

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Coordenação de Pós-Graduação em Ciência da Computação

GMTP: Um Protocolo Multi-Camada para
Distribuição de Conteúdos Multimídia Ao
Vivo com Suporte à Redes Centradas no Conteúdo

Leandro Melo de Sales

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Campina Grande - Campus I como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências, domínio da Ciência da Computação.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Linha de Pesquisa: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Angelo Perkusich e Hyggo Almeida
(Orientadores)

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Leandro Melo de Sales, 10/04/2013

Resumo

O transporte de conteúdos multimídia em tempo real pela Internet é primordial em aplicações como voz sobre IP (VoIP), videoconferência, jogos e WebTV. Ao longo dos anos, observa-se um intenso crescimento de utilização das aplicações cujo cenário é caracterizado por um único nó transmissor e milhares de nós receptores. Por exemplo, o Youtube Live transmitiu os jogos da copa américa 2011 para 100 milhões de usuários. Um ponto crítico nessas aplicações é a sobrecarga de utilização de recursos computacionais nos servidores e canais de transmissão. Isto tem demandado investimentos exorbitantes na construção de Redes de Distribuição de Conteúdos por empresas como Google, Netflix etc. Porém, as aplicações continuam à mercê de protocolos de transportes tradicionais (TCP, UDP, DCCP e SCTP), que não foram projetados para transmitir dados multimídia em larga escala. Para suprir as limitações desses protocolos, os desenvolvedores implementam mecanismo para utilizar os recursos de rede de forma mais eficiente, destacando-se o uso do modelo de serviço P2P (Peer-to-Peer). Todavia, estas soluções são paliativas porque são disseminadas em forma de sistemas ou protocolos de aplicação, sendo impossível evitar a pulverização e fragmentação das mesmas, aumentando-se a complexidade de implantação em larga escala na Internet. Neste trabalho propõe-se um protocolo de transporte multimídia denominado *Global Media Transmission Protocol* (GMTP). O GMTP constrói dinamicamente uma rede de sobreposição entre os nós de uma transmissão (P2P), sem a influência direta da aplicação e com suporte à transmissão multicast e controle de congestionamento. Resultados preliminares apontam que o GMTP utiliza de forma eficiente os recursos de redes e melhora a escalabilidade das aplicações multimídia, evitando-se o retrabalho de desenvolvimento ao concentrar os principais mecanismos em um único protocolo de transporte.

Abstract

The transport of multimedia content in real time over the Internet is essential in applications such as voice over IP (VoIP), video conferencing, games and WebTV. In the last years, there has been an increasing number of applications with a single transmitting node and thousands of receiving nodes. For example, YouTube Live broadcasted games of the American Cup 2011 to 100 million users. A critical aspect in these applications is the overhead of using computing resources on servers and transmission channels. This has demanded exorbitant investment in building Content Delivery Networks (CDNs) by companies like Google, Netflix etc. However, the applications are still at the mercy of traditional transport protocols (TCP, UDP, SCTP and DCCP), which were not designed to transmit multimedia data in a large scale. To address the limitations of these protocols, developers implement a mechanism to use network resources more efficiently, specially using P2P (Peer to Peer) architectures. However, these solutions are palliative because they are disseminated in the form of systems or application protocols, where it is impossible to avoid scattering and fragmentation of them, increasing the complexity of large-scale deployment in the Internet. In this work it is proposed a multimedia transport protocol called Global Media Transmission Protocol (GMTP). The GMTP dynamically builds an overlay network between nodes in a P2P fashion, without the direct influence of the application and supporting multicast transmission and congestion control. Preliminary results indicate that the GMTP efficiently utilizes network resources and improves scalability of multimedia applications, avoiding the rework development by concentrating the main mechanisms in a single transport protocol.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Delimitação e Argumentos	4
1.2	Descrição do Problema	9
1.3	Hipótese	13
1.4	Objetivo	14
1.4.1	Objetivos Específicos	14
1.5	Relevância do Tema e da Tese	15
1.6	Resumo das Contribuições	17
1.7	Publicações	18
1.8	Estrutura do Documento	19

Lista de Símbolos

3WHS - *Three Way Hand Shake*

CCID - *Congestion Control IDentifier*

CPM - *Cooperative Peer Assists and Multicast*

DCCP - *Datagram Congestion Control Protocol*

ECN - *Explicit Congestion Notification*

GMTP - *Global Media Transport Protocol*

HySAC - *Hybrid Delivery System with Adaptive Content Management for IPTV Networks*

IANA - *Internet Assigned Numbers Authority* IETF - *Internet Engineering Task Force*

PDTP - *Peer Distributed Transfer Protocol*

PPETP - *Peer-to-Peer Epi-Transport Protocol*

PPSP - *P2P Streaming Protocol*

RTO - *Retransmission Timeout*

RTT - *Round Trip Time*

SCTP - *Stream Control Transmission Protocol*

Swift - *The Generic Multiparty Transport Protocol*

TCP - *Transport Control Protocol*

TTL - *Time-To-Live*

UDP - *User Datagram Protocol*

Lista de Figuras

1.1	Perfil de Tráfego de Rede da América do Norte durante o horário de pico. .	3
1.2	Esquema de uma arquitetura híbrida P2P/CDN para distribuição de conteúdo multimídia.	5

Lista de Tabelas

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos tem ocorrido uma revolução com relação às formas de criação e transmissão de mídias (áudio e/ou vídeo) na Internet. Com a popularização das câmeras digitais e o número crescente de usuários com conexões de banda larga à Internet, tem-se provocado o aumento do consumo e da exigência de qualidade dos conteúdos multimídia. Isto eleva os custos com largura de banda dos distribuidores de conteúdo. Por exemplo, o YouTube™ tem um custo com largura de banda da ordem de US\$1 milhão por mês para atender cerca de 20 milhões de usuários por dia, equivalente a 60 mil anos de duração se cada vídeo fosse reproduzido sequencialmente [1]. Estima-se que em 2014 o tráfego de vídeo será maior do que o tráfego de redes entre pares (P2P) para compartilhamento de arquivos em 2009, correspondendo a 39 % do tráfego de dados total na Internet. Além disso, estima-se que o tráfego de VoIP, vídeo e jogos na Internet atingirá a marca de 40 exabytes por mês, quase 50 % do tráfego de dados total na Internet previsto para 2014 [2]. Segundo um outro estudo, realizado pela empresa Cisco [3], em 2016 haverá mais vídeos, com cerca de 1,2 milhão de minutos de vídeos transmitidos pela Internet a cada segundo – o equivalente a 833 dias ou mais de dois anos.

Com a evolução da WWW (*World Wide Web*) para a Web 2.0 [4,5], os usuários passaram a ter um papel de destaque no processo de prover alguns serviços. Um exemplo notório é o serviço de distribuição de conteúdos multimídia, sejam serviços onde as empresas disponibilizam conteúdos armazenados, como o YouTube e Netflix™, ou principalmente os casos de transmissões empresariais e residências ao vivo, como o PPLive™ e o UStream.tv™. Nesse último caso, os sistemas permitem a transmissão de conteúdos ao vivo gerados a partir do

computador de um usuário para milhares de outros usuários conectados à Internet [6]. Por exemplo, segundo divulgado no site UStream.tv, seu sistema recebe mais de 50 milhões de acessos e transmite 1,5 milhão de horas de vídeo ao vivo por mês, com mais de 2 milhões de usuários cadastrados e um dos canais¹ com mais de 248 milhões de acessos entre 2010 e fevereiro de 2013, com um pico de 100 milhões de acessos em uma semana. Outro caso é o da NASA.TV (*National Aeronautics and Space Administration Television*), que em 2011 migrou todos seus canais ao vivo na Internet para o UStream.tv, com mais de 18 milhões de acessos até o primeiro semestre de 2013.

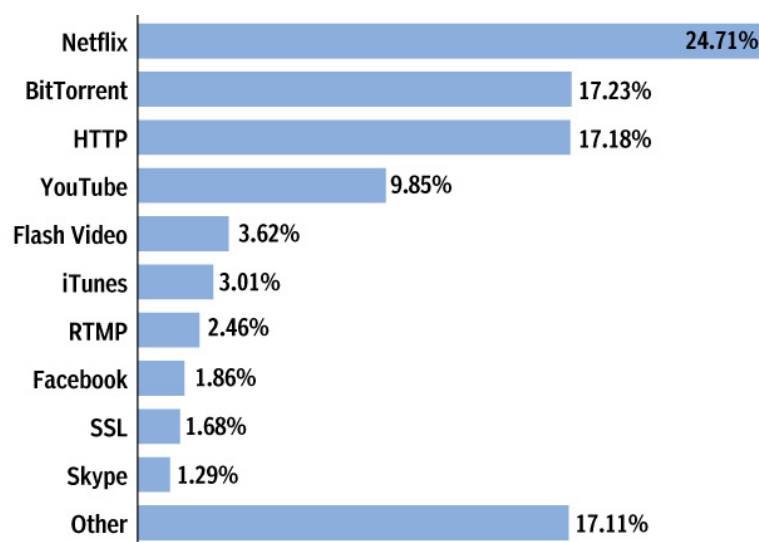
Ao observar essas e outras estatísticas [3, 6–11], o que preocupa é o crescimento acentuado do consumo de recursos computacionais de rede resultante principalmente das estratégias e protocolos de rede adotados para realizar a distribuição dos conteúdos multimídia, cada um com suas próprias soluções [12–17]. 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*” [18]. Destacou-se a Netflix como sendo a maior consumidora de banda de rede da América do Norte, respondendo por 24,71 % de todos os dados transferidos durante o horário de pico de uso da Internet por norte-americanos em março de 2011, ultrapassando até mesmo a rede BitTorrentTM de compartilhamento de arquivos (Figura 1.1(a) [18]). “*A questão é que se não fosse a Netflix, teria sido a AmazonTM, se não fosse a Amazon teria sido o GoogleTM, 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 Partners².

