, L_3, L_4\}$ , formando um cenário de rede típico de uma empresa com um conjunto de filiais.

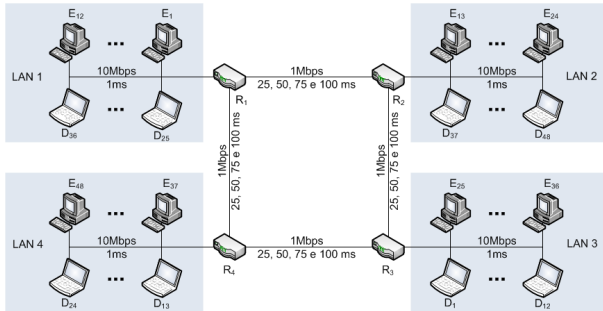


Fig. 1. Topologia adotada nas simulações com o tráfego VoIP.

Nas redes locais estão dispostos nós emissores  $i \in \mathbb{N} : E_i = \{E_1, E_2, \dots, E_{48}\}$  e nós destinatários  $i \in \mathbb{N} : D_i = \{D_1, D_2, \dots, D_{48}\}$  em quantidade suficiente e vazões individuais, de tal forma que os enlaces  $L_1, L_2, L_3$  e  $L_4$  fiquem saturados e em contenção. Especificamente, estão distribuídos 96 nós, uniformemente sobre as quatro LANs, sendo 12 nós emissores e 12 nós destinatários por LAN. Cada nó emissor em uma LAN tem um nó destinatário correspondente na LAN oposta. Seja  $E_1$  o nó emissor 1 da LAN conectada a  $R_1$ ,  $E_1$  enviará pacotes na direção de  $D_1$  na LAN conectada a  $R_3$ , aqui definida como sua LAN oposta. De forma similar, como  $E_{48}$  está disposto na LAN conectada a  $R_4$ ,  $D_{48}$  está disposto na LAN conectada a  $R_2$ . Dessa forma, os pacotes gerados em uma LAN devem atravessar dois enlaces WAN e um roteador intermediário para alcançar o seu destino na LAN oposta.

As LANs possuem enlaces internos com largura de banda de 10 Mbps e latência definida em 1 ms. Os enlaces WAN  $L_1, L_2, L_3$  e  $L_4$ , que interconectam as LANs, têm largura de banda de 1 Mbps e quatro valores possíveis para latência: 25, 50, 75 ou 100 ms. Para cada simulação, o valor de latência escolhido é obrigatoriamente adotado nos quatro enlaces WAN. Os roteadores  $R_1, R_2, R_3$  e  $R_4$  possuem filas com capacidade de 300 pacotes e política de descartes *DropTail*.

Os pares de protocolos (e.g., DCCP CCID2 *versus* CUBIC) de cada combinação são associados aos nós emissores de

tráfego, de forma que os nós emissores da LAN 1 e da LAN 2 são emissores exclusivos do primeiro protocolo e os nós emissores da LAN 3 e da LAN 4 são emissores exclusivos do segundo protocolo.

Considerando que podem ocorrer tempos de inatividade (i.e., tempo sem conversação) significativos em chamadas telefônicas, podendo inclusive superar o tempo de conversação, a razão entre o tempo de atividade e o tempo de inatividade é um parâmetro relevante. O tráfego VoIP foi simulado pelo gerador de tráfego exponencial do NS-2, seguindo as recomendações dos trabalhos [8] e [9] para tráfego VoIP simulado. O tempo médio de atividade foi ajustado para 1,004 s, o tempo médio de inatividade foi ajustado para 1,587 s, a taxa de envio foi ajustada para 80 Kbps e o tamanho do pacote foi de 160 Bytes.

