

# Avaliação de desempenho do protocolo DCCP para redes de alta velocidade

Carlos A. Froldi<sup>1</sup>, Nelson L. S. da Fonseca<sup>1</sup> e Carlos Papotti

<sup>1</sup>Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas  
Campinas, SP

{carlos,nfonseca}@ic.unicamp.br, cpapotti@sj.unisal.br

**Abstract.** *The Internet transport layer protocols, TCP and UDP, do not provide efficient transport for multimedia streams. UDP is used for these application, due to its low overhead. However it does not implement any kind of congestion control mechanism. A new transport layer protocol, called DCCP, was proposed to meet the demand of multimedia applications, aiming at replacing the UDP protocol. An evaluation of the performace of DCCP, operating in high-speed networks is necessary for assessing the adequacy of its properties such as scalability, fairness, convergence and compatibility with TCP flows in such type of network.*

**Resumo.** *Os protocolos existentes na camada de transporte na Internet, TCP e UDP, não oferecem serviços para transmissão eficiente de fluxos multimídia, porém, este último é adotado com maior frequência para o uso de tais aplicações, o que pode colocar em risco o bom funcionamento da Internet, uma vez que o mesmo não implementa nenhum tipo de mecanismo de controle de congestionamento. Uma proposta de um novo protocolo da camada de transporte, chamado DCCP, foi elaborada para atender a demanda de tais aplicações e substituir o protocolo UDP. O presente artigo avalia o desempenho do protocolo DCCP, a fim de se verificar a adequabilidade da sua adoção em redes de alta velocidade.*

## 1. Introdução

Nos últimos anos, houve um aumento considerável do número de aplicações multimídia na Internet, que são sensíveis ao atraso e que requerem, de maneira geral, taxas de transmissão mínima. É extremamente desafiador fornecer a qualidade de serviço necessária à estas aplicações, utilizando o tipo de serviço *Best Effort*, apesar do aumento significativo de banda nos enlaces da Internet. Os protocolos atualmente empregados na camada de transporte, *Transmission Control Protocol* (TCP) e *User Datagram Protocol* (UDP), são ineficientes na garantia de condições necessárias para transmissões das aplicações multimídia, porém este último tem sido adotado com mais frequência, uma vez que as aplicações multimídia são sensíveis ao atraso.

O aumento da utilização do protocolo UDP pelas aplicações multimídia pode colocar em risco o bom funcionamento da Internet, sobretudo em redes de alta velocidade, uma vez que este protocolo não efetua nenhum tipo de controle de congestionamento. Por outro lado, algumas funcionalidades do protocolo TCP, como por exemplo, o conceito de conexões, são interessantes para alguns tipos de aplicações multimídia. A proposta,

realizada por um grupo de trabalho do IETF, de um novo protocolo para a camada de transporte, o *Datagram Congestion Control Protocol* (DCCP) [Floyd et al. 2006b] oferece o estabelecimento de conexão para envio não confiável de fluxo de dados e controle de congestionamento. O protocolo fornece dois mecanismos distintos de controle de congestionamento, sendo ambos amigáveis ao protocolo TCP. Um dos controles, o *TCPLike* [Floyd and Kohler 2006a], é similar ao controle de janela implementado no TCP e o outro, o *TCP-Friendly Rate Control* (TFRC) [Floyd et al. 2006a] implementa controle baseado em taxas. Para que este novo protocolo possa ser introduzido à Internet, substituindo o protocolo UDP para transmissão de fluxos multimídia, é necessário conhecer suas potencialidades e limitações.

Apesar de avaliações preliminares do protocolo DCCP terem sido realizadas em [Navaratnam et al. 2006], [Takeuchi et al. 2005], [Gu et al. 2006], [G.Sawar et al. 2007], nenhuma delas avaliou o protocolo em redes de alta velocidade que tem grande disponibilidade de banda passante, o foco destes trabalhos foi avaliar o protocolo DCCP quando este opera em redes sem fio e a compatibilidade do mesmo com o protocolo TCP-Reno em tais redes ou em redes de baixa velocidade. O comportamento do mecanismo de controle de congestionamento em redes de alta velocidade difere significativamente daquele em redes de baixa velocidade. Como por exemplo, o protocolo TCP, amplamente utilizado na Internet, é altamente ineficiente em redes de alta velocidade, tornando-se o gargalo em transferência de dados nestas redes. Tal ineficiência motivou a proposição de uma série de variantes do TCP, tais como *Fast TCP* [Jin et al. 2004] e *Cubic TCP* [Ha et al. 2008]. No entanto, estas variantes devem propor escalabilidade com novas taxas de transmissão assim como assegurar outras propriedades, tais como justiça interprotocolo e compatibilidade com o protocolo TCP-Reno, a versão mais popular na Internet.

O presente artigo avalia o desempenho do funcionamento do protocolo DCCP, quando este opera com o controle de congestionamento TFRC, em redes de alta velocidade. Utilizou-se tanto simulação, tendo como ferramenta o simulador NS-2, quanto medições, utilizando a implementação do protocolo DCCP presente no sistema operacional Linux. Diferentes cenários foram elaborados para a avaliação da escalabilidade, da convergência, da justiça e da compatibilidade com o TCP-Reno. Todos os cenários seguem as recomendações para análise dos mecanismos de controle de congestionamento em novos protocolos propostas em [Floyd and Kohler 2006b]. Pelo que se tem conhecimento nenhum outro estudo foi realizado visando avaliar o desempenho do protocolo DCCP em redes de alta velocidade. O presente estudo é, portanto, uma primeira tentativa de se avaliar a adequabilidade deste protocolo para redes de alta velocidade, assim como, tentar identificar mudanças necessárias neste protocolo para a operação nas redes de alta velocidade. Tal avaliação é de suma importância dado que o mecanismo de controle de congestionamento do DCCP foi construído para ser compatível com o do TCP-Reno e consequentemente, pode sofrer das mesmas ineficiências da operação deste último em redes de alta velocidade.

