

Capítulo 1

Introdução

“Controle de congestionamento está relacionado a como usar a rede da forma mais efetiva quanto possível. Atualmente as redes estão super equipadas e a pergunta mudou de *como eliminar o congestionamento da rede?* para *como utilizar de forma eficiente toda a capacidade disponível da rede?*” (Michael Welzl)

Ainda acho que
deixe parecer
melhorar
isso!

A transmissão de conteúdos multimídia em tempo real através da Internet tornou-se uma necessidade em aplicações como Voz sobre IP (VoIP), Videoconferência, Jogos e WebTV. Aplicações deste tipo implementam mecanismos sofisticados para melhorar a qualidade dos fluxos de dados e utilizar de forma eficiente os recursos disponíveis da rede. Na prática, tais mecanismos são implementados em forma de protocolos de rede com o intuito de: (i) reduzir altos níveis de congestionamento na rede; (ii) manter a equidade entre diferentes fluxos transmitidos pelos sistemas finais; e (iii) garantir níveis mínimos de qualidade do conteúdo multimídia sendo transmitido.

Aplicações como as supracitadas estão ganhando cada vez mais espaço, principalmente na Internet. Para se ter uma idéia deste crescimento, segundo previsão da empresa Cisco [11], em 2014 o tráfego de video será maior do que o tráfego de redes entre pares (P2P) ou ~~Peer-to-Peer~~ em 2009, correspondendo a 39 % do tráfego de dados total na Internet. A empresa prevê também que em 2014, o tráfego de VoIP, video e jogos na Internet alcançará a marca de 40 Exabytes/mês, quase 50 % do tráfego de dados total na Internet previsto para 2014. Embora já se saiba o potencial do modelo de serviço P2P, esta previsão demonstra o nível de

aceitação dos usuários em compartilhar seus arquivos e obter mais dados disponibilizados por outros usuários. Recentemente, a Paramount Pictures publicou uma nota [5] informando que passará a transmitir filmes através de grandes redes P2P, tais como a BitTorrent. A própria empresa BitTorrent anunciou que está trabalhando em uma aplicação P2P para transmissão de conteúdos multimídia em tempo real. Já a Amazon anunciou que também entrará na disputa por uma fatia deste tipo de serviço [1]. A empresa disponibilizará um reprodutor de conteúdo multimídia completamente *online*, onde as pessoas poderão comprar músicas e vídeos e em seguida reproduzi-los em tempo real, com os dados armazenados na infraestrutura de computação nas nuvens [?] da empresa.

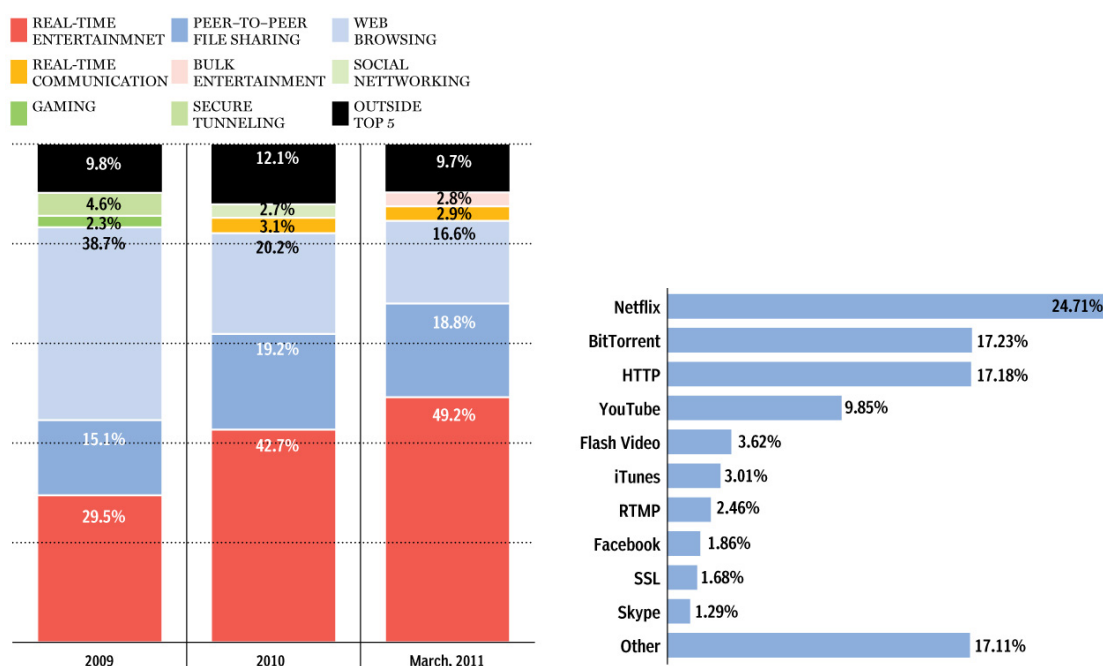
Seguindo a tendência das previsões e dos exemplos citados anteriormente, é notório o crescimento de serviços na Internet para distribuição de conteúdos multimídia, sejam serviços onde as empresas disponibilizam os conteúdos totalmente online, como a Netflix [?], famosa por transmitir canais de TV e filmes *online*, sejam os casos em que os próprios usuários disponibilizam tais conteúdos a partir de suas próprias residências. Para este último caso, sites *online*, como o *livestream.tv*, estão se popularizando cada vez mais ao permitirem que os usuários ou empresas transmitam conteúdos multimídia a partir de seus computadores para milhares de usuários conectados à Internet, seguindo o modelo de serviço cliente-servidor [?].

No contexto desse tipo de aplicação, o que preocupa é o crescimento acentuado do consumo de recursos computacionais de rede resultante principalmente das estratégias e protocolos de rede adotados para distribuir os conteúdos multimídia produzidos por grandes empresas, como Netflix e Google. No final do primeiro semestre de 2011, um artigo [?] publicado no *Financial Post* chamou atenção ao anunciar momentos de grandes congestionamentos na Internet nos próximos anos. Destacou-se a empresa Netflix como sendo a maior consumidora de banda de rede da América do norte, respondendo por 29,7 % de todas as informações transferidas durante o horário de pico de uso da Internet por norte-americanos em março de 2011, ultrapassando até mesmo a rede BitTorrent de compartilhamento de arquivos. “A questão é que se não fosse a Netflix, teria sido a Amazon, se não fosse a Amazon teria sido o Google, mas o verdadeiro e iminente problema de congestionamento da rede começará quando todos passarem a fazer isto.”, afirmou Colin Gillis, analista sênior de tecnologia da BGC Partners [?]. Serviços como os da Netflix estão se mostrando extremamente

→ Este fogar a referência no meio da frase!

populares entre os consumidores, em menos de 8 meses de funcionamento da Netflix no Canadá a empresa já possuía mais de 800.000 clientes, representando cerca de 10 % das famílias canadenses com conexões de banda larga.