Foram utilizados geradores de tráfego do tipo *Constant Bit Rate* (CBR), com o tamanho do pacote de 1.000 Bytes e a taxa de geração de pacotes de 600 Kbps. Os emissores CBR podem ser configurados livremente quanto à razão de emissão, e por essa razão, para provocar saturação nos enlaces desta topologia, não foram necessários tantos emissores simultâneos quantos os usados com o tráfego VoIP. Assim, nas simulações com o tráfego CBR foram utilizados 8 nós, sendo 1 nó emissor e 1 nó destinatário por LAN.

Em cada rodada, os fluxos de dados iniciaram em instantes aleatórios para que eventos de simulação (e.g., colisões, falhas, transmissões) ocorressem em instantes aleatórios. Os fluxos CBR iniciaram aleatoriamente no intervalo  $[0 \text{ s}, 100 \text{ s}]$  e os fluxos VoIP iniciaram aleatoriamente pela ferramenta de geração de números aleatórios (RNG) do simulador NS-2. Em todos os cenários o tempo de simulação foi de 900 s e as sementes aleatórias são obtidas do relógio de tempo real.

### B. Resultados da Simulação Usando o VoIP

As métricas utilizadas na comparação dos protocolos usando o padrão de tráfego VoIP são: taxa de entrega, vazão média, atraso médio fim a fim, *jitter* médio e índice de justiça. Os resultados da simulação estão dispostos nas Tabelas I a V, com valores que representam a média de 20 rodadas de simulação, acompanhados dos respectivos intervalos de confiança entre parêntesis, com nível de confiança de 95%.

O DCCP CCID2 apresentou os melhores resultados quando comparado aos protocolos com controles de congestionamento baseados em atraso, neste caso o CTCP e o DCCP CCID3. O CTCP e o CCID3 usam a informação de atraso para julgar se a rede está saturada e controlar a emissão de pacotes. Observou-se que, em disputa por enlace, tal abordagem permitiu ao DCCP CCID2 utilizar a fatia ociosa da largura de banda durante reduções de emissão de pacotes dos protocolos CTCP e DCCP CCID3. As Tabelas I e II mostram que, na comparação entre o DCCP CCID2 com o CTCP e o DCCP CCID3, o DCCP CCID2 obteve os melhores resultados de vazão média.

Incrementos nos valores de RTT praticamente não prejudicaram o desempenho do DCCP CCID2, com exceção da combinação com o CUBIC (Tabela III). Nos demais casos, somente a vazão dos demais protocolos foi reduzida, especialmente a do DCCP CCID3. É esperado que a vazão do DCCP

TABELA I

DCCP CCID2 *versus* CTCP, USANDO O TRÁFEGO VOIP.

RTT	Protocolos	Taxa de Entrega (%)	Vazão Média (Kbps)	Atraso Médio Fim a Fim (ms)	Jitter Médio (ms)
25 ms	DCCP CCID2	98,76 (0,00)	30,58 (0,14)	204,39 (2,00)	5,82 (0,02)
	CTCP	95,32 (0,00)	26,33 (0,13)	197,74 (2,38)	4,32 (0,03)
50 ms	DCCP CCID2	98,97 (0,00)	30,71 (0,20)	247,72 (2,02)	5,94 (0,06)
	CTCP	96,12 (0,00)	26,06 (0,15)	241,68 (2,09)	4,20 (0,03)
75 ms	DCCP CCID2	99,11 (0,00)	30,52 (0,14)	292,83 (2,57)	6,03 (0,03)
	CTCP	96,69 (0,00)	26,06 (0,10)	286,94 (2,79)	4,06 (0,05)
100 ms	DCCP CCID2	99,23 (0,00)	30,61 (0,12)	336,00 (2,11)	6,24 (0,03)
	CTCP	97,08 (0,00)	25,78 (0,10)	330,02 (2,34)	4,03 (0,04)

TABELA II

DCCP CCID2 *versus* DCCP CCID3, USANDO O TRÁFEGO VOIP.

