

# 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)

Não sei se ajuda!

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 ~~no que diz respeito a adeptos em suas utilizações~~, principalmente na Internet. Para se ter uma idéia deste crescimento, ~~recentemente a empresa Cisco publicou um artigo [11] onde apresentou-se uma~~ <sup>segundo previsão de</sup> ~~previsão de que em 2014 o tráfego de video será maior do que o tráfego P2P em 2009, correspondendo a 39 % do tráfego de dados total na Internet. A empresa prevê também que em 2014, o tráfego de VoIP, vídeo 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 [1] que também entrará na disputa por uma fatia deste tipo de serviço. A empresa disponibilizará um reprodutor de conteúdo multimídia completamente *online*, onde as pessoas poderão comprar músicas e vídeos *online* e em seguida reproduzi-los em tempo real, com os dados armazenados na infra-estrutura de computação nas nuvens da empresa.

Seguindo a tendência das previsões e dos simples 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, 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 uma fonte dados multimídia (geralmente um sistema final) para milhares de usuários conectados à Internet.

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. Os protocolos para a Internet precisam ser projetados para inferir o estado da rede e ao mesmo tempo tomar decisões de forma rápida de acordo com as mudanças detectadas no consumo dos recursos da rede. Porém, ao que se nota em pesquisas realizadas no contexto deste trabalho, ~~os protocolos de rede para este fim não foram preparados para tal.~~ *não há estabelecidos para este fim.* Apesar da existência de ferramentas computacionais que tentam suprir as limitações existentes dos protocolos de rede para transporte de fluxos multimídia na Internet [?; ?; ?], tratam-se somente de soluções complementares e não fundamentais para uma forma efetiva

e padronizada de se transportar e distribuir dados multimídia nas redes de computadores, principalmente em larga escala, como na Internet.

Do ponto de vista da camada de transporte da pilha TCP/IP, protocolos tradicionais como o UDP e o TCP não foram projetados para este fim, sendo deixado a cargo dos desenvolvedores das aplicações implementarem seus próprios mecanismos para controle de congestionamento de datagramas sem garantia de entrega, particularmente no caso do uso do UDP, utilizado largamente em aplicações multimídia. Nos casos em que se tenta utilizar TCP em aplicações multimídia em tempo real, o mesmo não apresenta um desempenho satisfatório porque ~~se implementa~~ controle de congestionamento e garantia de entrega de uma forma não adequada para aplicações multimídia com transporte de dados em tempo real [?; ?; ?].

~~Neste trabalho, os cenários de aplicação estudados envolvem a transmissão de dados multimídia em tempo real e o uso de algoritmos de controle de congestionamento durante a transmissão visando compartilhar o canal de transmissão de forma equânime entre todos os nós presentes na rede. Mais especificamente, cenários onde se apresentam um nó de rede, gerador de conteúdo multimídia em tempo real e milhares de nós receptores ( $1 \rightarrow N$ ). Neste escopo de investigação, 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;
- 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 neste sentido; e
- Jogos e rádios *online* e videoconferência 1-para-muitos, típicos na Internet.

*mais críticos do que de vida são aqueles*

*ineficiência de utilização de recursos da rede*

Do ponto de vista de pesquisa acadêmica, existem alguns desafios para o desenvolvimento de aplicações e engenharia 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. As aplicações de rede representadas pelos exemplos supracitados 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.



Para viabilizar a utilização de cenários como os apresentados anteriormente, deve-se abordar problemas relacionados ao gerenciamento de conexão multi-ponto, incluindo suporte à conexões partindo de diferentes redes e entre uma fonte transmissora e múltiplos receptores interessados no fluxo multimídia; 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. É nesse contexto de desenvolvimento de soluções de software para viabilizar transmissão de conteúdos multimídia da classe de aplicações de rede ~~apresentada anteriormente~~ que se insere esse trabalho, motivado pelo grande interesse de pesquisa, indústria e ~~marcado~~ em evoluir o estado da arte desse recente modo de disponibilização de conteúdos multimídia observado principalmente na Internet.