Essa discussão se generaliza em um relatório publicado pela empresa de consultoria Sandvine, onde menciona-se que “*com o rápido sucesso da Netflix, YouTube, UStream e outros, os provedores de Internet em todo o mundo devem se preparar para um futuro em que serviços de multimídia ao vivo serão disponibilizados em grandes proporções, podendo ser responsável pela maior fatia do tráfego de dados na Internet*” [19]. De acordo com o que foi publicado nesse relatório, serviços ao vivo de entretenimento foram responsáveis por quase metade (49,2 %) de todo o tráfego de Internet na América do Norte no primeiro trimestre de 2011 (Figura 1.1(b) [18]). Este número alcançou 60 % no final de 2011 e “*o fato é que o*

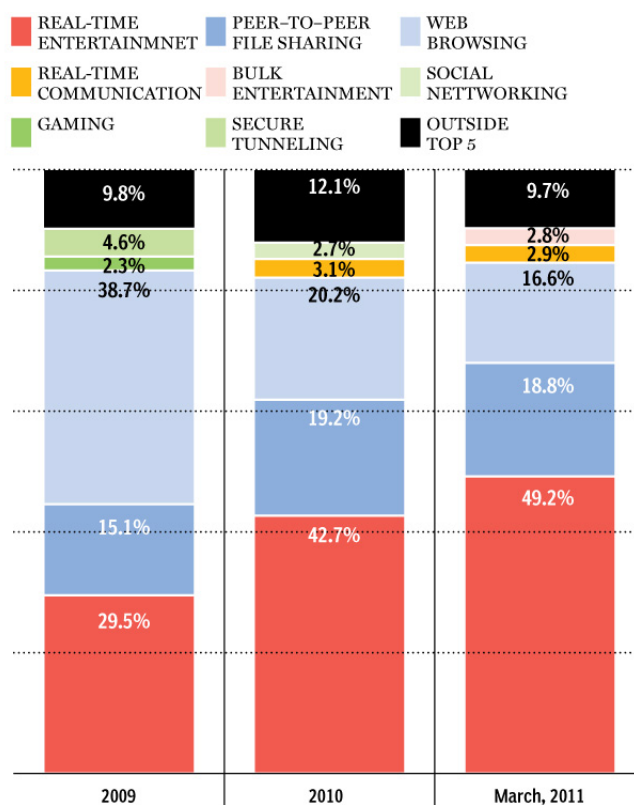
¹O nome do canal é “Águias de Decorah”, um acantamento de águias, localizado em Decorah, Iowa.

²BGC Partners: <http://www.bgcpartners.com/>

→ 1.21 / 6.83 é apresentado na Figure 1.1a [18].
→ como ilustrado na Figure...



(a) Percentual de consumo de dados transmitidos e recebidos por aplicação.



(b) Tráfego de Internet em redes de acesso de banda larga.

Figura 1.1: Perfil de Tráfego de Rede da América do Norte durante o horário de pico (considerando-se redes fixas).

o não seria melhor talvez: infraestrutura de rede!

volume de tráfego na Internet cresce exponencialmente e o congestionamento da rede tende a 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.

Sendo assim, nota-se que o panorama atual dos serviços de distribuição de conteúdos multimídia ao vivo se apresenta em fase de grande expansão, principalmente no que diz respeito ao interesse dos usuários e ao consumo desgovernado dos recursos de rede. Por isto, há uma grande motivação para estudar e propor novas soluções para utilizar eficientemente os canais de comunicação de redes a fim de melhorar a qualidade de experiência do usuário [20, 21].

1.1 Delimitação e Argumentos

O ponto de partida deste trabalho são os protocolos de rede utilizados nos sistemas baseados em arquiteturas híbrida P2P/CDN, ou seja, par-a-par (*Peer to Peer* - P2P) [22–24] e cliente-servidor com suporte de uma rede de distribuição de conteúdos (*Content Delivery Network* - CDNs) [25–27]. Isto porque se trata da principal escolha dos sistemas mais robustos, conseguindo-se escalabilidade do número de usuários e redução de custos com infraestrutura de rede, por meio da rede P2P; e estabilidade e gerenciamento na execução dos serviços, por meio das CDNs [28–36].

Em sistemas dessa natureza (Figura 1.2), os nós estão sempre oferecendo e consumindo recursos uns dos outros, ao passo que os servidores da CDN organizam os nós da rede P2P e mantêm o serviço de distribuição mais estáveis, ou seja, menos vulnerável ao dinamismo de participação dos nós de uma rede P2P ou *churn* (chegada e partida de nós, tempo de disponibilidade, heterogeneidade quanto a capacidade de *download* e *upload* etc.) [37, 38].

Nesse tipo de arquitetura, os servidores da CDN atuam como super nós para a rede P2P, ao passo que os nós da rede P2P cooperam entre si a fim de disseminar mais rapidamente os datagramas, reproduzindo-os também localmente. Do ponto de vista de protocolos de rede, utiliza-se conexões TCP (*Transmission Control Protocol*) [39, 40] para selecionar os nós parceiros e para troca de mapas de *buffers*, que servem para indexar quais nós possuem quais partes da mídia; ao passo que utiliza-se o UDP (*User Datagram Protocol*) [40] para transmitir datagramas contendo as partes da mídia e exibi-las ao usuário final. Um aspecto

no contexto ② não seria melhor dizer: disponibilização

que organiza

ilustrado na Figura 1.2

o ponto final é o sistema tornar-se nos gostos de redes parenteas

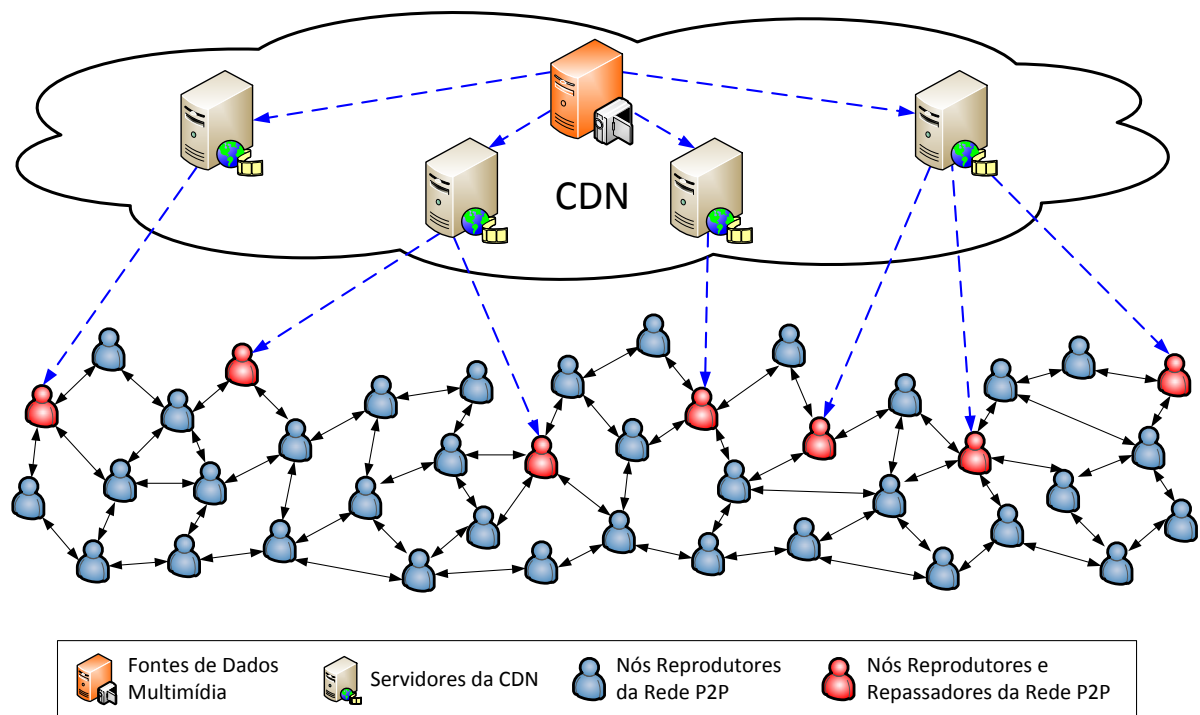


Figura 1.2: Estrutura de rede de uma arquitetura híbrida P2P/CDN para distribuição de conteúdo multimídia.

importante para esses sistemas é definir de que forma os nós devem escalonar o uso de seus recursos de forma que a alocação seja a mais eficiente possível, evitando-se sobrecarga nos servidores da CDN e nos canais de comunicação.