Este artigo está organizado da seguinte forma, a seção 2 descreve o protocolo DCCP e o mecanismo de controle de congestionamento TFRC. A seção 3 discute as propriedades avaliadas. A seção 4 apresenta os resultados dos experimentos realizados e a seção 5 deriva algumas conclusões.

## 2. Protocolo DCCP

O protocolo DCCP foi concebido para dar suporte às aplicações multimídia na Internet, tais como *streaming* e voz sobre IP. O protocolo DCCP visa oferecer controle de congestionamento e reconhecimento da chegada de pacotes (ACK), às aplicações que não toleram o *overhead* introduzido pela entrega confiável provida pelo protocolo TCP. As características principais do protocolo DCCP são: fluxo de datagramas orientado à conexão e não confiável, com confirmação de entrega, *handshake* confiável para estabelecimento e término da conexão, negociação confiável de parâmetros a serem utilizados durante a conexão e mecanismos de controle de congestionamento *TCP-Friendly*, que incorporam o mecanismo *Explicit Congestion Notification* (ECN).

Os controles de congestionamento suportados pelo DCCP são definidos através de um CCID (*Congestion Control Identifier*) e podem ser identificados por um número de 0 a 255. Os CCIDs definidos, inicialmente, para o DCCP, de acordo com [Floyd et al. 2006b], são: 0 – Reservado, 1 – Controle de congestionamento não especificado baseado no usuário, 2 – Controle de congestionamento *TCP-Like*, 3 – Controle de congestionamento TFRC.

O controle de congestionamento TFRC (CCID 3) é recomendado para aplicações que precisam transmitir a taxas de dados constantes, pois são sensíveis à mudanças abruptas na taxa de envio. Um exemplo de aplicação que utilizaria o CCID 3 é voz sobre IP em tempo real. No TFRC, o receptor efetua medições de perdas de pacotes e retorna esta informação ao emissor que utiliza estas mensagens de retorno para medição do *round-trip time* (RTT). O retorno das perdas enviado pelo receptor e o RTT estimado são utilizados para atualizar a taxa de transmissão do emissor, calculada através da equação de vazão, que é uma versão simplificada da equação de *throughput* do TCP-Reno, definida por:

$$X = \frac{s}{R * \text{sqrt}(2 * b * p/3) + (tRTO * (3 * \text{sqrt}(3 * b * p/8) * p * (1 + 32 * p^2)))} \quad (1)$$

onde:  $X$  é a taxa de transmissão em bytes/segundo,  $s$  é o tamanho do pacote em bytes,  $R$  é o RTT em segundos,  $p$  é a taxa de ocorrência de perdas, valor entre 0 e 1, que expressa o número de eventos de perda em relação a fração de pacotes transmitidos,  $tRTO$  é o valor do *timeout* de retransmissão do TCP em segundos e  $b$  é igual a 1 e representa o número máximo de pacotes confirmados por um simples pacote de confirmação.

O emissor envia pacotes ao receptor através de um fluxo de dados com taxa de transmissão controlada. A medida que pacotes de confirmação de envio são recebidos (ou não) ocorrem mudanças na taxa de transmissão. Um pacote de confirmação enviado pelo receptor contém as seguintes informações: o *timestamp* do último pacote de dados recebidos, o tempo decorrido entre o recebimento do último pacote e a geração do pacote de confirmação e a taxa estimada com a qual o receptor recebeu os dados após o envio do último pacote de confirmação. Calcular a taxa de eventos de perda ( $p$ ), de maneira eficiente, é de fundamental importância para o TFRC. O receptor efetua este cálculo através de medições que consideram os pacotes enviados e os pacotes recebidos, baseando-se no número de seqüência dos mesmos. Todo pacote transmitido possui um número de seqüência que é incrementado de uma unidade, para cada pacote enviado. O receptor mantém uma estrutura para armazenar um histórico dos pacotes recebidos e dos pacotes

não-recebidos. Um pacote perdido é detectado quando são recebidos três pacotes com número de seqüência superior a um reconhecimento não-recebido. Para efetuar o cálculo da taxa de eventos de perda é preciso calcular o intervalo médio de perdas. Isto é feito considerando os  $n$  eventos de perda mais recentes e atribuindo pesos a cada um deles. A fórmula para calcular os pesos destes eventos é definida em [Floyd et al. 2006a].

### 3. Propriedades Avaliadas

Para verificar a eficiência do protocolo DCCP, quando este opera em redes de alta velocidade, métricas específicas foram avaliadas, tanto nos experimentos de simulação quanto nos de medição. São elas: escalabilidade, justiça, convergência e compatibilidade com o protocolo TCP-Reno. A avaliação destas métricas são recomendadas em [Floyd and Kohler 2006b]. A seguir uma descrição de cada uma destas métricas e sua relevância.