RTT	Protocolos	Taxa de Entrega (%)	Vazão Média (Kbps)	Atraso Médio Fim a Fim (ms)	Jitter Médio (ms)
25 ms	DCCP CCID2	99,98 (0,00)	30,97 (0,16)	57,63 (0,16)	0,75 (0,03)
	DCCP CCID3	99,88 (0,00)	9,47 (0,46)	57,86 (0,25)	1,56 (0,09)
50 ms	DCCP CCID2	99,98 (0,00)	31,00 (0,14)	106,68 (0,06)	0,53 (0,01)
	DCCP CCID3	99,94 (0,00)	6,27 (0,15)	106,62 (0,04)	1,23 (0,04)
75 ms	DCCP CCID2	99,98 (0,00)	31,20 (0,17)	156,36 (0,04)	0,42 (0,01)
	DCCP CCID3	99,97 (0,00)	4,39 (0,04)	156,44 (0,03)	1,21 (0,03)
100 ms	DCCP CCID2	99,97 (0,00)	30,96 (0,11)	206,30 (0,05)	0,36 (0,00)
	DCCP CCID3	99,91 (0,00)	3,30 (0,04)	206,38 (0,05)	1,16 (0,06)

CCID3 seja reduzida com valores maiores de RTT, visto que seu algoritmo de controle de congestionamento é baseado em valores de atraso. O CTCP também é um algoritmo de controle de congestionamento baseado em atraso, porém o CTCP tem um componente baseado em perda de pacotes, o que lhe permite controlar a taxa de envio quando ocorrem descartes de pacotes, tipicamente por saturação na fila dos roteadores ou atraso na rede. Observa-se neste cenário que o CTCP foi afetado negativamente pelos incrementos de RTT, o que levou o DCCP CCID2 a alcançar bons resultados de taxa de entrega e vazão média (Tabela I).

O DCCP CCID2 apresentou desempenho inferior quando comparado ao CUBIC (Tabela III). Espera-se que o CUBIC, quando na fase côncava de sua função cúbica, retome o valor de janela de transmissão rapidamente. Entretanto, como evidenciam os dados das simulações, neste cenário tal diferencial só resultou em ganho significativo com RTTs superiores a 25 ms. Pondera-se aqui que o crescimento linear da janela de transmissão do CCID2 não é muito afetado quando o RTT é baixo, visto que após um evento de descarte novos pacotes chegam rapidamente, provocando um rápido crescimento da janela de transmissão do CCID2. Já com RTT igual a 100 ms o CUBIC atingiu uma vazão aproximadamente 20% superior à do DCCP CCID2. Considerando que o CUBIC adota uma função agressiva de crescimento da janela de transmissão, é esperado que haja descartes de pacotes de ambos os protocolos, em situações de contenção. Quando eventos de descarte ocorreram com o DCCP CCID2, oportunamente o CUBIC aumentou rapidamente sua janela de transmissão enquanto o DCCP CCID2 se recuperava de forma linear. Tal comportamento resultou em um número muito maior de pacotes descartados, provocados por congestionamento. Como pode ser observado na Tabela III, o CUBIC apresentou uma taxa de entrega de 5% a 7% menor do que a do DCCP CCID2.

As simulações com o DCCP CCID3 produziram resultados que sugerem uma alta estabilidade do protocolo, com atraso médio reduzido, baixo *jitter* e taxa de entrega superior a 99%, independentemente do protocolo oponente. Tais resultados são

TABELA III

DCCP CCID2 *versus* CUBIC, USANDO O TRÁFEGO VOIP.

RTT	Protocolos	Taxa de Entrega (%)	Vazão Média (Kbps)	Atraso Médio Fim a Fim (ms)	Jitter Médio (ms)
25 ms	DCCP CCID2	98,27 (0,00)	29,99 (0,11)	220,14 (0,82)	6,50 (0,03)
	CUBIC	90,99 (0,00)	28,38 (0,09)	210,61 (0,90)	4,07 (0,02)
50 ms	DCCP CCID2	98,35 (0,00)	28,62 (0,13)	265,49 (1,28)	6,58 (0,06)
	CUBIC	91,99 (0,00)	29,43 (0,11)	260,06 (1,26)	4,12 (0,04)
75 ms	DCCP CCID2	98,49 (0,00)	27,03 (0,11)	307,29 (0,77)	6,92 (0,05)
	CUBIC	92,71 (0,00)	30,39 (0,10)	304,12 (0,67)	4,35 (0,03)
100 ms	DCCP CCID2	98,58 (0,00)	25,66 (0,09)	345,98 (0,71)	7,32 (0,03)
	CUBIC	93,56 (0,00)	30,76 (0,09)	345,32 (0,58)	4,68 (0,03)