Isto posto, os cenários de aplicação considerados neste trabalho são os que apresentam um nó de rede gerador de um conteúdo multimídia e milhares de nós receptores, estabelecendo portanto uma relação $1 \rightarrow n$. Tais aplicações possuem uma característica em 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. Esta característica leva as seguintes peculiaridades:

1. o usuário de um nó repassador tem que expressar interesse em um determinado evento no instante da sua ocorrência e não quando já possui o conteúdo a ser compartilhado, como nos sistemas P2P de compartilhamento de arquivo. Além disso, as parcerias são realizadas entre os nós com interesses comuns por um único conteúdo e não por múltiplos conteúdos ao mesmo tempo;
2. o estado do mapa de *buffer* de reprodução de cada nó da rede é semelhante, pois não

existe a possibilidade de um nó ter um mapa de *buffer* com muito mais dados para reproduzir do que outros nós. Da mesma forma, não faz sentido manter dados já reproduzidos no *buffer* de reprodução por muito tempo. Os datagramas expiram³ rapidamente e, nestes casos, devem ser descartados pelas aplicações dos nós que os recebem. Assim, o tamanho necessário para o *buffer* de reprodução deve ser o suficiente para armazenar alguns segundos⁴ da mídia e repassá-la aos seus nós parceiros, exigindo-se baixa⁵ capacidade de armazenamento dos processadores de rede (roteadores, pontos de acesso etc.), incluindo os nós finais (*desktops*, celulares, tablets etc.);

3. quando o usuário de um potencial nó repassador não tem interesse em um conteúdo, a aplicação, na maioria das vezes, não é executada e portanto a dependência pelo oportunismo é mais crítica do que nos sistemas de compartilhamento de arquivos. Isto torna a rede mais dinâmica e consequentemente os serviços mais instáveis – há um impacto direto nos parâmetros que determinam a experiência do usuário ao reproduzir um conteúdo multimídia devido ao aumento do *churn*;
4. o caminho dos fluxos de dados transmitidos por um mesmo servidor da CDN S_1 para um conjunto de nós $N_1..N_n$, localizados em redes distintas, são mais previsíveis. Isto possibilita parcerias de melhor qualidade ao levar em consideração que é possível determinar pontos de intersecção das rotas desses fluxos de dados, uma vez que estes convergem para um mesmo servidor S_1 . Nestes casos, é possível enviar apenas um fluxo de dados e replica-lo no ponto de intersecção. Isto permite o agrupamento e o fomento à cooperação entre os nós.

Estas peculiaridades viabilizam uma abordagem muito importante adotada neste trabalho: a participação mais efetiva dos roteadores no processo de distribuição do conteúdo multimídia. Isto ocorre ao permitir que os roteadores (i) constituam uma rede de sobreposição P2P; (ii) coordenem a seleção de nós parceiros (outros roteadores); (iii) sirvam como pontes de acesso aos servidores da CDN; e (iv) ajudem na execução do serviço de controle de congestionamento. Isto porque conjectura-se que os roteadores são elementos de rede

³Em aplicações de transmissão multimídia ao vivo, estima-se *jitter* no máximo de 180 ms

⁴No máximo, 5 segundos

⁵Utilizando uma compressão MPEG-4, utiliza-se alguns kilobits por segundo até dezenas de megabits por segundo.

estáveis com relação a sua disponibilidade se comparados aos sistemas finais, esperando-se portanto atenuar o *churn* da rede P2P e assim permitir que as aplicações forneçam serviços mais estáveis aos usuários.

Em geral, o uso de tal abordagem é justificado por uma tendência em utilizar os roteadores para auxiliar e otimizar os serviços das camadas TCP/IP mais acima, como os serviços de controle de congestionamento, NAT dinâmico (*Dynamic Network Address Translation*) através de UPnP (*Universal Plug and Play*) [41], DNS dinâmico [42], dentre outros. Esta é uma tendência sustentada pelas Redes Centradas no Conteúdo (*Content Centric Networks – CCN*), proposta por Van Jacobson [43–47]. O princípio é que uma rede de comunicação deve viabilizar o acesso ao conteúdo de interesse por um usuário (*content-centric approach*) independente do local físico onde tal conteúdo está armazenado, enfraquecendo a idéia restrita de organização dos protocolos em camadas funcionais (*host-centric approach*). Em linhas gerais, abstrai-se o esquema de acesso a um recurso pelo endereço IP passando a acessá-lo pelo seu nome, independente da localização do nó gerador do conteúdo de interesse. Isto porque considera-se que entregar o conteúdo é mais importante do que a forma de obtê-lo, pois 90 % do tráfego na Internet consiste de dados sendo disseminados a partir de uma fonte para diversos destinos.

Desta forma, baseando-se em resultados de pesquisas publicados recentemente, o escopo deste trabalho argumenta-se que a melhor abordagem para o serviço de controle de congestionamento é fazer uso dos algoritmos de controle de congestionamento assistidos pela rede [48]. Neste caso, convém destacar o *eXplicit Control Protocol* (XCP) [49–51], o *Rate Control Protocol* (RCP) [52–54], o *Variable-Structure Congestion Control Protocol* (VCP) [55–59] e o *Congestion Exposure* (ConEx) [45, 60, 61], discutidos na Seção ??.

O fato é que manter estado sobre a taxa de transmissão por fluxo de dado e definir a nova taxa de transmissão de acordo com eventos de perda não é a melhor abordagem [48, 49, 54]. Em vez disso, esses protocolos utilizam algoritmos que permitem a ocupação máxima da capacidade de compartilhamento do roteador ao sinalizar para os fluxos de dados competindo pelo uso do canal qual a taxa de transmissão a ser utilizada, definida de acordo com diversos critérios, tais como a ocupação da fila de roteamento, variação do RTT, etc [62, 63]. Assim, reduz-se drasticamente as perdas de dados porque as filas de roteamento não atingem 100 % da sua capacidade, promove-se o compartilhamento equânime do canal e descarta-se a ne-

informação de

cessidade de procedimentos de inicialização que subutilizam os canais de transmissão, como a fase de partida lenta do TCP [39, 64]. Apesar dos avanços apresentados por estes trabalhos, tais soluções ainda não foram aplicadas em cenários de aplicação multimídia que consideram uma arquitetura P2P/CDN combinada com a utilização dos roteadores no processo de distribuição de conteúdos multimídia ao vivo, estratégia adotada neste trabalho.

Além disso, argumenta-se neste trabalho que ao mover a *responsabilidade* da execução de alguns serviços para o núcleo da rede, ou pelo menos utilizar a rede para auxiliar neste processo, facilita-se o uso de alguns recursos antes difíceis de serem utilizados, tais como transmissões de fluxos de dados em modo *multicast*. No caso do *multicast*, embora esteja disponível há mais de 20 anos, utilizar tal abordagem largamente na Internet não se mostrou uma opção viável e poucos sistemas o adotaram na sua forma original. Isto ocorre devido às barreiras administrativas que dificultam a manipulação de rotas *multicast*, principalmente por conta da dependência do administrador da rede em ter que habilitar explicitamente este tipo de tráfego de dados para um cenário específico de aplicação. Contudo, é possível utilizá-lo quando controlado por um protocolo capaz para habilitá-lo automaticamente de acordo com a demanda das aplicações, onde os fluxos poderão ser compartilhados mantendo-se o princípio da independência dos serviços de rede, ou seja, sem que a aplicação precise se preocupar com a forma *de como* que isto é feito.

Com esse norte, delimitou-se algumas métricas que determinam a eficiência de um sistema e a experiência do usuário ao assistir um conteúdo ao vivo. Tais métricas são divididas em três grupos *delimitados e separados*.

1. *Quando a qualidade da experiência do usuário*: avalia-se o tempo que os nós levam para começar a reproduzir os primeiros datagramas; o tempo que os nós levam para voltar a reproduzir o conteúdo quando seus nós parceiros se desconectam da rede (índice de continuidade); e a qualidade do conteúdo recebido em comparação ao conteúdo original.
2. *Quando a escalabilidade dos sistemas com relação a quantidade de nós conectados*: avalia-se a quantidade de nós simultâneos conectados, a contribuição da rede CDN e da rede P2P, o nível de duplicação de fluxos de dados.
3. *Quando a execução dos protocolos*: avalia-se a sobrecarga de controle gerados pelos

protocolos a fim de executar suas funções.

Assim, é no contexto de utilização de conceitos e desenvolvimento de protocolos de redes de computadores para aumentar a eficiência das transmissões 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, especialmente na Internet. Para viabilizar isto, deve-se abordar problemas relacionados a comunicação multi-ponto e escalabilidade quanto ao número de nós, mantendo-se ainda a qualidade da experiência do usuário ao assistir um conteúdo ao vivo.

1.2 Descrição do Problema

Nos últimos anos, diversos esforços acadêmicos e da indústria foram feitos para disponibilizar sistemas de distribuição de conteúdo ao vivo na Internet [65–79]. A disseminação de diferentes sistemas e protocolos de rede com este propósito tem levado a pulverização de soluções para transporte de dados, gerando uma falta de padronização na forma como ~~esses~~ sistemas transportam seus dados na Internet, principalmente por serem completamente implementadas na camada de aplicação [80–82]. Isto não seria um problema se essa pulverização não potencializasse duplicações da transmissão de um evento e a segmentação de grupos de nós interessados em assistir um mesmo evento [83–91].

A transmissão de múltiplos fluxos de dados com o mesmo conteúdo por parte de diferentes sistemas gera um consumo desnecessário de recursos de rede e, principalmente, a impossibilidade de que dois ou mais nós conectados em sistemas distintos possam cooperar entre si, compartilhando o mesmo fluxo de dados transmitido por um servidor da CDN ou não. Por exemplo, é comum encontrar na Internet diversos sistemas de distribuição de conteúdo, cada um com milhares de usuários conectados, porém recebendo fluxos independentes do mesmo jogo de futebol, da corrida de fórmula 1 etc. A duplicação pode ser percebida até em cenários mais simples, como dois ou mais nós conectados à Internet pela mesma rede e utilizando diferentes sistemas para assistir o mesmo evento ao vivo. Idealmente, os nós deveriam compartilhar o mesmo fluxo de dados e cada um renderizar o conteúdo da forma definida pela aplicação, desacoplando a forma de transportar os dados da forma como este

é apresentado pela aplicação (princípio da independência das aplicações), exatamente como no caso do serviço Web.