A escalabilidade é definida como a capacidade do protocolo em se adaptar ao crescimento da disponibilidade de recursos de uma rede, sendo fundamental para um protocolo operar nas redes de alta velocidade. Os experimentos avaliam a escalabilidade em função da capacidade disponível no enlace. Aumenta-se a capacidade de transmissão dos enlaces e avalia-se a habilidade do protocolo de utilizar, de forma eficiente, a banda disponível. Os experimentos investigam, também, a escalabilidade, em função do número de conexões; aumenta-se o número de conexões do protocolo e verifica-se a habilidade do protocolo de manter a utilização do enlace estável e justa entre as conexões.

O critério de justiça pode ser avaliado pela capacidade do protocolo em garantir divisão igualitária de banda passante entre as conexões, pelo ajuste indireto da taxa de transmissão. É importante que um protocolo apresente justiça para garantir que as conexões que compartilham o enlace possam aumentar a sua taxa de transmissão de maneira eficiente. Quantifica-se o grau de justiça através do coeficiente *Jain Fairness Index* [Jain 1991], que varia entre 0 e 1. Valores mais próximos de 0 indicam injustiça e valores mais próximos de 1 um sistema justo.

A convergência à justiça é o tempo necessário para que se obtenha divisão igualitária da banda passante. É importante que um protocolo apresente convergência para garantir que conexões recentemente iniciadas possam competir de maneira justa, pela banda passante, com conexões iniciadas há mais tempo.

A compatibilidade com o TCP-Reno é definida como a capacidade dos fluxos de dados do protocolo coexistirem de maneira justa com os fluxos de dados do protocolo TCP, garantindo que ambos os fluxos possam disputar de maneira equilibrada o uso da banda passante.

### 4. Avaliação de desempenho

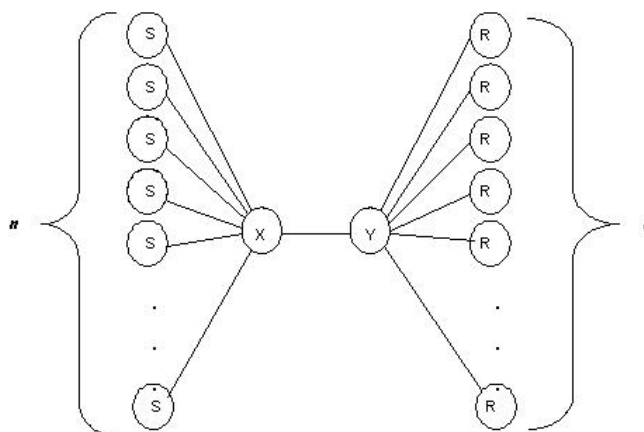
Os cenários e métricas utilizados para avaliação do protocolo DCCP em redes de alta velocidade foram derivados a partir do proposto em [Floyd and Kohler 2006b]. Todos os experimentos utilizam a topologia *Dumbbell* (Figura 1), que contém um único enlace gargalo constituído por dois roteadores por onde passam conexões. O número de conexões varia de acordo com os experimentos realizados.

Para os experimentos de simulação foi utilizado o simulador de redes NS-2 [Network Simulator 2010], versão 2.31. Para os experimentos de medição foi utilizado

o sistema operacional Linux, com o kernel da versão 2.6.20, que possui o protocolo DCCP implementado e operacional. Tanto a implementação do protocolo DCCP no NS-2, quanto no Linux, seguem as especificações definidas em [Floyd et al. 2006b].

Para os experimentos de simulação com o NS-2, os dois roteadores utilizam gerenciamento de fila *droptail* e possuem *buffer* de 2500 pacotes, valor este semelhante ao tamanho de buffers em roteadores reais [Wei et al. 2005]. Para evitar impactos relacionados a sincronização das conexões nas simulações, os instantes dos inícios das transmissões e os atrasos de propagação para cada uma das conexões foram gerados aleatoriamente. Os instantes dos inícios variaram entre 1 e 10s e os atrasos de propagação entre 5 e 15ms. Tráfego *background* foi introduzido, visando refletir composição de tráfego em ambiente de redes reais. O tráfego *background* utiliza 20%, 50% ou 80% da capacidade do enlace de gargalo, no sentido reverso, de acordo com a distribuição: 20% de tráfego UDP, 56% de tráfego Web e 24% de tráfego FTP. O tráfego utilizado pelas conexões foi do tipo CBR, com a taxa de transmissão de cada conexão ajustada para que a mesma faça uso de toda a capacidade de transmissão do enlace de gargalo estipulado no cenário do experimento.

Para os experimentos de medição, foram utilizados dois computadores com interfaces ethernet com capacidade de 1Gbps, interligados através de um *switch router* com capacidade de 1Gbps por porta, sendo que cada uma das portas do *switch* estava com uma rota estática habilitada, emulando dois roteadores, já que as portas possuem um processador de pacotes e filas independentes. Todas as métricas de distribuição de tráfego *background* e limitações da capacidade do enlace físico foram obtidas através do uso da ferramenta *tc*, *Traffic Control* [Traffic Control HOWTO 2010], e para o envio de dados das conexões DCCP e TCP foi utilizado a ferramenta Iperf [Iperf 2010], sempre com transmissão de tráfego CBR, com tempos para os instantes dos inícios variando entre 1 e 10s. As únicas métricas não coletadas nos experimentos de medição dizem respeito aos tempos de atraso de propagação, que não podem ser manipulados e dependem das características físicas e de operação da rede.