TABELA IV

DCCP CCID3 *versus* CTCP, USANDO O TRÁFEGO VOIP.

RTT	Protocolos	Taxa de Entrega (%)	Vazão Média (Kbps)	Atraso Médio Fim a Fim (ms)	Jitter Médio (ms)
25 ms	DCCP CCID3	99,89 (0,00)	9,32 (0,28)	59,91 (0,14)	3,03 (0,06)
	CTCP	99,97 (0,00)	31,03 (0,09)	61,69 (0,22)	2,04 (0,03)
50 ms	DCCP CCID3	99,89 (0,00)	5,77 (0,15)	109,43 (0,07)	4,02 (0,09)
	CTCP	99,98 (0,00)	31,09 (0,12)	111,61 (0,08)	1,99 (0,01)
75 ms	DCCP CCID3	99,82 (0,00)	3,64 (0,12)	159,99 (0,10)	5,01 (0,10)
	CTCP	99,93 (0,00)	31,14 (0,15)	162,72 (0,12)	1,89 (0,02)
100 ms	DCCP CCID3	99,61 (0,00)	2,28 (0,09)	210,92 (0,19)	6,27 (0,23)
	CTCP	99,81 (0,00)	31,05 (0,14)	214,36 (0,28)	1,82 (0,03)

especialmente importantes neste cenário, visto que alguns tipos de aplicações multimídia, como o VoIP, dependem de uma transmissão estável para funcionarem adequadamente. A ideia é que, em uma transmissão estável, cuja taxa de entrega seja máxima, a despeito da vazão, tais aplicativos podem ajustar adequadamente a qualidade de áudio à vazão disponível. Entretanto, o DCCP CCID3 apresentou os valores mais baixos de vazão (Tabelas II e IV). Pondera-se que os períodos de atividade e inatividade do tráfego VoIP resultaram em uma baixa produção de relatórios de receptor, o que prejudicou o ajuste da taxa de envio às condições da rede. Assim, o nó emissor do DCCP CCID3 não utilizou adequadamente a largura de banda disponível e o protocolo concorrente teve mais oportunidade de utilização da rede. Os incrementos no valor do RTT também reduziram a vazão do DCCP CCID3, o que não ocorreu com os protocolos concorrentes quando em disputa com o DCCP CCID3. Isso ocorreu tanto pelo mecanismo de controle de congestionamento baseado em atraso, portanto intrinsecamente sensível a incrementos de RTT, quanto pelo controle de congestionamento mais preciso do DCCP CCID3, que utiliza os informes do receptor para fazer uma rigorosa redução da taxa de transmissão para evitar congestionamentos nos roteadores. Como resultado desses dois fatores, o CCID3 não utilizou eficientemente a largura de banda da rede e seu protocolo oponente obteve diversas oportunidades de aumentar sua fatia de ocupação na largura de banda. O comportamento apresentado na Tabela IV é similar ao comportamento do DCCP CCID3 com o CUBIC e, por questão de espaço limitado, não foram incluídos neste artigo.

O DCCP CCID2, em disputa com CTCP e CUBIC, apresentou índice de justiça próximo de 1 (Tabela V), indicando alto índice de justiça com esses protocolos concorrentes, independentemente do valor de RTT utilizado. O DCCP CCID3, em disputa com DCCP CCID2, CTCP e CUBIC, apresentou índice de justiça variando entre 0,6 e 0,8, sendo impactado negativamente por incrementos no RTT.