No caso do serviço Web, independente da forma que os navegadores são implementados, todos transportam dados utilizando o protocolo TCP, o que evita a pulverização de diferentes formas de prover tal serviço, ficando a cargo do desenvolvedor de cada aplicação decidir como exibir as informações recebidas. Contudo, percebe-se a inexistência de um protocolo equivalente ao TCP para os sistemas de distribuição de conteúdos multimídia, apesar do sucesso de utilização por parte dos usuários na Internet, como apresentado anteriormente. Um protocolo similar ao TCP poderia evitar as duplicações de transmissão e auxiliar os sistemas na formação de parcerias, aumentando a possibilidade de cooperação entre os nós interessados por um mesmo conteúdo, uma vez que não há a necessidade de individualização dos dados transmitidos e ao mesmo tempo fazendo um melhor uso dos canais de transmissão.

Por conta das limitações dos protocolos de transportes que não oferecem recursos para auxiliar a execução dos sistemas de distribuição de conteúdos multimídia ao vivo, passou-se então a utilizar arquiteturas de sistemas baseadas em P2P, CDN e P2P/CDN. Na prática, as diferentes propostas para fornecer os principais recursos dos sistemas de distribuição de conteúdos multimídia ao vivo é o que leva a pulverização dos sistemas. Em geral, implementam-se mecanismos para conexão multi-ponto e topologias [12, 22, 91–96], tolerância à desconexões e minimização de *churn* [38, 92, 96–98], seleção de nós [99–102], disponibilização de informação de contexto da rede para dar suporte à execução dos serviços das aplicações [103–105] estratégias para incentivos à cooperação entre nós [102, 106–111], algoritmos para inibir a participação de nós *free-riders* [109, 112–114] e segurança [111, 115–118].

No que diz respeito aos protocolos de transporte para transmissão de fluxos multimídia ao vivo, tanto o UDP quanto o TCP não foram projetados para atender as necessidades das aplicações, apesar de serem utilizados abundantemente em sistemas de distribuição de conteúdos multimídia (consultar Seção ?? para mais detalhes). Este fato acontece primeiro por um motivo histórico, pois na época que tais protocolos foram propostos não se discutia sobre este tipo de serviço, nem sobre sistemas P2P e muito menos sobre redes CDN. ^{2o} Segundo, mais importante, porque os sistemas foram sendo disponibilizados levando em consideração toda a complexidade na formação das redes P2P, uma vez que os protocolos de transporte não eram eficazes em se tratando da distribuição de datagramas IP em larga

devido ao fato qz para a

escala na Internet, cuja principal forma era utilizar *multicast*. Como consequência, apesar dos esforços arquiteturais com o uso de P2P e da CDN, toda transmissão termina sendo de múltiplos fluxos *unicast* e independentes, com a maior carga de geração de tráfego de dados posta nas redes CDN com auxílio das redes P2P, nos melhores casos.

Além do TCP e do UDP, nos anos da década de 2000, outros protocolos mais modernos passaram a apresentar avanços significativos para permitir a transmissão de conteúdos multimídia, como é o caso do DCCP (*Datagram Congestion Control Protocol*) [119,120]. Apesar de sua eficiência em alguns cenários de transmissão de dados multimídia na Internet, o DCCP possui falhas críticas quando utilizado em larga escala em cenários $1 \rightarrow n$ [121–123]. 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, uma nova conexão se faz necessária, não havendo a possibilidade de compartilhamento entre diferentes nós interessados pelo mesmo conteúdo. De fato, qualquer protocolo que exija estabelecimento de conexão e realize controle de congestionamento por fluxo de dados apresenta tal limitação, o que gera dois problemas:

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. O trabalho mais notável que discute as consequências deste problema em aplicações de rede é o encontrado na referência [90].

2. *a taxa de transmissão de fluxos DCCP individualmente tenderá a 0 (zero)*: No caso do DCCP, utiliza-se uma equação matemática para definir a taxa de transmissão durante 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 Bens Comuns (*Tragedy of the Commons*) [124], ^{presente} apresentando-se em diferentes áreas do conhecimento. No caso de protocolos como o DCCP, a tragédia dos bens 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, estatisticamente, ^{de prima equânime} direitos iguais para usar o canal de transmissão.

Desta forma, 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 DCCP⁶ durante a transmissão de dados para realizar o controle de congestionamento em cada conexão [125]. 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. ^{limite}

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 alcancem 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).

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

⁶Essa 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.

Embora esta seja uma discussão teórica, simulações foram realizadas em busca de evidências mais contundentes de que este fato pode ocorrer na prática. Os resultados e discussão sobre estas simulações são apresentados nos artigos disponíveis através das referências [121, 122, 126] e na Seção ?? ^{em}. Em resumo, de acordo com os resultados obtidos, apenas fluxos DCCP foram suficientes para causar o problema em questão, sequer fluxos de outros protocolos foram utilizados. Em situações mais realistas, o problema se agrava porque o protocolo DCCP disputará o canal de transmissão não apenas com fluxos DCCP, mas também com fluxos de protocolos como o TCP, UDP, SCTP [127, 128], dentre outros.

Apesar do protocolo DCCP ter sido utilizado para evidenciar o problema que acabara de ser apresentado, esta discussão pode ser generalizada em direção a qualquer outro protocolo de rede que seja orientado à conexão e que realize controle de congestionamento de fluxos individualmente. A fim de aumentar a representatividade de protocolos nesse contexto, o leitor pode consultar outros trabalhos referenciados em [129–148] e no Capítulo ?? deste documento.

Para contornar os problemas discutidos até aqui, torna-se imprescindível projetar um protocolo de rede com vistas a reduzir a pulverização dos sistemas de distribuição de conteúdo, inspirando-se em casos consistentes ao longo dos anos, como o serviço Web, e que considere a evolução do estado da arte como aliado nesse processo, tal como as redes centradas no conteúdo e os algoritmos de controle de congestionamento assistidos pela rede.

Diante do exposto, pretende-se responder a seguinte questão de pesquisa: *como disseminar conteúdos multimídia ao vivo na Internet evitando o fenômeno da tragédia dos bens comuns dos protocolos de transporte, considerando o princípio da independência das aplicações de rede?*

1.3 Hipótese

Para o problema em questão é adotada a hipótese de que *o uso de redes CDN auxiliadas por uma rede P2P, constituída dinamicamente por roteadores, combinado com um protocolo que unifica as estratégias de comunicação de diferentes sistemas, que considera o uso dinâmico de transmissões multicast e de controle de congestionamento assistido pela rede, possibilita a disseminação eficiente de conteúdos multimídia ao vivo.*

Isto remete à necessidade da aplicação de técnicas e mudanças na perspectiva da execução de serviços de rede para as quais não necessite que as aplicações implementem aspectos intrínsecos de distribuição de conteúdos na rede, garantindo-se a escalabilidade do número de nós e evitando-se a segmentação dos nós interessados em obter o conteúdo multimídia de um determinado evento.

1.4 Objetivo

Neste trabalho, ~~tem-se~~ como objetivo a concepção e a avaliação de um protocolo multicamada denominado *Global Media Transmission Protocol* (GMTP), para uso em sistemas que consideram uma arquitetura híbrida P2P e CDN para distribuição de conteúdos multimídia ao vivo. Mais especificamente, propõe-se um protocolo que explora a relação entre o escalonamento de recursos computacionais em redes P2P, a estabilidade das redes CDN e os mecanismos que possam mitigar a complexidade no processo de construção desses sistemas, utilizando-se eficientemente os recursos de rede a fim de melhorar a qualidade da experiência do usuário ao reproduzir um conteúdo ao vivo através da Internet.

1.4.1 Objetivos Específicos

Pode-se dividir o objetivo principal deste trabalho nos seguintes objetivos específicos:

1. compreender os sistemas e protocolos para distribuição de conteúdos multimídia baseados em arquiteturas P2P/CDN, com suporte a controle de congestionamento e transmissão *multicast* na camada de aplicação. Além disso, entender quais outras funções estão presentes nesse tipo de sistema;
2. definir um protocolo de rede que opera nas camadas de transporte e rede da pilha TCP/IP para distribuição de conteúdos multimídia capaz de transmitir e receber dados de aplicação através de mecanismos estabelecidos como boas práticas no contexto dos protocolos de rede e seu uso pelas aplicações;
3. implementar o protocolo proposto em um ambiente que proporcione a obtenção de valores para as métricas avaliadas, permitindo-se estudar o protocolo por meio de di-

ferentes configurações de rede, entender seus limites e os impactos que seus recursos pode gerar tanto sobre os nós quanto sobre a rede; e

4. avaliar e discutir os métodos e técnicas empregados no protocolo proposto em comparação a um sistema disponível no estado da arte, discutindo-se sobre às melhorias na qualidade da experiência do usuário, suas vantagens e desvantagens;

1.5 Relevância do Tema e da Tese

Transporte de fluxos de dados multimídia ao vivo para distribuição de conteúdos multimídia é um tema relevante no contexto de redes de computadores devido aos recentes interesses dos usuários por parte desse tipo de serviço, em particular, na Internet. *como discutido na ss 1.1*

Como propõe-se neste trabalho, combinar tópicos específicos do tema estudado em uma solução para melhorar a experiência do usuário ao reproduzir um conteúdo ao vivo é um grande desafio que ainda está em aberto, principalmente devido ao surgimento de novas técnicas, métodos e/ou paradigmas, como as redes centrada no conteúdo e os algoritmos para controle de congestionamento assistidos pela rede. 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 considerados na Internet, tais como seleção de nós, tolerância à falhas, segurança, controle de congestionamento e sensibilidade a atrasos no envio de datagramas. Estas características aliadas à transparência da solução no ponto de vista do desenvolvedor da aplicação, tornam o tema ainda mais relevante para o contexto de boas práticas na forma como os serviços de distribuição de conteúdos multimídia são implementados atualmente.