## 1.1 Panorama Atual: Protocolos de Transporte da Internet

Quando se projeta um protocolo de rede para tratar transmissão de dados ~~em~~ 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. Neste contexto, a grande questão que surge é: como fazer isto de forma padronizada e assim evitar que cada desenvolvedor de aplicação tenha que implementar este tipo de mecanismo na sua própria aplicação, o que aumentaria a sua complexidade e o seu gerenciamento do seu ciclo de vida? A

fim de responder questões como estas, pode-se começar estudando as atuais propostas de protocolos de transporte de dados para Internet e seu comportamento em cenários de aplicações multimídia em tempo real, como o TCP, UDP e o recém padronizado, DCCP [9; 10].

O protocolo UDP tem sido largamente utilizado em aplicações multimídia em tempo real por ser um protocolo enxuto, 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 vastamente discutidos 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 × tempo* ilustrado na Figura 1.1. Este gráfico corresponde a um experimento 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 experimento, 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, permanecendo assim até o final do experimento.

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 pacote perdido. Esta estratégia acarreta em atrasos indesejáveis quando se trata de

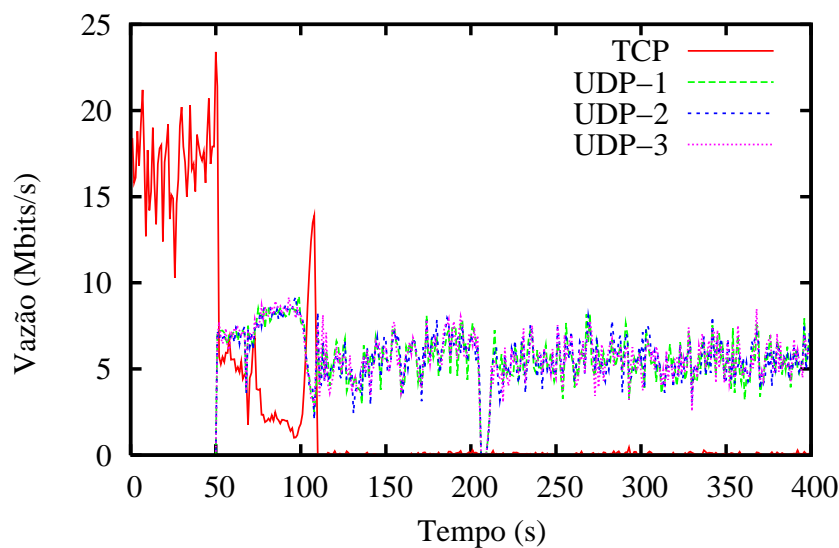


Figura 1.1: TCP  $\times$  UDP. Após 50 s do início do experimento, o fluxo UDP ocupa toda a largura de banda disponível na rede.

transmissão de dados multimídia em tempo real.

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 à 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, nestes casos, terminam sendo inúteis às aplicações.

O comportamento do TCP para situações como a mencionada anteriormente pode ser observado no gráfico ilustrado na Figura 1.2. No experimento realizado, transmitiu-se um áudio com duração de 100 s, armazenado no destino e em seguida comparado com o original. Neste caso, constatou-se que apenas 30 % do áudio alcançou o destino, fato ocorrido devido ao excesso de retransmissões de pacotes que foram perdidos na rede quando considerado fluxos TCP disputando com fluxos UDP.

Com apenas essas duas opções para transporte de dados na Internet e objetivando promover melhorias nos serviços oferecidos pelas aplicações multimídia, a IETF aprovou a especificação do protocolo DCCP para transporte de dados multimídia para Internet. Trata-