Essa discussão se generaliza em um relatório [?] publicado pela empresa de consultoria Sandvine, que menciona que “com o rápido sucesso da Netflix, os provedores de Internet em todo o mundo devem se preparar para um futuro em que vídeo sob demanda e em tempo real estará sendo disponibilizado em grandes proporções, podendo ser responsável pela maior fatia do tráfego de dados na Internet”. Segundo o relatório, serviços em tempo real de entretenimento, que inclui Netflix e Youtube, foram responsáveis por quase metade (49,2 %) de todo o tráfego Internet na América do Norte (Figura 1.1) no primeiro trimestre de 2011. Estima-se que esse número alcance 60 % até o final de 2011 e “o fato é que o volume de tráfego na Internet cresce exponencialmente e o congestionamento da rede vai só piorar. As pessoas sabem o que está acontecendo, mas eu acho que está acontecendo mais rápido do que elas esperavam.”, comentou Tom Donnelly, vice-presidente da Sandvine.



(a) Tráfego de Internet em redes de acesso de banda larga. (b) Percentual de consumo de bytes transmitidos e recebidos por aplicação.

Figura 1.1: Perfil de Tráfego de Rede Norte Americano durante o horário de pico.

Diante deste cenário, desenvolver protocolos de rede para transportar dados desse tipo de aplicação e dar suporte a estas novas formas de fornecer serviços multimídia através da Internet ~~tem se tornado uma tarefa~~ ainda mais complexa. Exige-se uma harmonia entre os requisitos mencionados anteriormente em meio às mudanças no consumo de conteúdos multimídia, nas estratégias adotadas pelos fornecedores de conteúdos para distribuí-los entre os diversos clientes e na disponibilidade de recursos de rede que nem sempre são utilizados de forma eficiente.

~~***~~ Ao longo dos anos, diversos esforços acadêmicos e da indústria foram feitos para disponibilizar protocolos e sistemas de transmissão para distribuição de conteúdo em tempo real na Internet [?; ?; ?; ?; ?; ?]. Porém, estas soluções são isoladas levando a uma baixa adoção na prática devido a falta de padronização, principalmente por serem implementadas na camada de aplicação. Esta prática causa uma pulverização de diferentes soluções e nenhuma realmente efetiva para ser utilizada em larga escala, como na Internet. Em geral, as soluções existentes tentam suprir as limitações existentes dos protocolos da camada de transporte, porém, salvo suas devidas contribuições científicas e reais, tratam-se de soluções complementares e não fundamentais para uma forma efetiva e padronizada de se transportar e distribuir dados multimídia nas redes de computadores. Avaliando este cenário, é premissa no contexto deste trabalho que soluções mais efetivas no uso de recursos da rede e principalmente em sua adoção sejam realizadas na camada de transporte e não na camada de aplicação, o que será discutido em mais detalhes a seguir.

Do ponto de vista da camada de transporte da pilha TCP/IP, protocolos tradicionais como o UDP (*User Datagram Protocol*) e o TCP (*Transmission Control Protocol*) não foram projetados para fins de distribuição de conteúdos multimídia ~~nos moldes discutidos até aqui~~. Ao utilizar o UDP, largamente adotado na Internet em aplicações multimídia, os desenvolvedores das aplicações devem implementar seus próprios mecanismos para controle de congestionamento de datagramas sem garantia de entrega, o que raramente é feito. Nos casos em que se tenta utilizar TCP em aplicações multimídia em tempo real, o mesmo não apresenta um desempenho satisfatório porque implementa garantia de entrega com retransmissão de dados perdidos, uma forma não adequada para aplicações multimídia com transporte de dados em tempo real [?; ?; ?], resultando em uma má utilização dos canais de transmissão de rede quando se considera a categoria de aplicações estudadas neste trabalho.

→ N
→ N
Ou outra
denominação

Os cenários de aplicação mais críticos do ponto de vista da ineficiência de utilização de recursos de rede e no contexto deste trabalho são aqueles que apresentam um nó de rede gerador de conteúdo e milhares de nós receptores, estabelecendo portanto uma relação $1 \rightarrow n$. Tais aplicações compartilham uma característica comum: a existência de muitos usuários interessados por um mesmo conteúdo e pouco ou nenhum dado individualizado, ou seja, que precisa ser transmitido apenas para um usuário ou um grupo restrito deles. Existem diversos exemplos de aplicações que podem ser citados, principalmente quando se utiliza o modelo de serviço P2P:

- aplicações para transmissão de conteúdo multimídia em tempo real de um nó da rede para um outro, ou para um conjunto de nós. Por exemplo, sites *online* como o *live-stream.tv*, *ustream.tv* e *streamtheworld.com* permitem que um usuário transmita conteúdos multimídia do seu computador para milhares de outros usuários conectados à Internet. Soluções de distribuição de conteúdos multimídia em tempo real providas por empresas como a Netflix e Youtube também se enquadram nesta categoria;
- aplicações de telefonia IP, tais como o Skype, principalmente considerando o modo de conversa em grupo;
- TV *Online*, por exemplo, transmissões através da Internet de jogos da copa do mundo ou do campeonato brasileiro de futebol. A rede Globo de Televisão já possui aplicações experimentais para este fim, e;
- jogos e rádios *online* e videoconferência 1-para-muitos, típicos na Internet.

Do ponto de vista de pesquisa acadêmica, existem alguns desafios para o desenvolvimento de aplicações ~~e engenharia de software para aplicações~~ de rede nesses cenários, tais como: (i) permitir que fluxos multimídia convivam com fluxos de dados de aplicações elásticas [?] sem que estes últimos sejam degradados pelos primeiros – vasta utilização do protocolo TCP; e (ii) evitar perdas excessivas de dados por parte das aplicações multimídia em questão, pois, neste caso, não faz sentido retransmitir dados quando estes são perdidos devido ao comportamento transiente dos fluxos de dados desse tipo de aplicação.

Para viabilizar a utilização de cenários como os apresentados anteriormente, deve-se abordar problemas relacionados ao gerenciamento de conexão multi-ponto, incluindo su-

Isso não viria antes? vir ***

precisa ser aqui?

porte a conexões partindo de diferentes redes e entre uma fonte transmissora e múltiplos receptores interessados no fluxo multimídia ($1 \rightarrow n$); controle de congestionamento na rede, incluindo aspectos de compartilhamento equânime do canal entre os diversos fluxos de dados e de forma padronizada; adaptação de fluxo multimídia e qualidade de serviço; segurança; dentre outros.

O modelo de serviço de rede mais adequado para abordar soluções de distribuição de conteúdos multimídia multi-ponto é o modelo entre pares (P2P). As tecnologias baseadas no modelo de serviço P2P estão substituindo a arquitetura tradicional cliente-servidor nesse contexto porque alivia a carga imposta aos servidores e aos canais de transmissão das redes. Nesta arquitetura, cada participante do sistema pode obter o serviço de visualização da mídia e também contribuir com outros participantes, fornecendo parte do conteúdo da mídia. Assim, a banda de rede necessária em um único ponto no modelo cliente-servidor é compartilhada entre os diversos participantes do sistema [?]. Assim, determina-se o primeiro elemento fundamental neste trabalho, o uso do modelo de serviço P2P em uma solução a ser proposta para o transporte de conteúdos multimídia considerando a classe de aplicações supracitadas. A seguir, discute-se sobre a escolha do protocolo de transporte mais apropriado, considerando-se o segundo elemento fundamental em uma efetiva e padronizada solução para distribuição de conteúdo multimídia em larga escala, especialmente na Internet.