Nesse contexto, apesar das soluções existentes resolverem parte do problema em discussão, principalmente quando se utiliza redes de distribuição de conteúdo, argumenta-se que ainda é possível obter melhores resultados quanto ao desempenho dos sistemas com a finalidade que se discute neste trabalho, não somente na perspectiva do consumo de recursos de rede, mas também do estado da prática no que diz respeito a forma que tais sistemas são desenvolvidos. Como a demanda por serviços multimídia em redes de computadores tem aumentado dia após dia, o estudo sendo desenvolvido e os artefatos de software produzidos no contexto desta tese podem contribuir sobremaneira para o desenvolvimento de aplicações

multimídia mais eficientes e de forma padronizada, além de ajudar na tomada de decisões sobre futuros desenvolvimentos desse tipo de pesquisa. Isto é possível através das contribuições específicas desenvolvidas no contexto deste trabalho, sumarizadas na Seção 1.6.

No que diz respeito à relevância do trabalho na perspectiva de engenharia de software para sistemas distribuídos, 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 que foram desenvolvidas ao longo deste trabalho.

O primeiro deles é a consistência teórica. O protocolo de rede proposto foi concebido a partir de evidências sólidas com base trabalhos anteriormente publicados e em simulações de rede, com o problema-chave apresentado e discutido por meio de fundamentos matemáticos e provas contundentes obtidas com o uso 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, 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 artigos em veículos relevantes da área e pelo interesse industrial, como apresentado na Seção 1.7.

O terceiro requisito é o potencial prático. A implementação do protocolo de rede, assim como o conjunto de ferramentas desenvolvidas e que serão mantidas, 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.

1.6 Resumo das Contribuições

- no contexto deste doc enumerar as principais contribuições de forma resumida;*
- Uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte no contexto do tema que se discute. Apresenta-se a forma de como os sistemas atualmente são projetados e as principais considerações sobre os mesmos, como técnicas, métodos e abordagens utilizadas;
 - A concepção e descrição detalhada do protocolo proposto. Neste caso, apresenta-se a elaboração de um projeto de um protocolo de distribuição de conteúdos multimídia ao vivo, que considera a comunicação mais efetiva entre as duas camadas mais importantes da pilha TCP/IP, a de transporte e a de rede. Além disso, traz-se à tona os recentes avanços da área de estudo, como o uso dos novos conceitos das redes centradas no conteúdo aplicados ao processo de distribuição de conteúdos e combinados com os recentes avanços dos algoritmos de controle de congestionamento assistido pela rede;
 - A implementação de artefatos de software que permitem a reprodução do ambiente de estudo, tais como implementações no simulador de rede OMNet++ e NS2, bem como um protótipo de implementação no núcleo do Linux;
 - Os resultados e discussões aprofundadas acerca do protocolo proposto frente a outra proeminente solução denominada Denacast, um sistema baseado no serviço Coolstreaming, porém com suporte a uma arquitetura P2P/CDN; e
 - Os encaminhamentos da pesquisa sobre futuros avanços do estado da arte, tais como as limitações do protocolo proposto e uma breve discussão de como estas poderão ser aprimoradas.

Ademais, 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 de um protocolo de transporte e rede exclusivamente projetado para a distribuição de conteúdos multimídia para a Internet, antes realizada apenas com os protocolos TCP, UDP, DCCP ou outros independentes, disponíveis na camada de aplicação.

Sistema Operacional

uso atual/referência antes

1.7 Publicações

1. **GMTP: A Crossing-layer Optimized Protocol for Large Scale Distribution of Live Multimedia Content over the Internet.** IEEE Transaction on Consumers Eletronics. Qualis A-1 (Engenharia) e A-2 (Computação). JCR 0.942. Versão estendida, a ser publicada. 2013.
2. **About Encouraging Residential Users to Share Upload Bandwidth with CDN/P2P Live Streaming Systems.** 31st IEEE International Conference on Consumer Electronics 2013. Qualis A-2 (Computação). 2013. Referência [149].
3. **Multi(Uni)cast DCCP for Live Content Distribution with P2P Support.** 9th IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2012). Qualis A-1 (Computação). 2012. Referência [121].
4. **Multimedia Content Distribution of Real Time Controlled and Non-reliable Data-grams Between Peers.** 29th IEEE Globecom 2011. 2nd IEEE Workshop on Multimedia Communications & Services. Qualis A-1 (Computação). 2011. Referência [122].
5. **Distribuição de Conteúdo Multimídia em Tempo Real com Transporte de Fluxos Controlados e Não Confiáveis entre Pares.** Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores 2011. VII Workshop de Redes Dinâmicas e Sistemas P2P. 2011. Qualis A-N (Computação). Referência [126].
6. **On the Performance of TCP, UDP and DCCP over 802.11g Networks.** 23rd ACM Symposium on Applied Computing. Qualis A-1 (Computação). 2008. Referência [150].
7. **Avaliação Experimental do Protocolo DCCP para Transmissão de Conteúdos Multimídia em Redes Sem Fio 802.11g e na Internet.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós Graduação em Ciência da Computação. 2008. Referência [123].

1.5.11 e
na página

por
de

1.8 Estrutura do Documento

O restante deste documento está organizado da seguinte forma:

TBD

Bibliografia

- [1] Yonghong Tian, J. Srivastava, Tiejun Huang, and N. Contractor. Social multimedia computing. *Computer*, 43(8):27–36, Aug.
- [2] N. Leavitt. Network-Usage Changes Push Internet Traffic to the Edge. *Computer*, 43(10):13 –15, 10 2010.
- [3] Cisco Systems. The zettabyte era. Technical report, Cisco Systems, 5 2012.
http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.pdf.
- [4] San Murugesan. Understanding web 2.0. *IT Professional*, 9(4):34–41, 2009.
- [5] Kwei-Jay Lin. Building web 2.0. *Computer*, 40(5):101–102, 5 2007.
- [6] Thiago Silva, Jussara M. Almeida, and Dorgival Guedes. Live streaming of user generated videos: Workload characterization and content delivery architectures. *Comput. Netw.*, 55(18):4055–4068, December 2011.
- [7] Redação da TI Inside Online. Tráfego de internet deve crescer 29 % até 2016, 5 2012. <http://www.tiinside.com.br/30/05/2012/trafego-de-internet-deve-crescer-29-ate-2016/ti/280945/news.aspx>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
- [8] Jeremy Scott. Live streaming video is growing by leaps and bounds, 3 2012. <http://www.reelseo.com/live-streaming-video-growing-leaps-bounds/>. Último acesso: 19 de Março de 2013.

-
- [9] Eric Franchi. Live streaming continues momentum with march madness, 3 2009. <http://www.mediapost.com/publications/article/101750/#axzz200qSKoNN>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
 - [10] Marshall Kirkpatrick. The numbers are in, live video online is blowing up, 3 2008. http://readwrite.com/2008/06/05/live_video_big. Último acesso: 19 de Março de 2013.
 - [11] Liz Gannes. The obama inauguration live stream stats, 1 2009. <http://gigaom.com/2009/01/20/the-obama-inauguration-live-stream-stats/>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
 - [12] Y.J. Won, J.W.-K. Hong, Mi-Jung Choi, Chan kyu Hwang, and Jae-Hyoung Yoo. Measurement of download and play and streaming iptv traffic. *Communications Magazine, IEEE*, 46(10):154–161, October.
 - [13] Yanping Zhao, D.L. Eager, and M.K. Vernon. Network bandwidth requirements for scalable on-demand streaming. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 15(4):878–891, Aug.
 - [14] E. Veloso, V. Almeida, W. Meira, A. Bestavros, and Shudong Jin. A hierarchical characterization of a live streaming media workload. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 14(1):133–146, Feb.
 - [15] A. Aurelius, C. Lagerstedt, and M. Kihl. Streaming media over the internet: Flow based analysis in live access networks. In *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 1–6, June.
 - [16] B. Morris and M. Trivedi. Real-time video based highway traffic measurement and performance monitoring. In *Intelligent Transportation Systems Conference, 2007. ITSC 2007. IEEE*, pages 59–64, 30 2007-Oct. 3.
 - [17] Chuan Wu, Baochun Li, and Shuqiao Zhao. On dynamic server provisioning in multichannel p2p live streaming. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 19(5):1317–1330, Oct.

-
- [18] Jameson Berkow. Netflix Proclaimed “King” of North American Internet Use, 5 2011. Último acesso: 19 de Março de 2013.
- [19] Dave Caputo and Tom Donnelly. Global Internet Phenomena Spotlight - Netflix Rising. Technical report, Sandvine Incorporated ULC, 5 2011. http://www.sandvine.com/downloads/documents/05-17-2011_phenomena/Sandvine%20Global%20Internet%20Phenomena%20Spotlight%20-%20Netflix%20Rising.pdf.
- [20] N. Staelens, S. Moens, W. Van den Broeck, I. Marien, B. Vermeulen, P. Lambert, R. Van De Walle, and P. Demeester. Assessing quality of experience of iptv and video on demand services in real-life environments. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 56(4):458–466, Dec.
- [21] P. Brooks and B. Hestnes. User measures of quality of experience: why being objective and quantitative is important. *Network, IEEE*, 24(2):8–13, March-April.
- [22] Bo Li and Hao Yin. Peer-to-peer live video streaming on the internet: issues, existing approaches, and challenges [peer-to-peer multimedia streaming]. *Communications Magazine, IEEE*, 45(6):94–99, June.
- [23] Mu Mu, J. Ishmael, W. Knowles, Mark Rouncefield, N. Race, M. Stuart, and G. Wright. P2p-based iptv services: Design, deployment, and qoe measurement. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 14(6):1515–1527, Dec.
- [24] Darshan Purandare and R. Guha. An alliance based peering scheme for p2p live media streaming. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 9(8):1633–1644, Dec.
- [25] A. Vakali and G. Pallis. Content delivery networks: status and trends. *Internet Computing, IEEE*, 7(6):68–74, nov.-dec. 2003.
- [26] L. Kontothanassis, Ramesh Sitaraman, J. Wein, D. Hong, R. Kleinberg, B. Mancuso, D. Shaw, and D. Stodolsky. A transport layer for live streaming in a content delivery network. *Proceedings of the IEEE*, 92(9):1408–1419, Sept.