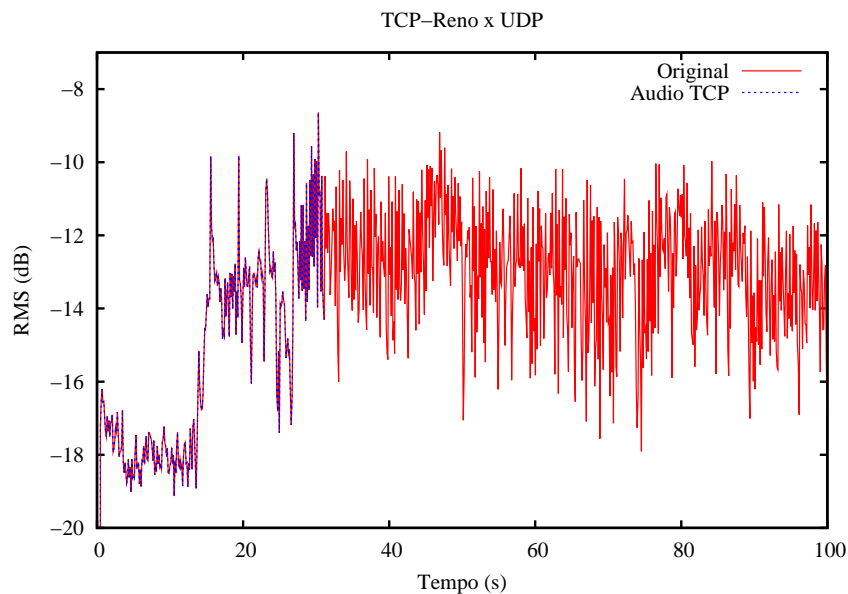


Figura 1.2: TCP Reno  $\times$  UDP, sendo o TCP enviando um arquivo de áudio.

se de um protocolo de rede localizado na camada de transporte da pilha TCP/IP, tal como o TCP e o UDP. 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 de congestionamento. Do UDP, o DCCP herda as características de não garantir entrega e nem ordenação dos dados transmitidos. Além destas características, o DCCP também adiciona 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 utilizá-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 1.3. Neste gráfico, ilustra-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 1.1). 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.

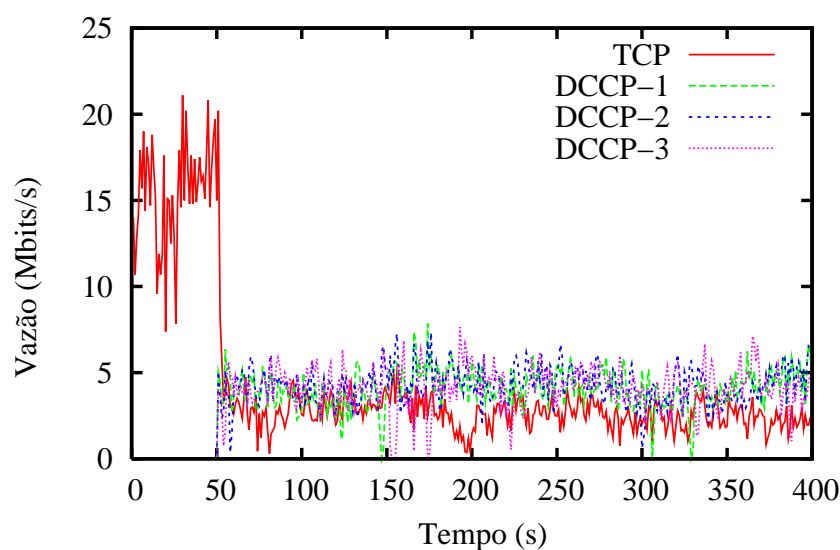


Figura 1.3: TCP  $\times$  DCCP. Ambos os protocolos conseguem transmitir dados na rede.

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 quando se utiliza o protocolo UDP.

Sendo assim, a motivação 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 surgiu como uma das possíveis soluções para o seguinte problema-chave: de um lado apresenta-



se o protocolo UDP, adotado por diversas aplicações com restrição de tempo e que não realizam controle de congestionamento. Por outro lado, apresenta-se o protocolo TCP, cujas aplicações podem se tornar inutilizáveis devido ao congestionamento causado pelo UDP, além de realizarem retransmissões para garantir a entrega de dados.