1.1 Panorama Atual: Protocolos de Transporte da Internet

Atualmente, as principais propostas de protocolos de transporte de dados para Internet são o TCP, o UDP e o recém padronizado DCCP (*Datagram Congestion Control Protocol*) [9; 10]. Quando se projeta um protocolo de rede para transporte de dados nos cenários discutidos anteriormente, deve-se levar em consideração as características da aplicação para que se possa obter resultados significativos na qualidade do fluxo de dados multimídia sendo transmitido e na eficiente utilização dos recursos da rede. Porém, nota-se que os protocolos da camada de transporte existentes são limitados com vista aos cenários de distribuição de conteúdo $1 \rightarrow n$ envolvendo suporte a controle de congestionamento.

O protocolo UDP tem sido largamente utilizado em aplicações multimídia em tempo real por ser um protocolo simplificado, fazendo uso apenas do serviço de melhor esforço do IP

para transmitir dados na Internet. Com o passar dos anos e antes do DCCP, o UDP se tornou a primeira e única opção para transmissão de dados multimídia em tempo real, porém gerando diversos efeitos colaterais nas grandes redes, os quais são discutidos a seguir e com vastas referências na literatura [4; 3; 2; ?; ?; ?].

Para se ter uma idéia dos efeitos colaterais gerados na rede com o uso do UDP, observe o gráfico *vazão* \times *tempo* ilustrado na Figura 1.2. Este gráfico corresponde a um tratamento realizado com a transmissão de 1 fluxo TCP competindo com 3 fluxos de áudio UDP em uma rede *Ethernet* de 100 *Mbps*. Observe que o UDP sempre ocupa o máximo da largura de banda disponível na rede ao passo que não oferece chances para outros fluxos utilizarem o canal, como é o caso do TCP. Por este motivo, o UDP sempre se apresenta com altas taxas de perda de pacotes, sobretudo quando há congestionamento na rede. No caso deste tratamento, nos primeiros 50 s, quando não disputava com nenhum outro fluxo, o fluxo TCP utilizou a rede de forma satisfatória, alcançando uma vazão em torno de 20 *Mbps*. Entretanto, após esta fase, quando os três fluxos UDP foram transmitidos na rede, a vazão do fluxo TCP reduziu praticamente para 0 (zero), permanecendo assim até o final do tratamento.

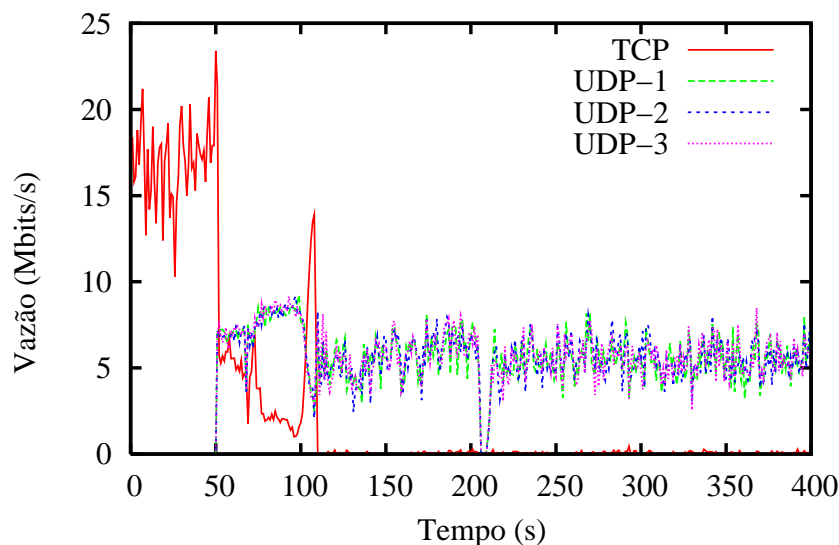


Figura 1.2: TCP \times UDP. Após 50 s do início do experimento, o fluxo UDP ocupa toda a largura de banda disponível na rede. *[ref]*

O protocolo TCP, por sua vez, atende de forma satisfatória as aplicações que toleram atrasos na entrega de dados e que exigem que estes sejam todos entregues corretamente e em ordem (aplicações elásticas). Porém, em se tratando de transporte de dados multimídia

em tempo real, o TCP se torna o protocolo menos apropriado para este fim, pelo menos comparando-o com o UDP e o DCCP. Nas aplicações de fluxo multimídia em tempo real, é preferível manter o fluxo de dados e reproduzir o conteúdo que chega a esperar que a informação perdida seja retransmitida, mesmo diante do fato de que parte dos dados da aplicação tenha sido perdida. Ao utilizar o TCP, isto não é possível. O principal motivo é que o TCP implementa entrega confiável de dados adotando a abordagem de retransmitir qualquer dado perdido. Esta estratégia resulta em atrasos indesejáveis quando se trata de transmissão de dados multimídia em tempo real, fazendo com que o usuário perceba interrupções na reprodução do conteúdo.

Em condições de congestionamento na rede, o atraso fim-a-fim aumenta e conseqüentemente degrada a qualidade do conteúdo multimídia sendo transmitido. Esta situação se agrava com a retransmissão de pacotes perdidos e que podem não fazer mais sentido para a aplicação receptora devido ao comportamento transiente dos fluxos multimídia, em particular os transmitidos em tempo real. Neste caso, se os pacotes de dados retransmitidos não alcançarem o receptor até um determinado instante, estes serão descartados ao preço do desperdício no uso dos recursos da rede, pois *buffers* dos roteadores são alocados para processar e repassar pacotes que terminam sendo inúteis às aplicações.

O comportamento do TCP para situações como a mencionada anteriormente pode ser observado no gráfico ilustrado na Figura 1.3. No tratamento realizado, transmitiu-se um áudio com duração de 100 s, sendo armazenado no destino e em seguida comparado com o original. Neste caso, constatou-se que apenas 32 % do áudio alcançou o destino, fato ocorrido devido ao excesso de retransmissões de pacotes que foram perdidos na rede quando considerados fluxos TCP disputando com fluxos UDP e a rede apresentando altos níveis de congestionamento.

Com apenas essas duas opções para transporte de dados na Internet e objetivando promover melhorias nos serviços oferecidos pelas aplicações multimídia, a IETF (*Internet Engineering Task Force*) aprovou a especificação do protocolo DCCP para transporte de dados multimídia para Internet. É um protocolo orientado à conexão, não garante entrega e nem ordenação dos dados transmitidos, todavia, o DCCP implementa controle de congestionamento para transmissão não-confiável de fluxo de dados [3].