- [27] C.D. Cranor, M. Green, C. Kalmanek, D. Shur, S. Sibal, J.E. Van der Merwe, and C.J. Sreenan. Enhanced streaming services in a content distribution network. *Internet Computing, IEEE*, 5(4):66–75, Jul/Aug.
- [28] Dongyan Xu, Sunil Suresh Kulkarni, Catherine Rosenberg, and Heung keung Chai. A cdn-p2p hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution. *Computer Networks*, 44:353–382, 2004.
- [29] Dongyan Xu, SunilSuresh Kulkarni, Catherine Rosenberg, and Heung-Keung Chai. Analysis of a cdn-p2p hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution. *Multimedia Systems*, 11:383–399, 2006.
- [30] Melika Meskovic, Himzo Bajric, and Mladen Kos. Content delivery architectures for live video streaming: Hybrid cdn-p2p as the best option. In *The Fifth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service*, pages 26–32, 2012.
- [31] R. Buyya, A.-M.K. Pathan, J. Broberg, and Z. Tari. A case for peering of content delivery networks. *Distributed Systems Online, IEEE*, 7(10):3–3, Oct.
- [32] Cheng Huang, Angela Wang, Jin Li, and Keith W. Ross. Understanding hybrid cdn-p2p: why limelight needs its own red swoosh. In *Proceedings of the 18th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video, NOSSDAV '08*, pages 75–80, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [33] Kideok Cho, Hakyung Jung, Munyoung Lee, Diko Ko, T.T. Kwon, and Yanghee Choi. How can an isp merge with a cdn? *Communications Magazine, IEEE*, 49(10):156–162, Oct.
- [34] S. M Y Seyyedi and B. Akbari. Hybrid cdn-p2p architectures for live video streaming: Comparative study of connected and unconnected meshes. In *Computer Networks and Distributed Systems (CNDS), 2011 International Symposium on*, pages 175–180, Feb.
- [35] Z. Chen, H. Yin, C. Lin, Y. Chen, and M. Feng. Towards a universal friendly peer-to-peer media streaming: metrics, analysis and explorations. *Communications, IET*, 3(12):1919–1933, December.

- [36] Xuening Liu, Hao Yin, and Chuang Lin. A novel and high-quality measurement study of commercial cdn-p2p live streaming. In *Communications and Mobile Computing, 2009. CMC '09. WRI International Conference on*, volume 3, pages 325–329, Jan.
- [37] Daniel Stutzbach and Reza Rejaie. Understanding churn in peer-to-peer networks. In *Proceedings of the 6th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement, IMC '06*, pages 189–202, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [38] Kunwoo Park, Dukhyun Chang, Junghoon Kim, Wonjun Yoon, and T. Kwon. An analysis of user dynamics in p2p live streaming services. In *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1–6, May.
- [39] Yee-Ting Li, D. Leith, and R.N. Shorten. Experimental evaluation of tcp protocols for high-speed networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 15(5):1109–1122, Oct.
- [40] Douglas E. Comer. *Interligação em Redes com TCP/IP: Princípios, Protocolos e Arquitetura*. ELSEVIER, 2 edition, 9 2004.
- [41] B.A. Miller, T. Nixon, C. Tai, and M.D. Wood. Home networking with universal plug and play. *Communications Magazine, IEEE*, 39(12):104–109, Dec.
- [42] Chi-Chung Cheung, Man-Ching Yuen, and A.C.H. Yip. Dynamic dns for load balancing. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*, pages 962–965, May.
- [43] J. Pan, S. Paul, and R. Jain. A survey of the research on future internet architectures. *Communications Magazine, IEEE*, 49(7):26–36, July.
- [44] C. Severance. Van jacobson: Content-centric networking. *Computer*, 46(1):11–13, Jan.
- [45] Philip Eardley, Michalis Kanakakis, Alexandros Kostopoulos, Tapio Levä, Ken Richardson, and Henna Warma. The future internet. chapter Deployment and adoption of future internet protocols, pages 133–144. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.

- [46] M.F. Bari, S. Chowdhury, R. Ahmed, R. Boutaba, and B. Mathieu. A survey of naming and routing in information-centric networks. *Communications Magazine, IEEE*, 50(12):44–53, December.
- [47] Hongfeng Xu, Zhen Chen, Rui Chen, and Junwei Cao. Live streaming with content centric networking. In *Networking and Distributed Computing (ICNDC), 2012 Third International Conference on*, pages 1–5, Oct.
- [48] Cheng Wanxiang, Shi Peixin, and Lei Zhenming. Network-assisted congestion control. In *Info-tech and Info-net, 2001. Proceedings. ICII 2001 - Beijing. 2001 International Conferences on*, volume 2, pages 28–32.
- [49] Dina Katabi. *Decoupling congestion control and bandwidth allocation policy with application to high bandwidth-delay product networks*. PhD thesis, Cambridge, MA, USA, 2003.
- [50] Dina Katabi, Mark Handley, and Charlie Rohrs. Congestion control for high bandwidth-delay product networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 32(4):89–102, 8 2002.
- [51] Dina Katabi, Mark Handley, and Charlie Rohrs. Congestion control for high bandwidth-delay product networks. In *Proceedings of the 2002 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, SIGCOMM '02*, pages 89–102, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [52] Nandita Dukkkipati. *Rate control protocol (rcp): congestion control to make flows complete quickly*. PhD thesis, Stanford, CA, USA, 2008. AAI3292347.
- [53] Ashvin Lakshmikantha, R. Srikant, Nandita Dukkkipati, Nick McKeown, and Carolyn L. Beck. Buffer sizing results for rcp congestion control under connection arrivals and departures. *Computer Communication Review*, 39(1):5–15, 2009.
- [54] N. Dukkkipati, G. Gibb, N. McKeown, and Jiang Zhu. Building a rcp (rate control protocol) test network. In *High-Performance Interconnects, 2007. HOTI 2007. 15th Annual IEEE Symposium on*, pages 91–98, Aug.

- [55] Yong Xia, L. Subramanian, I. Stoica, and S. Kalyanaraman. One more bit is enough. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 16(6):1281–1294, Dec.
- [56] Huixiang Zhang, Guanzhong Dai, Lei Yao, and Hairui Zhou. Fast convergence of variable-structure congestion control protocol with explicit precise feedback. In FrancoP. Preparata, Xiaodong Wu, and Jianping Yin, editors, *Frontiers in Algorithmics*, volume 5059 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 264–275. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [57] M. Vinodhini and P. Arockia Jansi Rani. Article: Usage of variable structure congestion control protocol (vcp) in buffer overflow attack blocker. *International Journal of Computer Applications*, 39(8):46–52, February 2012. Published by Foundation of Computer Science, New York, USA.
- [58] Huixiang Zhang, Guanzhong Dai, Lei Yao, and Hairui Zhou. Fast convergence of variable-structure congestion control protocol with explicit precise feedback. In *Proceedings of the 2nd annual international workshop on Frontiers in Algorithmics*, FAW '08, pages 264–275, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [59] Xing Guowen and Xue Shengjun. Study on variable-structure congestion control protocol. In *New Trends in Information and Service Science, 2009. NISS '09. International Conference on*, pages 766–769, 30 2009-July 2.
- [60] B. Briscoe, R. Woundy, and A. Cooper. Congestion exposure (conex) concepts and use cases, 12 2012. <http://www.ietf.org/rfc/rfc6789.txt>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
- [61] Marcelo Bagnulo and Nandita Dukkupati. Congestion exposure group, 6 2010. <https://datatracker.ietf.org/doc/charter-ietf-conex/>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
- [62] H. Balakrishnan, N. Dukkupati, N. McKeown, and C.J. Tomlin. Stability analysis of explicit congestion control protocols. *Communications Letters, IEEE*, 11(10):823–825, October.

- [63] Nandita Dukkkipati, Masayoshi Kobayashi, Rui Zhang-Shen, and Nick McKeown. Processor sharing flows in the internet. In *Proceedings of the 13th international conference on Quality of Service, IWQoS'05*, pages 271–285, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer-Verlag.
- [64] Nandita Dukkkipati and Nick McKeown. Why flow-completion time is the right metric for congestion control. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 36(1):59–62, January 2006.
- [65] F. Bronzino, R. Gaeta, M. Grangetto, and G. Pau. An adaptive hybrid cdn/p2p solution for content delivery networks. In *Visual Communications and Image Processing (VCIP), 2012 IEEE*, pages 1–6, Nov.
- [66] Zhonghua Wei and Jianping Pan. Modeling BitTorrent-Based P2P video streaming systems in the presence of NAT devices. In *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–5. IEEE, June 2011.
- [67] R Rodrigues and P Druschel. Peer-to-peer streaming systems. *Communications of the ACM*, 53(10):3–39, 2010.
- [68] Hao Yin, Xuening Liu, Tongyu Zhan, Vyas Sekar, Feng Qiu, Chuang Lin, Hui Zhang, and Bo Li. Design and deployment of a hybrid cdn-p2p system for live video streaming: experiences with livesky. In *Proceedings of the 17th ACM international conference on Multimedia, MM '09*, pages 25–34, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [69] Sachin Agarwal, Jatinder Pal Singh, Aditya Mavlankar, Pierpaolo Bacchichet, and Bernd Girod. Performance of P2P live video streaming systems on a controlled test-bed. In *Proceedings of the 4th International Conference on Testbeds and research infrastructures for the development of networks & communities, TridentCom '08*, pages 6:1–6:10, Innsbruck, Austria, 2008. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). ACM ID: 1390584.
- [70] Laurent Massouli and Andrew Twigg. Rate-optimal schemes for Peer-to-Peer live streaming. *Perform. Eval.*, 65(11-12):804–822, November 2008. ACM ID: 1453585.