Estudos anteriores realizados no contexto deste trabalho [?; ?; ?] e outros publicados por terceiros [?; ?; ?; ?; ?; ?] ~~constatam que a utilização do protocolo DCCP tem trazido diversas vantagens na transmissão de fluxos multimídia e é por isto que, no escopo deste trabalho, apresenta-se o protocolo DCCP como uma opção efetiva a ser adotada para transmissão de dados multimídia, principalmente por ter um comportamento similar ao protocolo TCP e por ser um protocolo padronizado pela IETF. Todavia, o DCCP possui falhas críticas quando utilizado em larga escala nos cenários estudados neste trabalho e por isto, nesta obra de doutoramento, propõe-se soluções efetivas para aplicá-los nos cenários estudados. Além das falhas do protocolo DCCP, as quais serão discutidas a seguir, 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.~~

Problemática

## 1.2 Descrição do Problema

~~Como foi possível observar, com o uso do DCCP obtém-se resultados satisfatórios no ponto de vista de transmissão de dados multimídia e melhor utilização dos recursos de rede, resolvendo parte dos problemas discutidos anteriormente quanto ao uso do TCP e do UDP nesse contexto. O problema tratado neste trabalho se apresenta quando o protocolo DCCP é utilizado para distribuição de conteúdo multimídia transmitido a partir de um sistema final da rede para vários outros sistemas finais receptores ( $1 \rightarrow N$ ), tema central até aqui discutido.~~

Porém...

solução!

Não é possível utilizar facilmente o protocolo DCCP para realizar esse tipo de transmissão, pois 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 ~~ele~~ se propõe: resolver os problemas de congestionamento de rede gerados pelo protocolo UDP em cenários de aplicações multimídia, entretanto, quando o protocolo é utilizado em larga escala, simplesmente não é efetivo. O DCCP não é efetivo por conta dos seguintes pontos:

1. **Excessivo consumo de recurso computacional:** *de transmissão multimídia* para cada nova conexão, o nó transmissor deve alocar recursos computacionais (memória e processamento) para tratar cada nova conexão. Em cenários ~~como os considerados nesta pesquisa~~, 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 por um único nó na rede~~. 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 individualmente tenderá a 0:** 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 justa e evita que a mesma entre em colapso de congestionamento, mas para cada fluxo de dados isto é ruim. Este fenômeno é vastamente descrito na literatura e denominado de *tragédia dos comuns* [6]. A tragédia dos comuns ocorre neste caso porque se a taxa de transmissão de um determinado fluxo for menor que o necessário para a aplicação, pode ser que ela não seja suficiente para a recepção de um fluxo multimídia, que geralmente exige uma taxa de transmissão mínima para que a transmissão ocorra efetivamente. Apesar de se adotar multiplexação estatística [?] na Internet, a taxa de transmissão de cada fluxo DCCP convergirá para um ponto de equilíbrio muito baixo e não suficiente em aplicações consideradas neste trabalho, mas todos terão direitos iguais sobre o uso do canal, o que é justo.

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), causando um problema crítico para os sistemas finais: a taxa de transmissão individualmente tende a não ser suficiente em aplicações multimídia e nenhum nó receptor conseguirá reproduzir o fluxo transmitido pelo nó gerador do conteúdo multimídia em questão. Isto pode ser explicado matematicamente utilizando como base a Equação 1.1, que define cada taxa de transmissão  $X_i$  calculada pelo DCCP<sup>1</sup>. Nesta equação,  $X_i$  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, entre 0 e 1,  $RTO$  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 único ACK. Considere-se o problema descrito anteriormente e que o uso total do canal para uma quantidade  $N$  de fluxos DCCP é 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).