O DCCP herda do TCP as características de ser orientado à conexão e fornecer controle

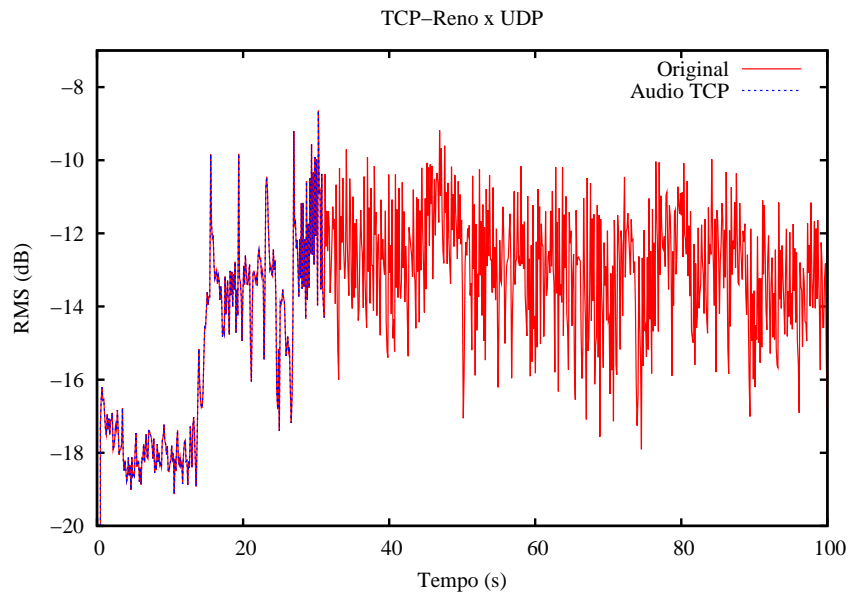


Figura 1.3: TCP Reno \times UDP, sendo o TCP enviando um arquivo de áudio. {ref}

de congestionamento. Do UDP, o DCCP herda as características de não garantir entrega e nem ordenação dos dados transmitidos. Além destas características, no DCCP foram adicionados dois conceitos novos: a escolha tardia de dados [?; ?] e um arcabouço para gerenciamento dos algoritmos de controle de congestionamento de forma modular. A escolha tardia de dados permite a mudança de dados de um pacote mesmo depois que estes dados já tenham sido enviados para a camada de transporte, mas ainda não tenham sido enviados através da rede - isto é uma alternativa ao mecanismo de retransmissão do TCP. Já o arcabouço de gerenciamento de algoritmos de controle de congestionamento permite adicionar novos algoritmos de controle de congestionamento à aplicação e substituí-los mesmo que uma conexão DCCP já tenha sido estabelecida.

Para entender as melhorias providas pelo protocolo DCCP, considere o gráfico *vazão \times tempo* apresentado na Figura 1.4. Neste gráfico, ilustram-se os comportamentos dos protocolos TCP e DCCP quando utilizados para transmissão de um arquivo e de um conteúdo multimídia, respectivamente. A partir do gráfico, é possível constatar que os protocolos TCP e DCCP compartilham entre si a largura de banda disponível, onde cada fluxo consegue transmitir dados na rede. Note que o comportamento do protocolo TCP para os 50 s iniciais

foi similar ao confronto TCP \times UDP (Figura 1.2). Porém, diferentemente do que ocorreu naquele caso, após os primeiros 50 s dos confrontos TCP \times DCCP, a vazão do protocolo TCP continuou sendo satisfatória, assim como a do DCCP.

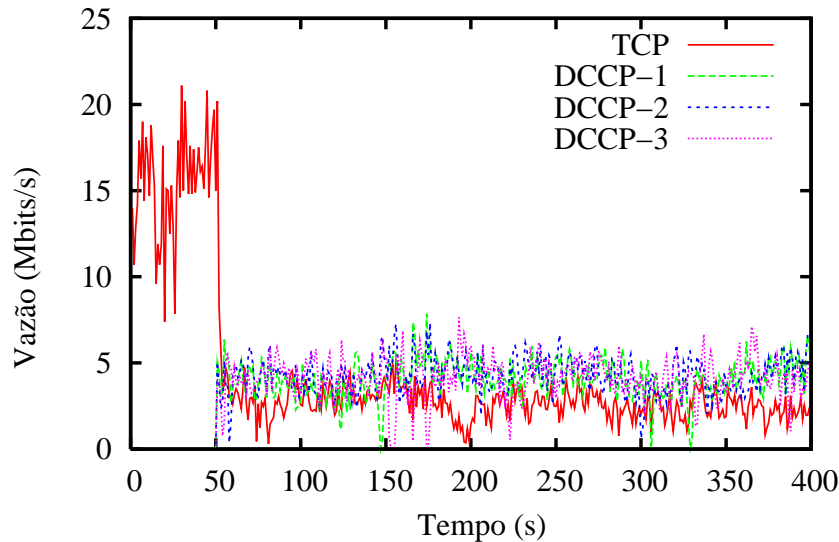


Figura 1.4: TCP \times DCCP. Ambos os protocolos conseguem transmitir dados na rede.

(Ref)

Para transmissões de dados multimídia em redes de computadores, onde satisfazer os requisitos de tempo pode definir o nível de qualidade da transmissão multimídia, o DCCP pode melhorar a qualidade do fluxo multimídia e ainda resolver diversos problemas de congestionamento da rede, como os causados por retransmissões desnecessárias de pacotes feitas pelo protocolo TCP ou por problemas de excessiva perda de pacotes e altos níveis de congestionamento da rede quando se utiliza o protocolo UDP. Estudos anteriores realizados no contexto deste trabalho [?; ?; ?] e outros publicados por terceiros [?; ?; ?; ?; ?; ?] constataam que a utilização do protocolo DCCP tem trazido diversas vantagens na transmissão de fluxos multimídia, apresentando-se como uma opção efetiva a ser adotada para transmissão de dados multimídia, principalmente por ter um comportamento similar ao protocolo TCP e padronizado pela IETF.

Sendo assim, a motivação para a definição do DCCP está relacionada com as características intrínsecas das aplicações com restrição de tempo de resposta e no fato de que grande parte desse tipo de aplicação utiliza o UDP. Considerando os problemas e limitações dos protocolos TCP e UDP discutidos até aqui e os cenários de aplicações considerados neste trabalho, o DCCP foi projetado para atender as necessidades das aplicações multimídia com

suporte a controle de congestionamento, evitando assim um colapso de congestionamento na Internet.

Pelo exposto, o protocolo DCCP aparece como o protocolo de transporte mais adequado a ser utilizado em uma solução para distribuição de forma padronizada de conteúdos multimídia em larga escala na Internet. Com isto, elimina-se o uso do protocolo UDP em aplicações multimídia e consequentemente diminui-se o tráfego de dados na rede sem controle de congestionamento, ao passo que compartilha-se efetivamente os canais de transmissão com fluxos TCP cujas aplicações (*Web*, *E-mail* etc.) correm o risco de tornarem-se inutilizáveis devido ao iminente e inevitável crescimento do uso de aplicações multimídia baseadas em UDP, como foi discutido anteriormente.

Portanto, é nesse contexto de desenvolvimento de soluções de software para viabilizar transmissão de conteúdos multimídia da classe de aplicações de rede $1 \rightarrow n$ que se insere esse trabalho, motivado pelo grande interesse de pesquisa, indústria e mercado em evoluir o estado da arte das soluções para transporte de conteúdos multimídia em larga escala com suporte a controle de congestionamento, especialmente na Internet.

Isso não é aqui!

1.2 Descrição do Problema

Apesar da eficiência do DCCP em alguns cenários de transmissão de dados multimídia na Internet, o mesmo possui falhas críticas quando utilizado em larga escala em cenários $1 \rightarrow n$. Além disso, ao longo dos anos o uso de outros protocolos de transporte para a Internet tem se mostrado pouco efetivo na prática para a distribuição de conteúdos multimídia em tempo real, tal como o uso do UDP ou diversas outras propostas não padronizadas [?; ?; ?; ?; ?], acentuando a motivação em se desenvolver pesquisas nesse contexto. Isto tem ocorrido porque as soluções existentes sempre se apresentam de forma independente uma das outras e sem qualquer preocupação com sua facilidade de implantação em larga escala.