Uma análise importante para este cenário é verificar se os protocolos avaliados são capazes de garantir as condições

TABELA V  
ÍNDICE DE JUSTIÇA DE JAIN, USANDO O TRÁFEGO VoIP.

Protocolos	RTT			
	25ms	50 ms	75 ms	100 ms
DCCP CCID2 x CTCP	0,99 (0,00)	0,98 (0,00)	0,98 (0,00)	0,98 (0,00)
DCCP CCID2 x DCCP CCID3	0,76 (0,01)	0,69 (0,01)	0,64 (0,00)	0,60 (0,00)
DCCP CCID2 x CUBIC	0,99 (0,00)	0,99 (0,00)	0,99 (0,00)	0,99 (0,00)
DCCP CCID3 x CTCP	0,76 (0,01)	0,68 (0,01)	0,61 (0,00)	0,57 (0,00)

necessárias para uma transmissão multimídia do tipo VoIP. A ITU-T G.114 [10] e Ross [11] recomendam para as aplicações VoIP valores de atraso menores que 150 ms, jitter não superior a 50 ms e limite máximo para descarte de pacotes de 1%, visto que as pessoas não toleram atrasos superiores em uma conversação e o descarte de muitos pacotes pode dificultar a compreensão da conversação.

As Tabelas II e IV, mostram que os valores de atraso médio fim a fim foram iguais ao dobro do valor de RTT utilizado. Tais valores de atraso ocorreram porque o DCCP CCID3 reduziu significativamente a sua taxa de envio para evitar sobrecarga na fila entre os roteadores. As reduções na taxa de envio são corroboradas pelos altos valores de taxa de entrega do CCID3. Nas Tabelas I e III, os valores de atraso foram superiores a 150 ms, independentemente do valor de RTT utilizado. Assim, pode-se dizer que, nas comparações do DCCP CCID2 com o CTCP e CUBIC, os valores de atraso não satisfazem as recomendações para uma transmissão VoIP.

O protocolo que mais se aproximou das recomendações citadas para transmissões VoIP foi o DCCP CCID3, pois apresentou os valores mais baixos de atraso, jitter e perda de pacotes, todos dentro dos limites recomendados pelo ITU-T G.114 e Ross. De forma relevante, com a presença do CCID3 em qualquer uma das combinações de protocolos, as aplicações emissoras foram favorecidas por tal estabilidade nas transmissões (i.e., alta taxa de entrega e pouca variação na vazão) que até o protocolo oponente produziu valores de atraso, jitter e descartes dentro dos limites recomendados. Esse é um resultado importante porque corrobora sobremaneira a adequação do DCCP CCID3 para certos tipos de transmissões multimídia, como por exemplo, o VoIP.

### C. Resultados da Simulação Usando o CBR

As métricas utilizadas na comparação dos protocolos usando o padrão de tráfego CBR são: taxa de entrega, vazão média e índice de justiça. Os resultados da simulação estão dispostos nas Tabelas VI a IX, com valores que representam a média de 20 rodadas de simulação, acompanhados dos respectivos intervalos de confiança, com nível de confiança de 95%.

O DCCP CCID2 apresentou os melhores resultados quando comparado aos protocolos com controles de congestionamento baseados em atraso, neste caso o CTCP e o DCCP CCID3. As Tabelas VI e VII mostram que, na comparação entre o DCCP CCID2 com o CTCP e o DCCP CCID3, o DCCP CCID2 obteve os melhores resultados de vazão média e alta taxa de entrega. De modo destacado, embora o DCCP CCID3 seja um algoritmo baseado em atraso, nesta disputa os incrementos nos valores de latência favoreceram o desempenho do DCCP CCID3 devido à demora para o recebimento

dos ACKs e à quantidade de pacotes descartados do DCCP CCID2, forçando-o a reduzir a janela de transmissão mais vezes e diminuir sua emissão de pacotes. Com o CTCP, o DCCP CCID2 obteve bons resultados de vazão média e os incrementos no valor de latência não prejudicaram o seu desempenho. O índice de justiça sugere que o DCCP CCID2 não prejudicou o desempenho do CTCP, o que remete à possibilidade de que o CTCP tenha sofrido com a quantidade de pacotes descartados e com os incrementos de latência.