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

Embora esta seja uma discussão teórica sobre o problema tratado neste trabalho, também foram realizadas pesquisas em busca de evidências mais contundentes de que este fato ocorre na prática. Foram executadas simulações de rede no NS-2 cuja topologia foi definida como uma árvore binária, onde cada ramo da árvore representava um roteador e cada roteador tinha 10 nós DCCP conectados a ele (Figura 1.4). Cada um dos 10 experimentos foram repetidos n vezes até ser alcançado uma média com nível de confiança de 95%. Em cada experimento, aumentava-se o nível da árvore binária que definia a topologia da rede em 1. Por exemplo, o primeiro cenário tinha 10 nós receptores e 1 roteador, no cenário seguinte 30 nós e três roteadores, no seguinte 70 nós e 7 roteadores e assim por diante. A transmissão ocorreu da

<sup>1</sup>Essa equação é utilizada pelo CCID-3, mas poderia ser qualquer uma outra utilizada em qualquer outro algoritmo de controle de congestionamento

seguinte forma: um nó localizado na raiz árvore 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.

Os resultados obtidos com as simulações descritas anteriormente estão ilustrados no gráfico da Figura 1.5. O eixo X do gráfico representa o número de nós receptores à medida que as simulações eram executadas, ao passo que o eixo Y é a taxa de transmissão média conseguida por cada conexão DCCP.

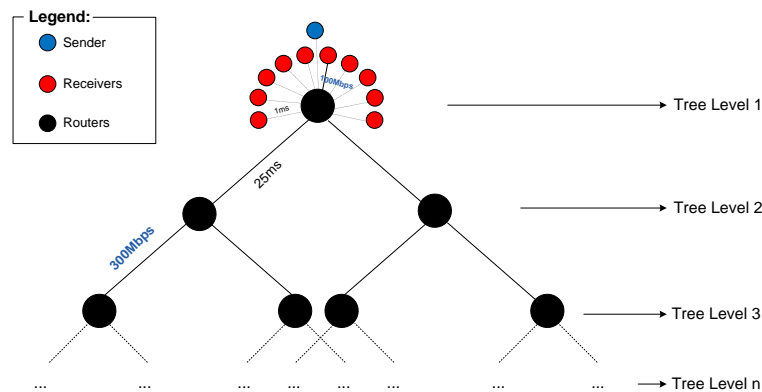


Figura 1.4: Topologia da rede definida para as simulações realizadas. Cada rede é representada por um roteador e com 10 nós em cada rede.

É possível observar no gráfico da Figura 1.5 que a vazão média de cada fluxo DCCP transmitido aos receptores tende a 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 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.

Apesar do protocolo DCCP ter sido utilizado para evidenciar o problema trazido à tona