O que ocorre é que o DCCP é um protocolo orientado à conexão e portanto para cada novo usuário interessado em receber um fluxo multimídia transmitido com DCCP uma nova conexão se faz necessária. As consequências desta limitação do DCCP são desastrosas, tornando-o um protocolo paradoxal para o que foi proposto, ou seja, resolver os problemas de congestionamento de rede gerados pelo protocolo UDP em cenários de aplicações mul-

Em outras palavras, DCCP propõe-se a

timídia, porém, quando utilizado em cenários $1 \rightarrow n$, o protocolo não funciona devido aos seguintes motivos:

1. *excessivo consumo de recurso computacional*: para cada nova conexão, o nó transmissor deve alocar recursos computacionais (memória e processamento) para tratar cada nova conexão. Em cenários de transmissão multimídia $1 \rightarrow n$, se muitos nós estão conectados em um único servidor, então isto elevará sobremaneira o consumo de recurso computacional do nó transmissor proporcionalmente à quantidade de nós receptores interessados pelo fluxo multimídia transmitido. Além disso, embora o conteúdo transmitido por um nó seja de interesse de muitos outros nós, os fluxos são enviados independentemente uns dos outros, o que gera duplicações desnecessárias e conseqüentemente desperdício de recursos de rede.
2. *a taxa de transmissão de fluxos DCCP individualmente tenderá a 0 (zero)*: O protocolo DCCP realiza controle de congestionamento utilizando uma equação matemática para definir a taxa de transmissão de uma conexão. À medida que mais nós se conectam a um nó transmissor, menor será a taxa de transmissão do nó transmissor para cada um dos nós receptores conectados a ele. Para a rede, esta estratégia é equânime e evita que a mesma entre em colapso de congestionamento, mas para cada fluxo de dados isto é ruim. Este problema tem uma relação estreita com o dilema observado por Garrett Hardin em 1968 e denominado de *Tragédia dos Comuns* [6], apresentando-se em diferentes áreas do conhecimento. No caso deste trabalho, a tragédia dos comuns ocorre porque à medida que novos fluxos são transmitidos na rede, menor será a taxa de transmissão individual de cada fluxo, a qual pode se tornar insuficiente para a recepção de um fluxo multimídia e, por consequência, nenhum nó receptor reproduzirá o fluxo transmitido pelo nó transmissor, embora todos os fluxos terão possibilidades semelhantes sobre o uso do canal.

Sendo assim, apesar dos algoritmos de controle de congestionamento serem corretos visando o caso do melhor global (equidade para com todos os fluxos e assim evitar congestionamento da rede), isto provoca o efeito do caso do pior local (redução da taxa de recepção de cada nó da rede).

Este fato pode ser explicado analiticamente utilizando como base a Equação 1.1, que define cada taxa de transmissão X_i calculada pelo DCCP¹ durante a transmissão de dados para realizar o controle de congestionamento em cada conexão. Nesta equação, X_i é a taxa de transmissão em bytes/segundo, s é o tamanho do pacote em bytes, R é o RTT (*Round Trip Time*) em segundos, p é a taxa de ocorrência de perdas, entre 0 e 1, RTO (*Retransmission TimeOut*) é o valor do temporizador de retransmissão do TCP em segundos e b é igual a 1 e representa o número máximo de pacotes confirmados por um único ACK.

Considerando o problema descrito anteriormente, o uso total do canal por N fluxos DCCP pode ser definido por $B = \sum_{i=1}^N X_i$. Em condições severas de congestionamento na rede, o valor de B é equivalente à largura de banda do canal de transmissão. Quando isto ocorre, tem-se que N atingiu um valor maior do que a rede suporta, fazendo com que os *buffers* de recepção dos roteadores alcanssem seus limites e portanto os valores de p e R na Equação 1.1 também aumentam, resultando que o $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{B}{N} = 0$, logo, X_i se aproxima de 0 (zero).

$$X_i = \frac{s}{R \times \sqrt{2 \times b \times \frac{p}{3}} + (RTO \times 3 \times \sqrt{3 \times b \times \frac{p}{8}} \times p \times (1 + 32 \times p^2))} \quad (1.1)$$

Embora esta seja uma discussão teórica sobre o principal problema tratado neste trabalho, também foram realizadas ~~pesquisas~~ ^{experimentos} em busca de evidências mais contundentes de que este fato ocorre na prática [?]. Foram executadas simulações de rede no NS-2 [?] cuja topologia da rede foi definida como uma árvore binária completa. Neste caso, cada nó da árvore represent ^{um} roteador e cada roteador tinha 10 nós DCCP receptores conectados a ele (Figura 1.5). Cada tratamento (cenário) foi definido como sendo um nível da árvore binária. Por exemplo, o primeiro tratamento tinha 10 nós receptores e 1 roteador, pois o nível da árvore L foi igual a 0 (zero); no tratamento seguinte utilizou-se 30 nós receptores e 3 roteadores, pois $L=1$; no tratamento seguinte utilizou-se 70 nós receptores e 7 roteadores, pois $L=2$; e assim por diante até $L=9$, quando utilizou-se 10.230 nós receptores e 1.023 roteadores (utiliza-se $n = 2^{L+1} - 1$ para se obter a quantidade n de roteadores dado um nível L da topologia de rede utilizada). A transmissão ocorreu da seguinte forma: um nó localizado na raiz da árvore

¹Essa equação é utilizada no DCCP pelo algoritmo para controle de congestionamento chamado de CCID-3 (*Congestion Control Identifier 3*). Para efeito de estudo, esta equação foi a escolhida, porém qualquer equação adotada em outros algoritmos para controle de congestionamento poderia ter sido utilizada.

transmitiu o mesmo conteúdo multimídia para todos os outros nós conectados à rede, simulando uma típica transmissão multimídia $1 \rightarrow n$ e um tráfego de comportamento equivalente a VoIP. Em cada tratamento foram estudadas duas variáveis: a perda de dados e a taxa de transmissão de cada conexão DCCP partindo do nó raiz até cada nó receptor. As simulações de cada tratamento foram repetidas a quantidade de vezes necessária até se alcançar uma média com nível de confiança de 95% para cada variável estudada de acordo com o método estatístico descrito no Capítulo 6 deste documento.

Os resultados obtidos com as simulações dos tratamentos descritos anteriormente estão ilustrados no gráfico da Figura 1.6. Nas abscissas do gráfico representa-se o número de nós receptores para cada tratamento, ao passo que nas ordenadas representa-se a taxa de transmissão média conseguida por cada conexão DCCP e em cada ponto marcado no gráfico representa-se a percentagem de perda de dados em cada conexão DCCP.