**Figura 1. Topologia Dumbbell**

Os gráficos apresentados mostram o valor médio obtido à partir da execução de 6 replicações para cada experimento. Para o cálculo do intervalo de confiança, foram

utilizados o método de replicações independente com nível de confiança de 95%. O tempo de simulação de todos os experimentos foi de 900s.

## Escalabilidade

Para avaliar a escalabilidade do protocolo DCCP foram elaborados dois cenários distintos: um para avaliar a escalabilidade em função do aumento da banda passante dos enlaces e outro em função do número de conexões. Para avaliar a escalabilidade em função da capacidade de transmissão do enlace de gargalo, variou-se a capacidade no seguinte conjunto: [155Mbps, 622Mbps, 1Gbps]. O atraso do enlace foi fixado em 100ms, nos experimentos de simulação, e o número de conexões DCCP utilizado foi 16. A Figura 2 e a Figura 3 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos para os experimentos simulados e de medição. Em ambos os gráficos podemos perceber um comportamento semelhante, com valores um pouco superiores para os experimentos de medição, o que se deve ao fato de que, nos mesmos, o atraso de propagação é inferior ao valor de 100ms estipulado nos experimentos de simulação. A medida que o tráfego *background* fica mais intenso os valores em ambos os experimentos ficam mais próximos. As 16 conexões DCCP utilizam, eficientemente, o enlace (utilização superior a 0.9) para enlaces com capacidade igual a 155 Mbps. Com o aumento da capacidade do enlace, nos experimentos de medição, a utilização é reduzida de maneira significativa, chegando a ser 0.6, para a capacidade de 1Gbps (Figura 3). Pode-se concluir que o protocolo não é escalável quanto ao aumento de disponibilidade de banda. Esta ineficiência deve-se a ausência de um mecanismo para estimar a disponibilidade de banda passante na implementação do TFRC que possa operar em conjunto com o controle de congestionamento, a fim de que se tenha o uso eficiente da largura de banda disponível.

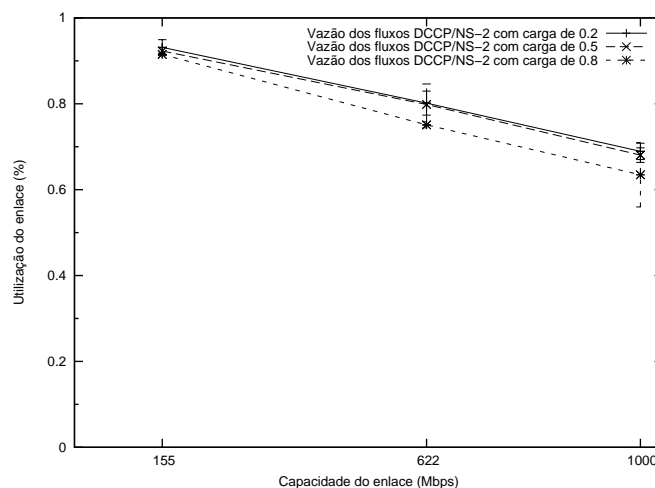
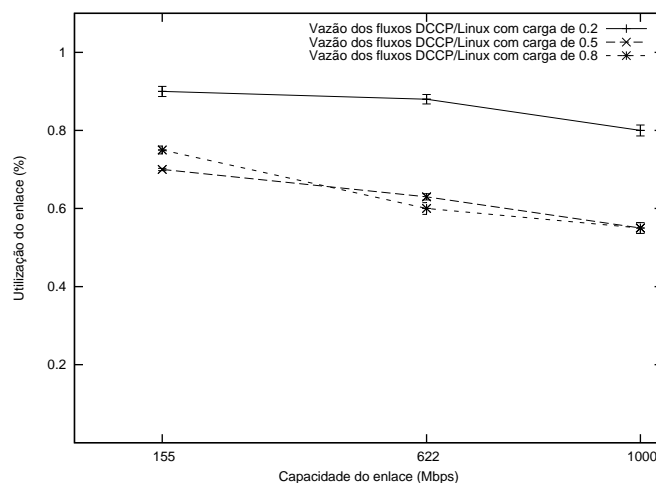


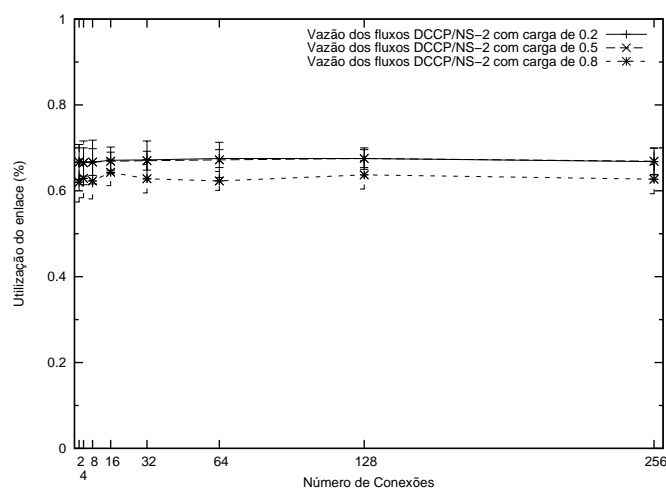
Figura 2. Utilização do enlace em função da variação da banda (NS-2)