O DCCP CCID2 apresentou desempenho inferior quando comparado ao CUBIC (Tabela VIII). Considerando que o CUBIC adota uma função agressiva de crescimento da janela de transmissão, é esperado que haja descartes de pacotes de ambos os protocolos, em situações de contenção. Quando eventos de descarte ocorreram com o CCID2, oportunamente o CUBIC aumentou rapidamente sua janela de transmissão enquanto o DCCP CCID2 se recuperava de forma linear. Tal comportamento do CUBIC resultou em um número muito grande de pacotes descartados, provocados por congestionamento. Como pode ser observado na Tabela VIII, o CUBIC teve uma taxa de entrega 13% menor do que a do DCCP CCID2.

Dentre os protocolos escolhidos, o DCCP CCID3 apresentou os valores mais baixos de vazão (Tabelas VII e IX). Pondera-se que a alta sensibilidade e precisão do controle de congestionamento do DCCP CCID3 consegue reagir imediatamente ao menor sinal de congestionamento na rede, de tal forma que neste cenário, onde os emissores CBR têm alta vazão potencial e os enlaces estavam continuamente saturados, o DCCP CCID3 conteve sua emissão de pacotes, adaptando-se imediatamente a cada tentativa de aumento de vazão do protocolo oponente que resultou em congestionamento. Assim, os nós emissores do DCCP CCID3 não utilizaram adequadamente a sua suposta fatia igualitária da largura de banda. O comportamento descrito na Tabela VIII é similar ao comportamento do DCCP CCID3 com o CUBIC, por questão de espaço limitado, não foi incluído neste artigo.

Neste cenário, os incrementos no valor do RTT impactaram positivamente nos resultados do DCCP CCID3, o que não ocorreu com os protocolos concorrentes, quando em disputa com o DCCP CCID3. É importante notar que o desempenho do DCCP CCID3 é intrinsecamente associado ao atraso dos pacotes e por conseguinte ao RTT. É esperado que o DCCP CCID3 tenha seu desempenho piorado com os aumentos de RTT. Entretanto, neste caso, há evidências de que o aumento do RTT neste cenário tenha impactado o DCCP CCID3, mas tenha impactado de forma mais intensa os protocolos concorrentes, com exceção do CUBIC. As evidências, que podem ser visualizadas nas Tabelas VII e IX, são de que o constante abarrotamento nas filas de pacotes entre os roteadores, associado ao aumento do RTT, tenha causado redução na dinâmica da entrega dos ACKs, gerando sucessivos eventos de redução de janela de congestionamento dos protocolos oponentes. Depreende-se também das Tabelas que, (i) o DCCP CCID3 não sofreu constantemente com situações de redução de vazão, já que houve constantes reduções de vazão do seu oponente e (ii) o CUBIC conseguiu contornar a situação imposta, graças ao retorno quase imediato do valor anterior

TABELA VI

DCCP CCID2 versus CTCP, USANDO O TRÁFEGO CBR.

RTT	Protocolos	Taxa de Entrega (%)	Vazão Média (Kbps)	Índice de Justiça (JFI)
25 ms	DCCP CCID2	99,70 (0,00)	476,14 (16,62)	0,85 (0,02)
	CTCP	99,31 (0,00)	284,13 (15,01)	
50 ms	DCCP CCID2	99,71 (0,00)	477,80 (11,49)	0,87 (0,01)
	CTCP	99,31 (0,00)	291,36 (9,45)	
75 ms	DCCP CCID2	99,72 (0,00)	479,81 (10,49)	0,90 (0,02)
	CTCP	99,19 (0,00)	307,71 (13,01)	
100 ms	DCCP CCID2	99,69 (0,00)	490,30 (15,13)	0,91 (0,01)
	CTCP	99,15 (0,00)	317,20 (11,31)	

TABELA VII

DCCP CCID2 versus DCCP CCID3, USANDO O TRÁFEGO CBR.