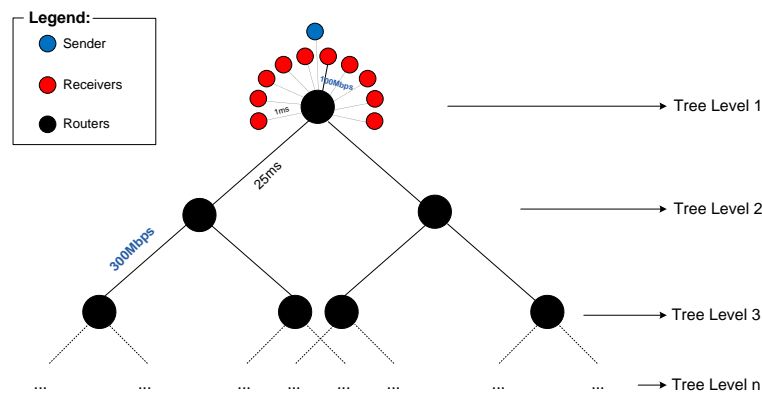


Figura 1.5: Topologia da rede definida para as simulações realizadas. Cada rede é representada por um roteador e com 10 nós em cada rede.

É possível observar no gráfico apresentado na Figura 1.6 que a vazão média de cada fluxo DCCP transmitido aos receptores tende a 0 (zero) à medida que o número de receptores aumenta, sendo possível concluir que o protocolo DCCP não escala quando utilizado para transmissão de dados multimídia em cenários de aplicações com um transmissor transmitindo para vários receptores ($1 \rightarrow n$).

Uma questão intrigante neste aspecto é que o protocolo DCCP funciona perfeitamente em cenários simplórios, mas sofre claramente de um problema de escalabilidade, o que é crítico para aplicações consideradas neste trabalho, as quais não podem continuar utilizando

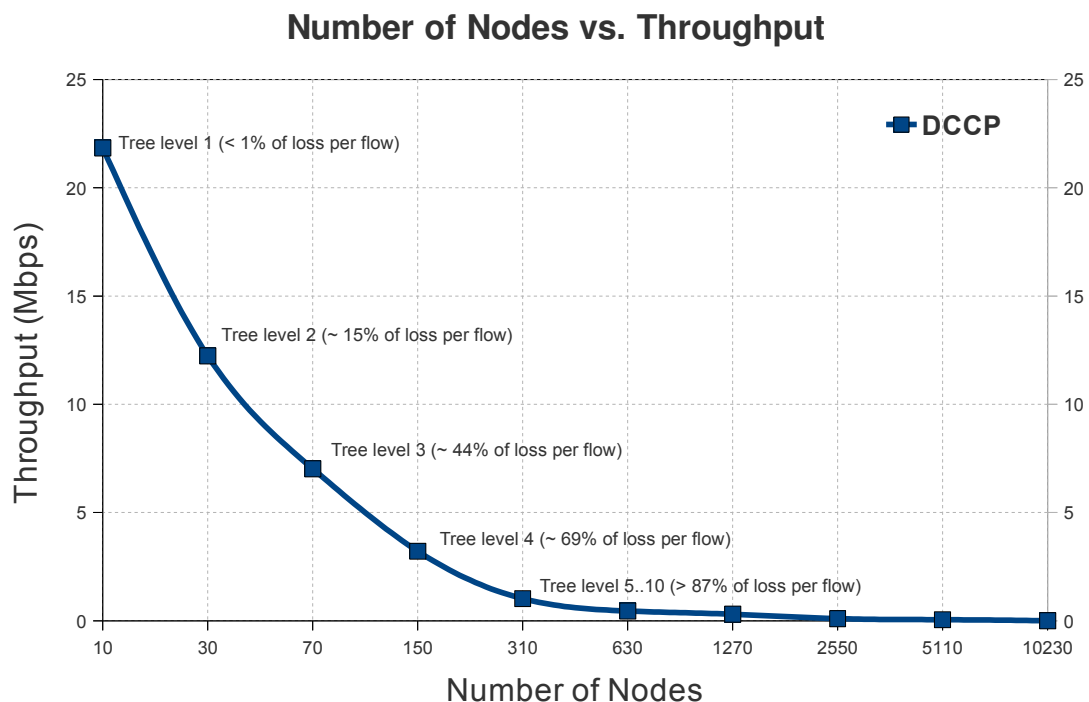


Figura 1.6: Gráfico para uma transmissão DCCP com um transmissor enviando dados de áudio VoIP utilizando o protocolo DCCP. Nota-se que a vazão média de cada fluxo tende a 0 (zero) à medida que o número de nós receptores aumenta.

protocolos como o UDP pelos efeitos colaterais causados por este. Isto torna o protocolo DCCP inútil para cenários de distribuição de conteúdo multimídia, fazendo com que os desenvolvedores continuem sem motivações para efetivamente utilizar o protocolo DCCP em suas aplicações.

Note que apenas fluxos DCCP foram transmitidos neste tratamento, os quais já foram necessários para causar o problema em questão. Em situações mais realistas, o problema se torna ainda mais grave, pois o protocolo DCCP disputará o canal não apenas com outros fluxos DCCP, mas também com fluxos de protocolos tradicionais, como o TCP e UDP, além de outros protocolos modernos, como o SCTP [?; ?; ?].

~~Embora foi possível constatar o problema na prática, é premissa deste trabalho a busca sempre por soluções padronizadas para uma efetiva adoção na Internet. Desta forma, considera-se como melhor opção utilizar como base o protocolo DCCP e fornecer soluções viáveis para este problema a continuar utilizando o protocolo UDP em transporte de~~

~~conteúdos multimídia, ou ainda, soluções não padronizadas que ao longo de vários anos se mostraram inviáveis ou com baixa adoção na prática.~~

~~De forma geral,~~ apesar do protocolo DCCP ter sido utilizado para evidenciar o problema trazido à tona neste trabalho e assim apresentar resultados concretos, esta discussão pode ser generalizada em direção a qualquer outro protocolo de rede que seja orientado a conexão e que suporte mecanismos para controle de congestionamento de fluxos não confiáveis de dados. A fim de aumentar a representatividade de protocolos nesse contexto, o leitor pode consultar mais referências nos trabalhos disponíveis em [?; ?; ?; ?; ?; ?; ?; ?] e no Capítulo 3 deste documento.

Assim, até o presente momento, os desenvolvedores de aplicações multimídia não tem outra opção a não ser continuar utilizando o protocolo UDP, porém ao custo do que já foi discutido anteriormente, ou seja, gerando congestionamentos na rede e degradando outros fluxos de dados controlados, como os transmitidos pelo TCP, gerando um impacto negativo no tráfego das grandes redes de computadores, como já foi discutido anteriormente.

Diante do exposto e buscando melhorar a qualidade dos fluxos de dados multimídia transmitidos nas redes de computadores, em particular em larga escala na Internet, pretende-se responder a seguinte questão de pesquisa: *como transportar dados multimídia para distribuição de conteúdos em topologias de rede $1 \rightarrow n$ com suporte a controle de congestionamento, mas evitando o fenômeno da tragédia dos comuns e de forma padronizada?*

Observando esta questão que deu origem às pesquisas desenvolvidas neste trabalho, propõe-se a seguinte tese de doutorado:

O controle de congestionamento baseado na combinação do modo de transmissão multicast com o compartilhamento de múltiplos fluxos unicasts entre pares (P2P) realizado na camada de transporte da pilha TCP/IP possibilita a distribuição padronizada de conteúdos multimídia em cenários de aplicações $1 \rightarrow n$.

Conversamos!