Para avaliar a escalabilidade em função do número de conexões, foram realizados experimentos com o número de conexões DCCP variando entre 2 e 32 ( $2^1, 2^2, 2^3, \dots, 2^4$ ), para os experimentos de medição, e variando entre 2 e 256 ( $2^1, 2^2, 2^3, \dots, 2^8$ ), para os experimentos de simulação. A diferença na variação do número de conexões entre os experimentos deve-se as limitações de hardware presente nos dispositivos utilizados para realização dos experimentos de medição. A capacidade de transmissão do enlace



**Figura 3. Utilização do enlace em função da variação da banda (Linux)**

foi fixado em 1Gbps e o atraso de propagação em 100ms, no caso dos experimentos de simulação. A Figura 4 e a Figura 5 apresentam, respectivamente, os resultados da avaliação da escalabilidade em função da variação do número de conexões, para os experimentos de simulação e de medição. Pode-se observar valores um pouco superiores para os experimentos de medição, devido ao fato de que, nos mesmos, o atraso de propagação é inferior ao valor de 100ms estipulado nos experimentos de simulação. A medida que o tráfego *background* fica mais intenso os valores em ambos os experimentos ficam mais próximos. Nota-se que a medida que o número de conexões aumenta, até 256, nos experimentos de simulação, a utilização do enlace permanece estável e o tráfego *background* implica em mudanças discretas na utilização. O protocolo DCCP opera de maneira escalável e eficiente em relação ao aumento do número de conexões, demonstrando que o mecanismo de controle de congestionamento empregado pelo TFRC garante a escalabilidade em função do número de conexões.



**Figura 4. Utilização do enlace em função do número de conexões (NS-2)**

## Justiça

Para avaliar a justiça do protocolo foram definidos dois cenários de simulação, ambos com 4 conexões DCCP transmitindo no enlace de gargalo, atraso de propagação de 100ms, no caso dos experimentos de simulação, e capacidade do enlace de 1Gbps. No primeiro cenário, os fluxos DCCP são iniciados, no mesmo instante de tempo (no instante 1s), enquanto que no segundo cenário os fluxos DCCP são iniciados, em instantes de tempo distintos (aleatoriamente entre 1s e 10s). A Figura 6 apresenta os resultados da avaliação de justiça para o primeiro cenário proposto, tanto para os experimentos de simulação quanto para os de medição. Nota-se, em ambos os casos, que independente da intensidade do tráfego *background* os valores do *Jain Fairness Index* ficam próximos a 0.9, que indica que o protocolo produz justiça, ou seja, o DCCP provê distribuição de banda equilibrada entre os fluxos que competem pelo enlace. A Figura 7 apresenta os resultados da avaliação de justiça para o segundo cenário, tanto para os experimentos de simulação quanto os de medição. Os valores são similares aos obtidos no cenário anterior, reforçando a propriedade de justiça existente no protocolo.

## Convergência

Para avaliar a convergência do protocolo, foram realizados experimentos com o enlace de gargalo fixado em 1Gbps, duas conexões DCCP, o atraso de propagação no enlace de gargalo em 10ms, nos experimentos de simulação. A segunda conexão DCCP inicia a transmissão no instante 50s, tempo suficiente para a primeira conexão alocar quase toda a banda disponível do enlace de gargalo. A Figura 8 apresenta os resultados da avaliação da convergência, tanto para os experimentos de simulação quanto para os de medição, para diferentes intensidades de tráfego *background*. O tempo de convergência é alto, em ambos os casos, apresentando valores entre 90s e 120s, que são, tipicamente, muito superiores ao tempo de duração médio de uma conexão na Internet. Pode-se dizer que o mecanismo de controle de congestionamento implementado pelo TFRC, mesmo produzindo altos graus de justiça, não consegue prover uma resposta rápida a divisão igualitária da banda da rede entre fluxos que competem pelo enlace. Enfatiza-se que estudos anteriores, descritos em [Bansal et al. 2001] e [Vojnovic and Boudec 2003], apontam o problema do tempo de resposta alto do mecanismo de congestionamento provido pelo TFRC, sendo este mais lento do que o observado no TCP-Reno.

## Compatibilidade com o TCP-Reno

Para avaliar a compatibilidade do protocolo DCCP com o protocolo TCP-Reno, foram realizados experimentos com dois cenários distintos. Em um deles, dois fluxos TCP-Reno, transmitindo tráfego FTP competem pela banda do enlace de gargalo e no outro um fluxo DCCP e um fluxo TCP-Reno, com o mesmo tráfego FTP do experimento anterior, competem pelo enlace de gargalo. A capacidade do enlace usada foi 1Gbps, o tempo de propagação foi de 10ms, para os experimentos de simulação. O objetivo destes experimentos é avaliar se o TCP-Reno obtém a mesma banda do enlace que seria obtida se o mesmo não estivesse concorrendo com o protocolo DCCP. Na Tabela 1, são apresentados os resultados da avaliação de compatibilidade do DCCP/TFRC com o TCP-Reno, derivados nos experimentos de simulação. A utilização do enlace para TCP-1 apresenta os valores obtidos pelo fluxo TCP, quando este concorre com outro fluxo TCP, enquanto que os resultados TCP-2 apresentam os valores obtidos pelo fluxo TCP, quando este concorre



		Tráfego Background (%)		
		0.2	0.5	0.8
Utilização do enlace (%)	TCP-1	0.0152	0.0124	0.0061
	TCP-2	0.0043	0.0031	0.0012

**Tabela 1. Taxa de utilização obtida pelos fluxos TCP (NS-2)**

		Tráfego Background (%)		
		0.2	0.5	0.8
Utilização do enlace (%)	TCP-1	0.3120	0.2210	0.1830
	TCP-2	0.1225	0.0885	0.0523

**Tabela 2. Taxa de utilização obtida pelos fluxos TCP (Linux)**

com um fluxo DCCP. Os diferentes valores de utilização observadas em ambos os fluxos TCP sugerem a incompatibilidade entre o protocolo DCCP, quando este emprega o mecanismo de controle TFRC, com o protocolo TCP-Reno, uma vez que o fluxo TCP-2 obtém uma utilização inferior a obtida pelo fluxo TCP-1.