RTT	Protocolos	Taxa de Entrega (%)	Vazão Média (Kbps)	Índice de Justiça (JFI)
25 ms	DCCP CCID2	99,51 (0,00)	542,97 (5,53)	0,91 (0,01)
	DCCP CCID3	99,68 (0,00)	322,35 (13,19)	
50 ms	DCCP CCID2	99,51 (0,00)	546,51 (27,61)	0,92 (0,03)
	DCCP CCID3	99,58 (0,00)	334,11 (23,00)	
75 ms	DCCP CCID2	99,47 (0,00)	514,78 (30,56)	0,95 (0,02)
	DCCP CCID3	99,55 (0,00)	373,86 (23,98)	
100 ms	DCCP CCID2	99,48 (0,00)	452,98 (20,99)	0,97 (0,02)
	DCCP CCID3	99,54 (0,00)	438,42 (15,30)	

de sua janela de congestionamento. Evidenciando também tal comportamento, o DCCP CCID3 obteve os melhores incrementos de vazão associados ao crescimento o RTT junto aos protocolos oponentes que utilizam crescimento linear da janela de congestionamento, como o DCCP CCID2.

O DCCP CCID2, em disputa com o CTCP, apresentou índice de justiça próximo de 1 (Tabela VI), indicando alto índice de justiça com esse protocolo concorrente, independentemente do valor de RTT utilizado. Com o CUBIC (Tabela VIII), o índice de justiça variou entre 0,6 e 0,7, o que indica uma menor adequação do CUBIC à propriedade de justiça. O DCCP CCID3, em disputa com DCCP CCID2 e CTCP, apresentou índice de justiça próximo de 1 (Tabelas VII e IX), indicando alto índice de justiça com esses protocolos concorrentes, independentemente do valor de RTT utilizado. Com o CUBIC, o índice de justiça variou entre 0,6 e 0,7, o que sustenta a condição de menor adequação do CUBIC à propriedade de justiça.

### III. CONCLUSÃO

Os resultados apontaram que o DCCP CCID2 obteve vazão superior à do CTCP e DCCP CCID3, independentemente do padrão de tráfego utilizado. O DCCP CCID2 apresentou desempenho inferior apenas quando comparado ao CUBIC. Dentre os protocolos escolhidos, o DCCP CCID3 apresentou os menores valores de vazão média. Entretanto, diante das recomendações de [10] e [11], os resultados encontrados sugerem que o protocolo DCCP, em especial o CCID3, é o protocolo mais indicado para transmissão de dados VoIP, porque apresentou os valores mais baixos de descarte de pacotes ( $< 1\%$ ), atraso médio fim a fim ( $< 150\text{ ms}$ ) e jitter médio ( $< 50\text{ ms}$ ). O CUBIC obteve alta vazão média e bons resultados em enlaces com RTT superiores a  $100\text{ ms}$ , porém com o tráfego CBR, o CUBIC prejudicou o desempenho dos protocolos concorrentes e apresentou menor índice de justiça. O CTCP superou em vazão apenas o DCCP CCID3.

TABELA VIII

DCCP CCID2 versus CUBIC, USANDO O TRÁFEGO CBR.

RTT	Protocolos	Taxa de Entrega (%)	Vazão Média (Kbps)	Índice de Justiça (JFI)
25 ms	DCCP CCID2	98,34 (0,00)	125,62 (12,64)	0,65 (0,02)
	CUBIC	86,40 (0,02)	703,58 (10,50)	
50 ms	DCCP CCID2	98,29 (0,00)	107,05 (9,53)	0,64 (0,01)
	CUBIC	85,04 (0,02)	734,52 (7,09)	
75 ms	DCCP CCID2	98,05 (0,00)	101,74 (6,48)	0,63 (0,01)
	CUBIC	87,31 (0,02)	754,77 (3,21)	
100 ms	DCCP CCID2	98,03 (0,00)	107,57 (8,07)	0,64 (0,01)
	CUBIC	88,74 (0,02)	750,49 (9,18)	

TABELA IX

DCCP CCID3 versus CTCP, USANDO O TRÁFEGO CBR.