1.3 Objetivos da Tese

1.3.1 Objetivo Principal

Neste trabalho, tem-se como objetivo principal a concepção e o desenvolvimento de um protocolo de rede de computadores para transporte de fluxos de dados controlados e não confiáveis para a distribuição de conteúdo multimídia em tempo real em cenários $1 \rightarrow n$. Mais especificamente, propõe-se a especificação e o desenvolvimento de um protocolo para a classe de aplicações apresentadas, validando-o através de experimentações e simulações com um conjunto de ferramentas para dar suporte ao desenvolvimento de aplicações nesse contexto, assim como promovendo ferramentas para futuras investigações em pesquisa sobre o protocolo estudado, considerando os seguintes requisitos de sucesso ao fim deste trabalho.

- *Transparência para o desenvolvedor* – Deve-se prover um protocolo de rede que permita ao desenvolvedor, apenas através da utilização deste protocolo, desenvolver aplicações para envio de dados multimídia em cenários $1 \rightarrow n$ com suporte a controle de congestionamento de fluxo de dados não confiável. Em momento algum, o desenvolvedor deverá implementar mecanismos para controle de congestionamento no processo de desenvolvimento de sua aplicação. Os mecanismos para controle de congestionamento, assim como o de distribuição de conteúdo, devem ser transparentes para o desenvolvedor.
- *Independência de linguagem e plataforma* – O protocolo proposto deve ser independente de linguagem de programação ou plataforma específica para a sua execução. Sendo assim, espera-se que seja possível utilizar tal protocolo em diferentes contextos de aplicações, considerando diferentes linguagens de programação, incluindo linguagens populares como C, C++, Java e Python; assim como que seja possível implementá-lo em diferentes sistemas operacionais.
- *Comprometimento com práticas já utilizadas em aplicações multimídia* – É imprescindível que o protocolo proposto seja capaz de transmitir dados em modo *multicast* e que suporte algoritmos para controle de congestionamento neste modo, considerando a restrição de que este serviço seja implementado na camada de transporte, e não na camada de aplicação.

- *Monitoramento e notificação de requisitos mínimos para transmissão* – O protocolo deve permitir que as aplicações definam requisitos mínimos de funcionamento para o envio e o recebimento de dados, notificando-as caso os limiares definidos não sejam cumpridos. Requisitos como taxa mínima para transmissão e recepção, além do atraso máximo figuram como exemplos desses requisitos. Isto permitirá que as aplicações multimídia construam soluções para adaptação e transcodificação em tempo real de fluxo de dados multimídia baseando-se em métricas obtidas de forma padronizada e sem a necessidade de se implementar na camada de aplicação.
- *Especificação do protocolo para uso em larga escala* – O protocolo deve ser descrito e publicado sob domínio público seguindo o formato determinado pela IETF (*Internet Engineering Task Force*) e, desta forma, facilitar a utilização do protocolo em escala global. Isto inclui a especificação formal do protocolo e sua efetiva validação.

1.3.2 Objetivos Específicos

Considerando os requisitos descritos anteriormente, pode-se dividir o objetivo principal deste trabalho nos objetivos específicos descritos a seguir.

1. Compreender os sistemas e protocolos para distribuição de conteúdos multimídia com suporte a controle de congestionamento e multicast, em especial soluções que forneçam tais funcionalidades na camada de aplicação.
2. Avaliar o desempenho do protocolo DCCP em redes IP, tais como LANs, WLANs e na Internet. A avaliação consiste em um processo comparativo entre o DCCP e os protocolos TCP e UDP quando utilizados para transmitir fluxos multimídia nessas rede. Esta avaliação é importante porque neste trabalho propõe-se um protocolo baseado no DCCP.
3. Definir um protocolo na camada de transporte da pilha TCP/IP para distribuição de conteúdos multimídia capaz de transmitir dados através do modo multicast, sempre que possível, e do modo multi-unicast entre pares quando o modo multicast não estiver disponível. Neste contexto, deve-se definir também um algoritmo para controle de congestionamento em transmissões multicast a ser acoplado ao protocolo proposto.

4. Definir, para o protocolo proposto, um modelo que permita formalizar as características do protocolo e assim avaliar os aspectos comportamentais dos nós quando o protocolo estiver em uso, bem como os aspectos da rede, como o consumo de recursos computacionais.
5. Definir métricas que permitam avaliar a melhoria de desempenho na entrega de dados multimídia quando utilizado o protocolo proposto e outros protocolos disponíveis na literatura, inclusive o próprio protocolo DCCP.
6. Definir uma metodologia para que o protocolo possa ser avaliado de acordo com as métricas mais adequadas.
7. Implementar o protocolo e o algoritmo para controle de congestionamento em um simulador e em um sistema operacional a fim de validar o uso do protocolo em cenários reais.
8. Avaliar a relevância do uso do modo multicast e o compartilhamento de fluxos unicast entre pares com relação melhoria na qualidade do conteúdo multimídia recebido pelos nós, assim como no consumo eficiente do canal de transmissão da rede. Neste caso, faz-se necessário visitar os modelos que já foram definidos no contexto de distribuição de conteúdo e avaliar o quanto as soluções já disponíveis permitem avançar o problema da tregédia dos comuns em cenários $1 \rightarrow n$.
9. Definir e implementar diferentes estratégias para eleição de nós responsáveis pelo repassa de conteúdos multimídia entre pares, assim como nós responsáveis por relatar a taxa de recepção e perdas de dados durante uma transmissão. Nesse contexto, deve-se avaliar estas estratégias sob diferentes condições ambientais a fim de entender de que forma os nós podem usar os resultados deste trabalho para melhorar seu próprio desempenho em cenários $1 \rightarrow n$.
10. Avaliar a capacidade do protocolo em lidar com situações de falhas (desconexão, por exemplo) de um nó responsável pelo repassar de conteúdos multimídia. Além disso, avaliar o impacto dessas falhas sob outros nós na rede, como por exemplo, qual é o impacto sob a qualidade do conteúdo multimídia recebido por um nó quando há uma

falha em um nó de repasse, ou; qual é máximo atraso aceitável sem que o usuário perceba interrupções na reprodução do conteúdo multimídia. Outros aspectos que podem ser explorados são ataques conhecidos em redes entre pares, especialmente os ataques de *Free Riders* [?; ?] e o de poluição [?; ?; ?].

11. Implementar ferramentas e aplicações (estudos de caso) que permitam validar a utilização do protocolo e do algoritmo de controle de congestionamento propostos.
12. Propor e redigir uma RFC (*Request For Comments*) da IETF, descrevendo tecnicamente e em detalhes o protocolo e o algoritmo para controle de congestionamento desenvolvido neste trabalho. Neste ponto, deve-se também estudar e descrever o grau de compatibilidade do protocolo com outros protocolos e recomendações anteriormente aprovadas pela IETF no contexto de transporte de dados multimídia.

1.4 Relevância do Tema e da Tese

Transporte de fluxos de dados multimídia com suporte a controle de congestionamento para distribuição de conteúdos multimídia, em particular, na Internet, é um tema relevante no contexto de redes de computadores porque ao utilizar de forma eficiente e equânime os canais de transmissão, obtem-se melhoras da qualidade do conteúdo multimídia percebido pelo usuário e ao mesmo tempo permite que aplicações elásticas, como as executadas na *Web*, funcionem de forma satisfatória. Esta foi a motivação para a concepção do protocolo de rede proposto no contexto deste trabalho, assim como o algoritmo para controle de congestionamento a ser utilizado em transmissões de conteúdos multimídia multicast, principalmente com vista a sua ampla utilização na Internet.