Na Tabela 2, são apresentados os resultados da avaliação de compatibilidade do DCCP/TFRC com o TCP-Reno, para os experimentos de medição. A utilização do enlace para TCP-1 apresenta os valores obtidos pelo fluxo TCP, quando este concorre com outro fluxo TCP, enquanto que os resultados TCP-2 apresentam os valores obtidos pelo fluxo TCP, quando este concorre com um fluxo DCCP. Os diferentes valores de utilização, sugerem a incompatibilidade entre o protocolo DCCP, quando este emprega o mecanismo de controle TFRC, com o protocolo TCP-Reno, dado que no fluxo TCP-2 a utilização é inferior a obtida pelo fluxo TCP-1. As diferenças entre as utilizações obtidas pelos fluxos TCP sugerem a incompatibilidade destes com os fluxos DCCP/TFRC.

### Limitações conhecidas do TFRC

Este último grupo de experimentos realizados, apenas através de experimentos de simulação, devido às limitações de reprodução destes em cenário experimental, objetiva verificar se as limitações do TFRC em redes convencionais, apontadas em [Rhee and Xu 2007], são observadas também em redes de alta velocidade.

Em [Rhee and Xu 2007], foram apontadas algumas limitações do TFRC verificadas a partir da execução de experimentos, entre elas as diferenças de vazão obtidas por fluxos TFRC e TCP concorrentes. Esta diferença foi atribuída principalmente ao cálculo do RTO por estes protocolos, que ocasiona ocorrências de eventos de perda de pacotes distintas entre os fluxos e, conseqüentemente, taxas de transmissão distintas. Vale ressaltar que o RTO calculado pelo TCP-Reno é o valor máximo entre  $1s$  e  $RTT + 4D$ , onde  $D$  representa a variação do RTT e o RTO calculado pelo TFRC é  $4 * RTT$ . Para atrasos de propagação muito pequenos, o valor do RTO estimado pelo TFRC tende a ser menor do que o do TCP. A medida que o atraso de propagação cresce, observa-se a ocorrência inversa. Nos resultados relatados em [Rhee and Xu 2007], os fluxos TFRC e TCP apresentam um desbalanceamento nas taxas de transmissão obtidas, sendo que os fluxos TFRC possuem uma taxa de transmissão menor e uma taxa de eventos de perdas maior do que os fluxos TCP.

Adotou-se um conjunto de experimentos para redes de alta velocidade, derivado de [Rhee and Xu 2007], com o objetivo de avaliar se os pontos observados são recorrentes nessas redes. Os cenários são baseados na topologia *Dumbbell* com dois roteadores com fila *droptail*, tamanho do *buffer* de 2500 pacotes, 4 fluxos TCP e 4 fluxos DCCP, transmitindo tráfego CBR. Além disto, utilizou-se o tempo total de simulação de 900s, a capacidade do enlace de 1Gbps, o atraso de propagação no enlace de gargalo de 100ms, tráfego *background* reverso de 20% e o tráfego *background* direto constituído por um número de conexões TCP de longa duração (variando entre 50 e 400), que transmitem tráfego FTP. As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados da taxa de transmissão média obtida pelos fluxos e a taxa de eventos de perdas. Diferentemente do que foi observado em [Rhee and Xu 2007], os fluxos DCCP/TFRC obtiveram uma taxa de transmissão superior aos fluxos TCP, mesmo com uma taxa de perdas de pacotes superior a estes. Isto reforça o desbalanceamento da utilização obtida pelos fluxos. As diferenças entre os resultados apresentados neste artigo e os resultados apresentados em [Rhee and Xu 2007] devem-se às limitações do TCP-Reno em fazer uso eficiente dos recursos em enlaces de alta velocidade e ao fato de que o protocolo DCCP/TFRC, mesmo possuindo deficiências de escalabilidade, em função do aumento da banda do enlace (como visto anteriormente), possui desempenho melhor do que a do TCP-Reno nos enlaces de alta velocidade.

### **Resumo dos resultados encontrados**

Os resultados da avaliação de escalabilidade em função da variação da capacidade da banda do enlace apontam para a ineficiência do protocolo DCCP em obter o uso eficiente dos recursos disponíveis no enlace gargalo. Os resultados da avaliação de escalabilidade em função do número de conexões demonstram que o protocolo DCCP é eficiente na manutenção do equilíbrio e da justiça entre fluxos que competem pelo enlace de gargalo, em função do número de fluxos. Os resultados da avaliação de convergência indicam que o protocolo DCCP possui convergência lenta, para um estado de equilíbrio e justiça entre fluxos que disputam o enlace de gargalo. Os valores obtidos foram, em média, próximos a 100s. Os resultados da avaliação de compatibilidade entre os protocolos DCCP e TCP-Reno indicam, também, deficiências do protocolo DCCP que acarretam o desbalanceamento nas taxas de transmissão obtidas pelos fluxos de ambos os protocolos que disputam o enlace de gargalo. Os resultados da avaliação de justiça demonstram a eficiência do protocolo DCCP em garantir que diferentes fluxos DCCP possam competir, de maneira equilibrada e justa, pelos recursos do enlace de gargalo.