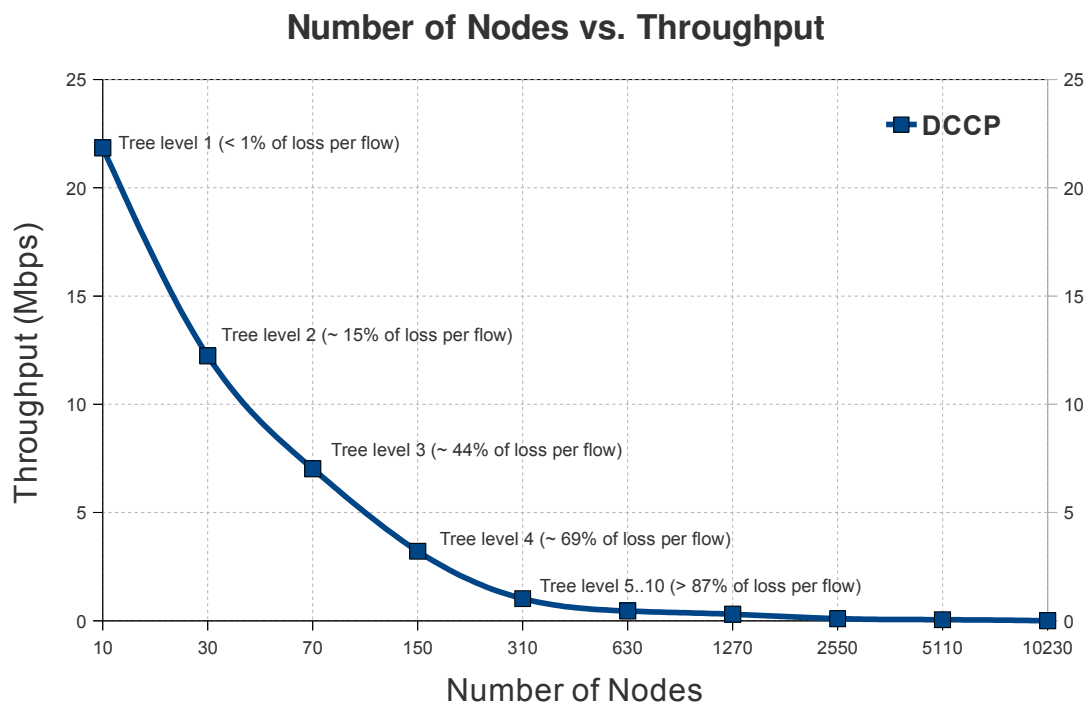


Figura 1.5: Gráfico de uma transmissão DCCP com um transmissor enviando dados de áudio VoIP utilizando o protocolo DCCP para X receptores. A vazão média de cada fluxo tende a zero à medida que o número de receptores aumenta.

neste trabalho e desta forma apresentar resultados concretos, note ~~isto~~ que 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 fluxo não confiável 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.

Sendo assim, o protocolo DCCP apresenta-se como uma alternativa ao UDP em cenários simplórios de transmissão multimídia, mas em situações de cenários reais de aplicações multimídia como costuma-se encontrar na Internet, o protocolo DCCP não apresenta qualquer possibilidade de ser utilizado em aplicações multimídia mais complexas, pelo menos da forma que atualmente é empregado. Note que apenas fluxos DCCP foram transmitidos nesta simulação, 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

*Repetido!  
Em anexo!*

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 [?; ?; ?].

Neste contexto, 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; além disso, o TCP não é aplicável neste cenário por diversas questões também já discutidas. Quanto aos desenvolvedores de aplicações dentro do escopo deste trabalho que decidirem utilizar UDP com suporte a controle de congestionamento na camada de aplicação, estes se depararão com mais dois problemas:

1. Desenvolvimento de pelo menos um algoritmo de controle de congestionamento na camada de aplicação, o que aumenta na complexidade da aplicação; e
2. Falta de padronização, cada desenvolvedor implementará seu algoritmo da forma que desejar.

Uma estratégia para abordar o problema aqui discutido e vastamente considerada pelos pesquisadores para atender aos requisitos das aplicações estudadas é utilizar o modo de transmissão *multicast*. Nestes casos, todos os usuários passam a receber o mesmo conteúdo do fluxo de dados sendo transmitido ao custo de ser necessário apenas uma única transmissão de dados por parte do nó transmissor. Existem na literatura diversos trabalhos que adotam tal abordagem [?; ?; ?; ?; ?; ?; ?], sendo que a grande maioria são baseadas no protocolo UDP, e algumas poucas baseadas no protocolo TCP. Como já discutido, isto aumenta a complexidade no ponto de vista de desenvolvimento e manutenção das aplicações multimídia. Quando se implementa soluções para controle de congestionamento na camada de aplicação, quebra-se a filosofia dos protocolos em camadas considerada pelo modelo de serviços TCP/IP. Neste caso, de acordo com suas responsabilidades, cada camada deve oferecer serviços para sua camada superior e, conseqüentemente, usufruir de serviços da camada inferior. O serviço de controle de congestionamento é de responsabilidade na camada de transporte e não na camada de aplicação, evitando assim a pulverização de diferentes estratégias para transporte de dados e/ou a ausência de qualquer mecanismo para controle de congestionamento. Ao longo dos anos, tem-se observado que as aplicações multimídia baseadas em UDP na Internet não

*Marcelo*

implementam qualquer solução para controle de congestionamento, pois a maioria dos desenvolvedores estão preocupados com o “negócio” das suas aplicações e não em fazê-las justas para com outros fluxos de dados na rede.