No caso do tema específico tratado neste trabalho, a distribuição de conteúdos multimídia em larga escala é cada vez mais relevante devido às características inerentes à classe de aplicações e cenários que têm sido disponibilizados e adotados na Internet, tais como controle de congestionamento, sensibilidade a atrasos e transporte de dados de forma não confiável. Estas características, aliadas à padronização e a transparência da solução no ponto de vista do desenvolvedor da aplicação, tornam o tema ainda mais relevante para o contexto de boas práticas para a distribuição de conteúdos multimídia, especialmente em cenários $1 \rightarrow n$.

Como a demanda por serviços multimídia em redes de computadores tem aumentado dia após dia, principalmente em cenários $1 \rightarrow n$, o estudo sendo desenvolvido e os artefatos de software produzidos no contexto desta proposta de tese podem contribuir para o desenvolvimento de aplicações multimídia mais eficientes e de forma padronizada, além de facilitar a tomadas de decisões sobre futuros desenvolvimentos desse tipo de aplicação. Isto é possível porque neste trabalho são apresentados um protocolo para distribuição de conteúdo multimídia com suporte a controle de congestionamento na camada de transporte da pilha TCP/IP; resultados e discussões sobre este protocolo e também sobre o desempenho acerca dos três principais protocolos de transporte disponíveis para uso na Internet, com destaque para o protocolo DCCP. Os resultados obtidos nesta última parte foram um dos primeiros a serem publicados na literatura. Além disso, o autor destaca a importância do presente trabalho por ser o primeiro a trazer à tona um problema e uma proposta de solução do uso do DCCP para distribuição de conteúdos multimídia para a Internet, antes realizada apenas com o protocolo UDP ou com protocolos independentes implementados na camada de aplicação.

No que diz respeito à relevância do trabalho, em se tratando de uma proposta de tese em engenharia para redes de computadores, o autor considera indispensáveis três principais requisitos que estão sendo contemplados e que reforçam a relevância da tese. Estes requisitos servem como motivação para a realização das atividades desenvolvidas até o presente momento.

O primeiro deles é a consistência teórica. O protocolo de rede proposto foi concebido a partir de evidências sólidas com base em experimentos e simulações de rede, com o problema-chave apresentado e discutido através de fundamentos matemáticos e provas contundentes através da utilização de um consagrado simulador de rede. Propõe-se a descrição do protocolo de forma rigorosa e não-ambígua, permitindo um melhor entendimento e futuros investimentos no protocolo teórico proposto.

O segundo requisito é a contribuição científica. Diversos trabalhos relacionados foram estudados antes da concepção do protocolo proposto. A partir deste estudo, identificou-se o problema anunciado anteriormente e foram elencadas as possíveis soluções para o problema, o que culminou com a definição deste trabalho. Até o momento da escrita deste documento e considerando que este é um trabalho ainda em desenvolvimento, não foram encontrados trabalhos com as características aqui propostas, o que reforça o caráter de originalidade e

Este texto
em
congrega!

contribuição científica, a qual já vem sendo respaldada pela comunidade através da publicação de vários artigos em veículos relevantes da área.

O terceiro requisito é o potencial prático. A implementação do protocolo de rede, assim como o conjunto de ferramentas que tem sido desenvolvida no contexto deste trabalho, tem como objetivo demonstrar que a abordagem é viável e praticável. Um protocolo de rede simplesmente especificado sem nenhuma implementação real tornaria as reais contribuições deste trabalho apenas suposições. O compromisso com a utilização dos conceitos para construir mecanismos que possam ser aplicados na indústria tornam o trabalho relevante em termos práticos, sobretudo em escala global na Internet.

1.5 Resumo das Contribuições até o Momento

Com base nos resultados até o momento no contexto deste trabalho, vários trabalhos relacionados foram desenvolvidos, tanto no nível de pesquisa [?; ?; ?; ?; ?] quanto no nível de desenvolvimento [?; ?; ?].

Há também contribuições na linha de disseminar o uso do protocolo DCCP e disponibilizar à comunidade científica os pontos fortes e fracos para transmissão de dados multimídia em redes sem fio, principalmente do ponto de vista do protocolo DCCP. Nesse escopo, a pesquisa tem o papel fundamental de investigar os conceitos e protocolos de rede. É com esse pensamento que muitos avanços tem sido realizados nas diferentes linhas de pesquisa associadas aos vastos conceitos das redes de computadores, como tecnologias de rede sem fio, protocolos de comunicação e controle de congestionamento. Estes são conceitos chaves estudados neste trabalho. As investigações neste sentido tem duas abordagens, a baseada em simulações e a baseada em experimentos. O presente trabalho aparece, portanto, como uma contribuição nessas duas vertentes, envolvendo diversos conceitos importantes na área de redes de computadores, como um tema mais geral.

Outras contribuições deste trabalho até o momento e que merecem destacadas são:

- participação na escrita do documento de RFC 5622 [?]. Trata-se da especificação de um algoritmo para controle de congestionamento conhecido pelo nome de CCID-4, a ser utilizado por aplicações que enviam rajadas de pequenos pacotes separadas por períodos ociosos. As aplicações que mais se adequam nestes casos são as de

*Estreito!
Congestionamento!*

VoIP. Esta constribuição pode ser constatado na seção 15 (agradecimentos) do referido documento;

- implementação do CCID-4 no núcleo do Linux;
- correções de erros da implementação do DCCP em Linux e melhorias no nível da aplicação para a API (*Application Programming Interface*) de *socket*² DCCP. Tais correções e melhorias já foram submetidas ao grupo de desenvolvimento de DCCP em Linux durante todo o tempo de desenvolvimento deste trabalho até o momento;
- implementação do suporte ao protocolo DCCP em diversas bibliotecas de desenvolvimento de aplicações multimídia, como a GStreamer [?], a CommonCPP [?], a uCommon [?] e a ccRTP [?].

Por fim, uma aplicação direta dos resultados e contribuições desta tese está acontecendo no contexto de desenvolvimento de aplicações multimídia para sistemas embarcados. Este projeto está sendo desenvolvido nas dependências do Laboratório de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva, localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

1.6 Estrutura do Documento

O restante deste documento está organizado da seguinte forma:

- No Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos relacionados à camada de transporte do modelo TCP/IP, dando ênfase nos três protocolos estudados no contexto deste trabalho, o TCP, o UDP e o DCCP, com destaque para as funcionalidades do protocolo DCCP e ao tema controle de congestionamento implementados tanto pelo TCP quanto pelo DCCP;
- No Capítulo ?? ...
- No Capítulo ?? ...
- No Capítulo ?? ...

²O conceito de socket será discutido no Capítulo 2.

-
- No Capítulo ?? ...
 - No Capítulo ?? ...
 - No Capítulo ?? ...
 - No Capítulo ?? ...
 - Por fim, no Capítulo ?? são apresentadas as considerações finais, discutindo resumidamente os principais tópicos elencados neste trabalho, bem como os trabalhos em andamento e futuros.