### **5. Conclusão**

Com o resultado da avaliação de desempenho foi possível identificar algumas deficiências do protocolo DCCP, operando com o controle de congestionamento TFRC, em redes de alta velocidade.

Para melhorar a escalabilidade em função do aumento de disponibilidade de banda, é necessário propor um mecanismo, que atue em conjunto com o TFRC, para estimar a disponibilidade de banda, a fim de garantir um aumento da taxa de transmissão dos fluxos, de modo que fiquem compatíveis com a oferta de banda passante. Para acelerar a convergência, é necessário avaliar de maneira mais detalhada as deficiências descritas em [Bansal et al. 2001] e [Vojnovic and Boudec 2003], a fim de propor melhorias no TFRC

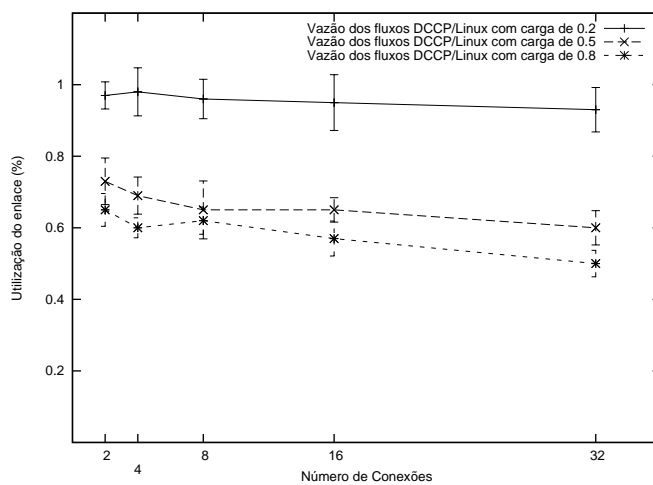
que permitam um tempo de resposta ao congestionamento mais eficiente, o que melhoraria, também, o tempo de convergência entre fluxos concorrentes.

Como trabalho futuro sugere-se investigar com mais detalhes os pontos descritos acima, assim como avaliar o real impacto das perdas de pacotes de confirmação, de forma a avaliar potenciais alterações no DCCP/TFRC.

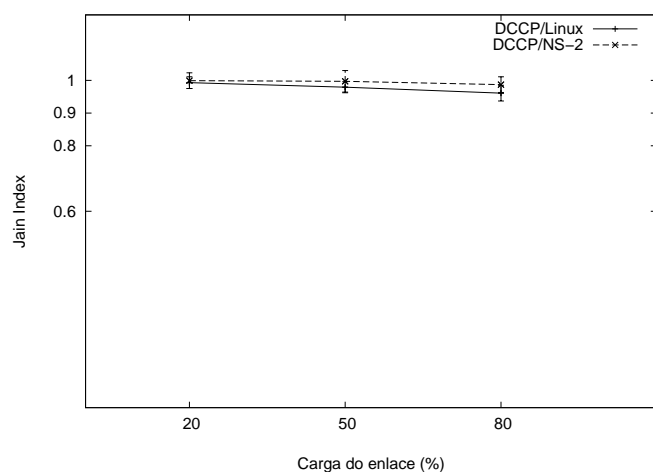
## Referências

- Bansal, D., Balakrishnan, H., Floyd, S., and Shenker, S. (2001). Dynamic behavior of slowly-responsive congestion control algorithms. In *Proceedings of ACM SIGCOMM'01*, pages 263–274, San Diego, CA.
- Floyd, S., Handley, M., Padhye, J., and Widmer, J. (2006a). Tcp friendly rate control (tfrc): Protocol specification. In *RFC 3448*.
- Floyd, S. and Kohler, E. (2006a). Profile for datagram congestion control protocol (dccp) - congestion control id 2: Tcp-like congestion control. In *RFC 4341*.
- Floyd, S. and Kohler, E. (2006b). Tools for the evaluation of simulation and testbed scenarios. In *Internet Draft: draft-irtf-tmrg-tools-05*.
- Floyd, S., Kohler, E., and Handley, M. (2006b). Designing dccp: Congestion control without reliability. In *Proceedings of ACM SIGCOMM'06*, pages 27–38, Pisa, Itália.
- G.Sawar, Lochin, E., and Boreli, R. (2007). Experimental performance of dccp over live satellite and long range wireless links. In *Proceedings of IEEE ICSIT'07*, Sydney, Australia.
- Gu, X., Di, P., and Wolf, L. (2006). Performance evaluation of dccp: A focus on smoothness and tcp-friendliness. In *Annals of Telecommunications Journal*, 61, pages 191–216.
- Ha, S., Rhee, I., and Xu, L. (2008). Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant. In *Proceedings of ACM SIGOPS*, pages 64–74.
- Iperf (2010). <http://www.noc.ucf.edu/tools/iperf>.
- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation and Modeling*. John Wiley & Sons.
- Jin, C., Wei, D., and Low, S. (2004). Fast tcp: Motivation, architecture, algorithms, performance. In *Proceedings of IEEE/ACM Transactions on Network 2006*, pages 1246–1259.
- Navaratnam, P., Akhtar, N., and Tafazolli, R. (2006). On the performance of dccp in wireless mesh networks. In *Proceedings of ACM MobiWac'06*, pages 144–147.
- Network Simulator (2010). <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- Rhee, I. and Xu, L. (2007). Limitations of equation-based congestion control. *IEEE Transactions on Network*, 15(4):852–865.
- Takeuchi, S., Koga, H., Iida, K., Kadobayashi, Y., and Yamaguchi, S. (2005). Performance evaluations of dccp for bursty traffic in real-time applications. In *Proceedings of IEEE SAINT'05*, pages 142–149.