- [71] Thomas Locher, Remo Meier, Stefan Schmid, and Roger Wattenhofer. Push-to-Pull Peer-to-Peer live streaming. In Andrzej Pelc, editor, *Distributed Computing*, volume 4731, pages 388–402. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [72] S. Venot and Lu Yan. Peer-to-Peer media streaming application survey. In *International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, 2007. UBICOMM '07*, pages 139–148. IEEE, November 2007.
- [73] Chao Liang, Yang Guo, and Yong Liu. Hierarchically clustered P2P streaming system. In *IEEE GLOBECOM 2007-2007 IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 236–241, Washington, DC, USA, November 2007.
- [74] Qi Huang, Hai Jin, Ke Liu, Xiaofei Liao, and Xuping Tu. Anysee2: an auto load balance P2P live streaming system with hybrid architecture. In *Proceedings of the 2nd international conference on Scalable information systems*, InfoScale '07, pages 30:1–30:2, Suzhou, China, 2007. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). ACM ID: 1366843.
- [75] Qi Huang, Hai Jin, and Xiaofei Liao. P2P live streaming with Tree-Mesh based hybrid overlay. In *International Conference on Parallel Processing Workshops, 2007. ICPPW 2007*, pages 55–55. IEEE, September 2007.
- [76] Xinyan Zhang, Jiangchuan Liu, Bo Li, and Y. -S.P Yum. CoolStreaming/DONet: a data-driven overlay network for peer-to-peer live media streaming. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 3, pages 2102– 2111 vol. 3. IEEE, March 2005.
- [77] Meng Zhang, Li Zhao, Yun Tang, Jian-Guang Luo, and Shi-Qiang Yang. Large-scale live media streaming over peer-to-peer networks through global internet. In *Proceedings of the ACM workshop on Advances in peer-to-peer multimedia streaming*, P2PMMS'05, pages 21–28, Hilton, Singapore, 2005. ACM. ACM ID: 1099388.
- [78] Hideki Otsuki and Takashi Egawa. A retransmission control algorithm for Low-Latency UDP stream on StreamCode-Base active networks. In Naoki Wakamiya,

- Marcin Solarski, and James Sterbenz, editors, *Active Networks*, volume 2982, pages 92–102. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [79] Miguel Castro, Peter Druschel, Anne-Marie Kermarrec, Animesh Nandi, Antony Rowstron, and Atul Singh. SplitStream: high-bandwidth multicast in cooperative environments. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, 37(5):298–313, October 2003. ACM ID: 945474.
- [80] Yaning Liu, Hongbo Wang, Yu Lin, Shiduan Cheng, and G. Simon. Friendly P2P: Application-Level congestion control for Peer-to-Peer applications. In *IEEE Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008*, pages 1–5. IEEE, December 2008.
- [81] T. K Yan and H. P Dommel. Multimedia-Aware congestion control for video streaming over the internet. In *Second International Conference on Digital Telecommunications, 2007. ICDT '07*, pages 6–6. IEEE, July 2007.
- [82] Emir Mulabegovic, Dan Schonfeld, and Rashid Ansari. Lightweight streaming protocol (LSP). In *Proceedings of the tenth ACM international conference on Multimedia, MULTIMEDIA '02*, pages 227–230, Juan-les-Pins, France, 2002. ACM. ACM ID: 641051.
- [83] Fabio Pianese. A survey of p2p data-driven live streaming systems. *Streaming Media Architectures, Techniques, and Applications: Recent Advances*, 1:295–310, 10 2011.
- [84] Chuan Wu, Baochun Li, and Shuqiao Zhao. Diagnosing network-wide p2p live streaming inefficiencies. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 2731–2735, April.
- [85] Xiangyang Zhang and Hossam Hassanein. Survey a survey of peer-to-peer live video streaming schemes - an algorithmic perspective. *Comput. Netw.*, 56(15):3548–3579, October 2012.
- [86] A. Mansy and M. Ammar. Analysis of adaptive streaming for hybrid cdn/p2p live video systems. In *Network Protocols (ICNP), 2011 19th IEEE International Conference on*, pages 276–285, Oct.

- [87] Yishuai Chen, Baoxian Zhang, and Changjia Chen. Modeling and performance analysis of p2p live streaming systems under flash crowds. In *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–5, June.
- [88] Bo Li, Susu Xie, G.Y. Keung, Jiangchuan Liu, I. Stoica, Hui Zhang, and Xinyan Zhang. An empirical study of the coolstreaming+ system. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 25(9):1627–1639, December.
- [89] Jeff Seibert, David Zage, Sonia Fahmy, and Cristina Nita-Rotaru. Experimental comparison of peer-to-peer streaming overlays: An application perspective. In *33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 20–27, Washington, DC, USA, October 2008. IEEE Computer Society.
- [90] Yang Guo, Chao Liang, and Yong Liu. A survey on peer-to-peer video streaming systems. *PeertoPeer Networking and Applications*, 1(1):18–28, 2008.
- [91] E. Setton, P. Baccichet, and B. Girod. Peer-to-peer live multicast: A video perspective. *Proceedings of the IEEE*, 96(1):25–38, Jan.
- [92] Yao Liu, L. Guo, Fei Li, and Songqing Chen. A case study of traffic locality in internet p2p live streaming systems. In *Distributed Computing Systems, 2009. ICDCS '09. 29th IEEE International Conference on*, pages 423–432, June.
- [93] Chuan Wu, Baochun Li, and Shuqiao Zhao. Exploring large-scale peer-to-peer live streaming topologies. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, 4(3):19:1–19:23, 9 2008.
- [94] N. Magharei, R. Rejaie, and Yang Guo. Mesh or multiple-tree: A comparative study of live p2p streaming approaches. In *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pages 1424–1432, 5 2007.
- [95] V. Gopalakrishnan, B. Bhattacharjee, K.K. Ramakrishnan, R. Jana, and D. Srivastava. Cpm: Adaptive video-on-demand with cooperative peer assists and multicast. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 91 –99, april 2009.

- [96] Rosario G. Garroppo, Stefano Giordano, Stella Spagna, Saverio Niccolini, and Jan Seedorf. Topology control strategies on p2p live video streaming service with peer churning. *Comput. Commun.*, 35(6):759–770, 3 2012.
- [97] Constantinos Vassilakis and Ioannis Stavrakakis. Minimizing node churn in peer-to-peer streaming. *Comput. Commun.*, 33(14):1598–1614, September 2010.
- [98] Y. Sakata, K. Takayama, R. Endo, and H. Shigeno. A chunk scheduling based on chunk diffusion ratio on p2p live streaming. In *Network-Based Information Systems (NBIS), 2012 15th International Conference on*, pages 74–81, Sept.
- [99] Liang Dai, Yanchuan Cao, Yi Cui, and Yuan Xue. On scalability of proximity-aware peer-to-peer streaming. *Comput. Commun.*, 32(1):144–153, January 2009.
- [100] S. Tang, H. Wang, and P. Van Mieghem. The effect of peer selection with hopcount or delay constraint on peer-to-peer networking. In *Proceedings of the 7th international IFIP-TC6 networking conference on AdHoc and sensor networks, wireless networks, next generation internet, NETWORKING'08*, pages 358–365, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [101] Nianwang Liu, Zheng Wen, K.L. Yeung, and Zhibin Lei. Request-peer selection for load-balancing in p2p live streaming systems. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*, pages 3227–3232, April.
- [102] Yan Chen, Beibei Wang, W.S. Lin, Yongle Wu, and K.J.R. Liu. Cooperative peer-to-peer streaming: An evolutionary game-theoretic approach. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 20(10):1346–1357, Oct.
- [103] J. Seedorf, S. Kiesel, and M. Stiernerling. Traffic localization for p2p-applications: The alto approach. In *Peer-to-Peer Computing, 2009. P2P '09. IEEE Ninth International Conference on*, pages 171–177, Sept.
- [104] M. Shibuya, Y. Hei, and T. Ogishi. Isp-friendly peer selection mechanism with alto-like server. In *Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2011 13th Asia-Pacific*, pages 1–8, Sept.