Por fim, embora o DCCP seja um protocolo promissor para transporte de fluxos multimídia, os desenvolvedores não têm motivos para passarem a utilizá-lo devido a falta de qualquer função deste protocolo que permita o desenvolvimento de uma solução sub-ótima para distribuição de conteúdos multimídia em tempo real não proporcional a transmissão de um novo fluxo para cada novo nó interessado em recebê-lo.

### 1.3 Objetivos da Tese

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 transmitir de forma padronizada dados multimídia em cenários de distribuição de conteúdos em topologias de rede  $1 \rightarrow N$  com suporte a controle de congestionamento, mas evitando o fenômeno da tragédia dos comuns?

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

*Não é possível permitir a distribuição de conteúdos multimídia em larga escala nos cenários e requisitos considerados sem que exista um protocolo de transporte na pilha TCP/IP capaz de combinar o modo de transmissão multicast, quando possível, com o compartilhamento de múltiplos fluxos unicast entre os nós de uma mesma rede, evitando assim duplicação de dados e excessivas requisições ao nó transmissor.*

#### 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 o mínimo de taxa de transmissão necessária para transmissão de dados, e caso os limiares definidos sejam atingidos, notificar a aplicação. Requisitos como taxa mínima para transmissão e recepção e atraso máximo figuram como exemplos desses requisitos. Isto permitirá que as aplicações construam soluções para adaptação e transcodificação em tempo real de fluxo de dados multimídia.



- **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.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

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



## 1.4 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 devido a melhoria na qualidade do conteúdo sendo transmitido e no uso eficiente dos canais de transmissão. Esta foi a motivação para a concepção do protocolo de rede proposto neste trabalho, 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 que têm sido disponibilizadas na Internet e já citadas anteriormente, tais como controle de congestionamento e distribuição de conteúdo. 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.

Como a demanda por serviços multimídia em redes de computadores tem aumentado dia após dia, principalmente em cenários de aplicações consideradas neste trabalho, o estudo desenvolvido e os artefatos de software providos por esta tese contribui 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 em tempo real com suporte a controle de congestionamento e resultados e discussões sobre o

desempenho acerca de três protocolos de transporte disponíveis para uso nas redes de computadores, sendo o DCCP o foco deste trabalho. Uma das primeiras publicações realizadas no contexto de apresentar o desempenho do protocolo DCCP foram feitas no contexto deste trabalho e a solução do uso do DCCP para distribuição de conteúdos multimídia aparece como a primeira a tratar do problema trazido à tona neste trabalho.

No que diz respeito à relevância do trabalho, em se tratando de uma 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 deste trabalho de tese de doutoramento.

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 e em seguida o problema discutido nesta tese apresentado com fundamentos matemáticos. O protocolo proposto tem sido descrito 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, a partir de então, 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 e, por isto ainda se faz necessária mais pesquisas, não foram encontrados trabalhos com as características aqui propostas, o que reforça o caráter de originalidade e 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 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.

## 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. Esse trabalho aparece, portanto, como uma contribuição que apresenta resultados experimentais envolvendo diversos conceitos importantes na área de redes de computadores, como um tema mais geral.

Outras contribuições promovidas por este trabalho podem ser destacadas, como a implementação de um algoritmo de controle de congestionamento para o protocolo DCCP no núcleo do Linux, correções de erros da implementação deste protocolo em Linux e melhorias no nível da aplicação para a API (*Application Programming Interface*) de *socket*<sup>2</sup> DCCP, sendo essas melhorias já submetidas ao grupo de desenvolvimento de DCCP em Linux durante todo o tempo de desenvolvimento deste trabalho. Para essa última contribuição, ela ocorreu em duas vertentes, uma no âmbito de desenvolvimento do protocolo no nível de sistema operacional e a outra oferecendo melhorias na biblioteca de *socket* DCCP considerando o ponto de vista do desenvolvedor de aplicações baseadas em DCCP.

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

---

<sup>2</sup>O conceito de *socket* será discutido no Capítulo 2.

## 1.6 Estrutura do Documento

O restante deste documento está organizado da seguinte forma:

- No Capítulo 2.1 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 ?? ...
- 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.