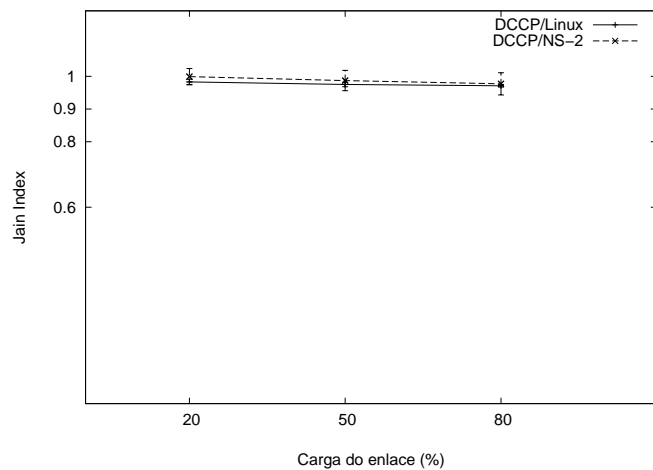
- Traffic Control HOWTO (2010). <http://tldp.org/howto/traffic-control-howto/index.html>.
- Vojnovic, M. and Boudec, J. L. (2003). On the long run behavior of equation-based rate control. In *Proceedings of ACM SIGCOMM'02*, pages 103–116.
- Wei, D. X., Cao, P., and Low, S. H. (2005). Time for a tcp benchmark suite? (<http://www.cs.caltech.edu/weixl/research/technical/benchmark/summary.ps>).



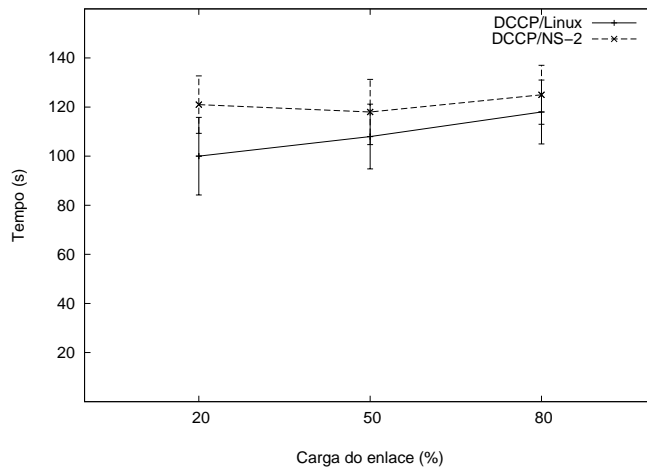
**Figura 5. Utilização do enlace em função do número de conexões (Linux)**



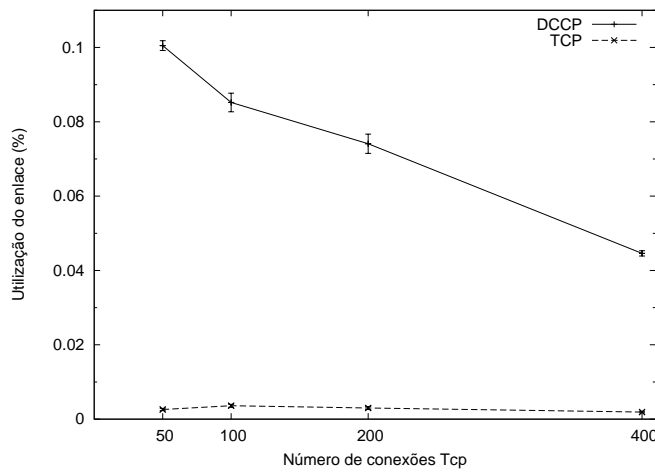
**Figura 6. Primeiro Cenário de Justiça**



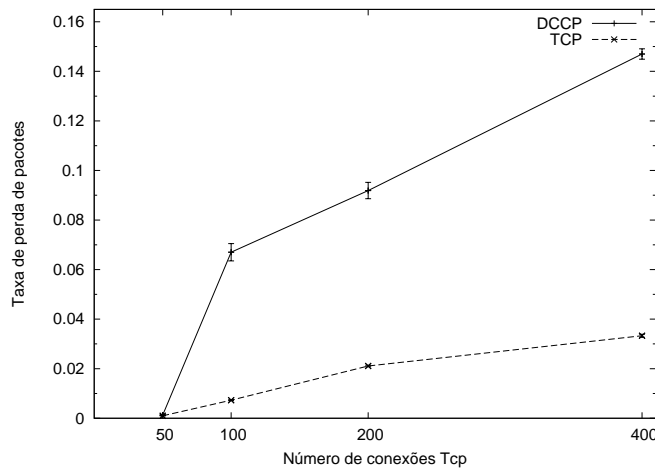
**Figura 7. Segundo Cenário de Justiça**



**Figura 8. Resultados da avaliação da convergência**



**Figura 9. DCCP/TFRC x TCP-Reno (Vazão)**



**Figura 10. DCCP/TFRC x TCP-Reno (Perdas)**