RTT	Protocolos	Taxa de Entrega (%)	Vazão Média (Kbps)	Índice de Justiça (JFI)
25 ms	DCCP CCID3	99,64 (0,00)	369,58 (13,64)	0,96 (0,01)
	CTCP	99,39 (0,00)	479,86 (11,88)	
50 ms	DCCP CCID3	99,57 (0,00)	363,60 (13,43)	0,95 (0,01)
	CTCP	99,41 (0,00)	478,25 (12,84)	
75 ms	DCCP CCID3	99,55 (0,00)	374,76 (22,11)	0,95 (0,01)
	CTCP	99,43 (0,00)	464,85 (21,00)	
100 ms	DCCP CCID3	99,47 (0,00)	384,96 (27,80)	0,95 (0,02)
	CTCP	99,38 (0,00)	461,63 (20,59)	

Observou-se que os incrementos nos valores de latência do enlace produziram efeitos distintos sobre as variantes do DCCP. No cenário com o tráfego VoIP, o aumento nos valores de latência não provocou um impacto significativo na vazão do DCCP CCID2, mas reduziu a vazão do DCCP CCID3, independentemente do protocolo oponente. No cenário com o tráfego CBR, na maioria dos cenários, o aumento nos valores de latência não impactou a vazão do DCCP CCID2, mas aumentou o desempenho do DCCP CCID3. Embora o DCCP CCID3 seja um algoritmo baseado em atraso de pacotes, os incrementos nos valores de latência usando o tráfego CBR favoreceram o desempenho do DCCP CCID3 em oposição aos protocolos baseados em perda de pacotes, devido à demora para o recebimento dos ACKs e a quantidade de pacotes descartados, o que forçou o protocolo oponente a reduzir a janela de transmissão mais vezes e diminuir sua emissão de pacotes.

### REFERÊNCIAS

- [1] E. Kohler, M. Handley, and S. Floyd, "Datagram congestion control protocol (dccp)," RFC 4340 (Proposed Standard), IETF, 2006.
- [2] K. Tan and J. Song, "A compound tcp approach for high-speed and long distance networks," in *IEEE INFOCOM*, 2006.
- [3] S. Ha, I. Rhee, and L. Xu, "Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant," *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 42, no. 5, pp. 64–74, 2008.
- [4] S. Floyd and E. Kohler, "Profile for datagram congestion control protocol (dccp) congestion control id 2: Tcp-like congestion control," RFC 4341 (Proposed Standard), IETF, 2006.
- [5] S. Floyd, E. Kohler, and J. Padhye, "Profile for datagram congestion control protocol (dccp) congestion control id 3: Tcp-friendly rate control," RFC 4342 (Proposed Standard), IETF, 2006.
- [6] S. Floyd and E. Kohler, "Profile for datagram congestion control protocol (dccp) congestion id 4: Tcp-friendly rate control for small packets," RFC 5622 (Experimental), IETF, 2009.
- [7] K. Fall and K. Varadhan, "The network simulator ns-2: Documentation," <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>, 2007.
- [8] I.-T. R. P.59, "Telephone transmission quality objective measuring apparatus: Artificial conversational speech," 1993.
- [9] C. Bouras, D. Primpas, and K. Stamos, "Enhancing ns-2 with diffserv qos features," in *SpringSim '07*, San Diego, CA, USA, 2007.
- [10] I.-T. R. G.114, "One-way transmission time," 2003.
- [11] J. Ross, *VoIP - Voz sobre IP*. Rio de Janeiro: Antenna Edições Técnicas, 2007.