- [105] Harsha V. Madhyastha, Ethan Katz-Bassett, Thomas Anderson, Arvind Krishnamurthy, and Arun Venkataramani. iplane nano: path prediction for peer-to-peer applications. In *Proceedings of the 6th USENIX symposium on Networked systems design and implementation*, NSDI'09, pages 137–152, Berkeley, CA, USA, 2009. USENIX Association.
- [106] Sachin Agarwal, Jatinder Pal Singh, and Shruti Dube. Analysis and implementation of gossip-based p2p streaming with distributed incentive mechanisms for peer cooperation. *Adv. MultiMedia*, 2007(1):8:1–8:12, 4 2007.
- [107] Jaeok Park and M. Van der Schaar. A game theoretic analysis of incentives in content production and sharing over peer-to-peer networks. *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, 4(4):704–717, Aug.
- [108] Sachin Agarwal and Shruti Dube. Gossip based streaming with incentives for peer collaboration. In *Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Multimedia*, ISM '06, pages 629–636, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [109] A. Habib and J. Chuang. Incentive mechanism for peer-to-peer media streaming. In *Quality of Service, 2004. IWQOS 2004. Twelfth IEEE International Workshop on*, pages 171–180, June.
- [110] Tzu-Ming Wang, Wei-Tsong Lee, Tin-Yu Wu, Hsin-Wen Wei, and Yu-San Lin. New p2p sharing incentive mechanism based on social network and game theory. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2012 26th International Conference on*, pages 915–919, March.
- [111] YangBin Tang, Huaimin Wang, and Wen Dou. Trust based incentive in p2p network. In *E-Commerce Technology for Dynamic E-Business, 2004. IEEE International Conference on*, pages 302–305, Sept.
- [112] Kyuyong Shin, D.S. Reeves, and Injong Rhee. Treat-before-trick : Free-riding prevention for bittorrent-like peer-to-peer networks. In *Parallel Distributed Processing, 2009. IPDPS 2009. IEEE International Symposium on*, pages 1–12, May.

- [113] Yuling Li, Yuhua Liu, Kaihua Xu, and Wei Chen. Analysis and balanced mechanism on free-rider in p2p network. In *Computer Modeling and Simulation, 2010. ICCMS '10. Second International Conference on*, volume 4, pages 462–466, Jan.
- [114] S. Sanghavi and B. Hajek. A new mechanism for the free-rider problem. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 53(5):1176–1183, June.
- [115] Alex Borges Vieira and Sergio Vale Aguiar Campos. *Transmissão de mídia contínua ao vivo em P2P: modelagem, caracterização e implementação de mecanismo de resiliência a ataques*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 3 2010. <http://dspace.lcc.ufmg.br/dspace/handle/1843/SLSS-85BNKG>.
- [116] Hao Yin, Chuang Lin, Qian Zhang, Zhijia Chen, and Dapeng Wu. Truststream: A secure and scalable architecture for large-scale internet media streaming. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 18(12):1692–1702, 12 2008.
- [117] M. Brinkmeier, G. Schafer, and T. Strufe. Optimally dos resistant p2p topologies for live multimedia streaming. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 20(6):831–844, June.
- [118] M. Abdalla, Y. Shavitt, and A. Wool. Key management for restricted multicast using broadcast encryption. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 8(4):443–454, Aug.
- [119] Eddie Kohler, Mark Handley, and Sally Floyd. Designing DCCP: Congestion Control Without Reliability. In *SIGCOMM '06: Proceedings of the 2006 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 27–38, New York, NY, USA, 2006. ACM Press.
- [120] Eddie Kohler, Mark Handley, and Sally Floyd. Datagram Congestion Control Protocol (DCCP), 3 2006. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4340.txt>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
- [121] L.M. de Sales, R. de Amorim Silva, H.O. Almeida, and A. Perkusich. Multi(uni)cast dccp for live content distribution with p2p support. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*, pages 3253–3258, April.

- [122] Leandro Melo de Sales, Hyggo Oliveira, and Angelo Perkusich. Multimedia content distribution of real time controlled and non-reliable datagrams between peers. In *Proceedings of IEEE Globecom 2011. 2nd IEEE Workshop on Multimedia Communications & Services*, volume 1, pages 131–146, 5 2011.
- [123] Leandro Melo de Sales. Avaliação Experimental do Protocolo DCCP para Transmissão de Conteúdos Multimídia em Redes Sem Fio 802.11g e na Internet. Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande, 4 2008.
- [124] Garrett Hardin. The Tragedy of the Commons. *Science*, 162(3859):1243 – 1248, 3 1968.
- [125] Dah-Ming Chiu and Raj Jain. Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks. *Comput. Netw. ISDN Syst.*, 17(1):1–14, June 1989.
- [126] Leandro Melo de Sales, Hyggo Oliveira, Angelo Perkusich, and Rafael A. Silva. Distribuição de conteúdo multimídia em tempo real com transporte de fluxos controlados e não confiáveis entre pares. In *Proceedings of Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores 2011. VII Workshop de Redes Dinâmicas e Sistemas P2P*, volume 1, pages 131–146, 5 2011. http://sbrc2011.facom.ufms.br/files/workshops/wp2p/ST04_1.pdf.
- [127] J. R. Iyengar, P. D. Amer, and R. Stewart. Concurrent multipath transfer using SCTP multihoming over independent End-to-End paths. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 14(5):951–964, October 2006.
- [128] C. -M Huang and M. -S Lin. Multimedia streaming using partially reliable concurrent multipath transfer for multihomed networks. *IET Communications*, 5(5):587–597, March 2011.
- [129] K. Tan, J. Song, Q. Zhang, and M. Sridharan. A compound tcp approach for high-speed and long distance networks. In *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pages 1 –12, april 2006.

- [130] M. Goutelle, Y. Gu, and E. He. A Survey of Transport Protocols other than Standard TCP, 4 2004. <http://www.gridforum.org/documents/GFD.55.pdf>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
- [131] Sally Floyd, Mark Handley, Jitendra Padhye, and Jörg Widmer. Equation-Based Congestion Control for Unicast Applications. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 30(4):43–56, October 2000.
- [132] Sangtae Ha, Injong Rhee, and Lisong Xu. Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, 42:64–74, July 2008.
- [133] Sally Floyd. Highspeed tcp for large congestion windows, 12 2003. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3649.txt>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
- [134] I. Abdeljaouad, H. Rachidi, S. Fernandes, and A. Karmouch. Performance analysis of modern tcp variants: A comparison of cubic, compound and new reno. In *Communications (QBSC), 2010 25th Biennial Symposium on*, pages 80 –83, may 2010.
- [135] Cheng Peng Fu and Soung C. Liew. TCP Veno: TCP Enhancement for Transmission Over Wireless Access Networks. volume 21, pages 216–228, 2 2003.
- [136] L.S. Brakmo and L.L. Peterson. Tcp vegas: end to end congestion avoidance on a global internet. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 13(8):1465–1480, Oct.
- [137] G. Carofiglio, L. Muscariello, D. Rossi, and C. Testa. A hands-on assessment of transport protocols with lower than best effort priority. In *Local Computer Networks (LCN), 2010 IEEE 35th Conference on*, pages 8–15, Oct.
- [138] D. Rossi, C. Testa, S. Valenti, and L. Muscariello. Ledbat: The new bittorrent congestion control protocol. In *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2010 Proceedings of 19th International Conference on*, pages 1–6, Aug.
- [139] Jeng-Yuh Chang and Xiao Su. An evaluation of transport protocols in peer-to-peer media streaming. In *Networking, Architecture, and Storage, 2008. NAS '08. International Conference on*, pages 241 –247, june 2008.

- [140] E. Brosh, S. A. Baset, V. Misra, D. Rubenstein, and H. Schulzrinne. The Delay-Friendliness of TCP for Real-Time traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 18(5):1478–1491, October 2010.
- [141] V. Lucas, J. -J. Pansiot, D. Grad, and B. Hilt. Fair multicast congestion control (M2C). In *IEEE INFOCOM Workshops 2009*, pages 1–6. IEEE, April 2009.
- [142] Ju-Won Park, Jong Won Kim, and R. P. Karrer. TCP-ROME: a Transport-Layer approach to enhance quality of experience for online media streaming. In *16th International Workshop on Quality of Service, 2008. IWQoS 2008*, pages 249–258. IEEE, June 2008.
- [143] Hala ElAarag, Andrew Moedinger, and Chris Hogg. TCP friendly protocols for media streams over heterogeneous wired-wireless networks. *Comput. Commun.*, 31(10):2242–2256, June 2008. ACM ID: 1380037.
- [144] R. Stewart, J. Stone, D. Otis, K. Morneault, H. Schwarzbauer, T. Taylor, I. Rytina, M. Kalla, L. Zhang, and V. Paxson. Stream Control Transmission Protocol (SCTP), 9 2007. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4960.txt>. Último acesso: 19 de Março de 2013.
- [145] Lin Ma and Wei Tsang Ooi. Congestion control in distributed media streaming. In *IEEE INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 1397–1405. IEEE, May 2007.
- [146] Yongxiang Liu, K. N. Srijith, L. Jacob, and A. L. Ananda. TCP-CM: a transport protocol for TCP-friendly transmission of continuous media. In *Performance, Computing, and Communications Conference, 2002. 21st IEEE International*, pages 83–91. IEEE, 2002.
- [147] Jack Brassil and Henning Schulzrinne. Structuring internet media streams with cueing protocols. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 10(4):466–476, August 2002. ACM ID: 581865.
- [148] A. Banerjea, D. Ferrari, B. A. Mah, M. Moran, D. C. Verma, and Hui Zhang. The tenet real-time protocol suite: design, implementation, and experiences. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(1):1–10, February 1996.

-
- [149] L.M. de Sales, H.O. Almeida, A. Perkusich, and K. Gorgonio. About encouraging residential users to share upload bandwidth with cdn/p2p live streaming systems. In *International Conference on Consumers Electronics (ICCE), 2013 IEEE*, pages 3253–3258, Jan.
- [150] Leandro Melo de Sales, Hyggo O. Almeida, Angelo Perkusich, and Marcello Sales Jr. On the Performance of TCP, UDP and DCCP over 802.11g Networks. In *Proceedings of the SAC 2008 23rd ACM Symposium on Applied Computing Fortaleza, CE*, pages 2074–2080, 1 2008.