

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

GMTP: Um Protocolo Assistido pela Rede para  
Distribuição de Conteúdos Multimídia Ao  
Vivo com suporte às 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

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Global Media Transmission Protocol (GMTP)</b>                   | <b>1</b> |
| 1.1      | Visão Geral do GMTP . . . . .                                      | 3        |
| 1.1.1    | Terminologias e Convenções . . . . .                               | 5        |
| 1.1.2    | Arquitetura . . . . .  | 8        |
| 1.1.3    | GMTP Intra e GMTP Inter . . . . .                                  | 8        |
| 1.1.4    | Principais funções do GMTP . . . . .                               | 10       |
| 1.1.5    | Canais de Comunicação . . . . .                                    | 11       |
| 1.1.6    | Tipos de Pacotes . . . . .   | 13       |
| 1.2      | Definições, Relações e Restrições do GMTP . . . . .                | 14       |
| 1.3      | Constituição da Rede de Favores $\eta$ . . . . .                   | 18       |
| 1.3.1    | Registro de participação de $r_d$ em $\eta$ . . . . .              | 18       |
| 1.3.2    | Seleção de Nós . . . . .   | 21       |
| 1.3.3    | Sobre o melhor caminho $W_j$ . . . . .                             | 26       |
| 1.4      | Distribuição de $P$ em $\eta$ . . . . .                            | 27       |
| 1.4.1    | Indexação de Conteúdo . . . . .                                    | 28       |
| 1.4.2    | Estabelecimento de conexão e compartilhamento para obter $P$ . . . | 29       |
| 1.4.3    | Fase 1: primeira requisição a um fluxo $P$ . . . . .               | 29       |
| 1.4.4    | Fase 2: próximas requisições para obter $P$ . . . . .              | 31       |
| 1.4.5    | Fase 3: busca por mais parceiros $r_d$ para obter $P$ . . . . .    | 31       |
| 1.4.6    | Compartilhamento de $P$ entre $s_a$ . . . . .                      | 32       |
| 1.4.7    | Envio e recebimento de $p_x \in P$ em $\eta$ . . . . .             | 34       |
| 1.5      | Controle de Congestionamento em $\eta$ . . . . .                   | 40       |
| 1.5.1    | Controle de Congestionamento Unicast . . . . .                     | 41       |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.5.2 | Controle de Congestionamento Multicast . . . . .                     | 45 |
| 1.6   | Outras considerações sobre o GMTP . . . . .                          | 48 |
| 1.6.1 | Procedimentos para desconexão de nós $c_f$ , $l_w$ e $r_d$ . . . . . | 49 |
| 1.6.2 | Eleição de nós $l_w$ . . . . .                                       | 50 |
| 1.6.3 | Segurança . . . . .  | 50 |
| 1.7   | Sumário do Capítulo . . . . .  | 51 |

# Lista de Símbolos

3WHS - *Three Way Hand Shake*

BSD - *Berkley Software Distribution*

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*

POSIX - *Portable Operating System Interface*

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  | Analogia do Princípio da Cooperação de Brigadas utilizado no GMTP para distribuição de conteúdos multimídia ao vivo. . . . .   | 3  |
| 1.2  | Cenário global de atuação do GMTP. . . . .   | 4  |
| 1.3  | Rede de sobreposição construída pelo GMTP . . . . .  | 6  |
| 1.4  | Tipos de Nós e modos de conexões do GMTP. . . . .  | 7  |
| 1.5  | Arquitetura do Protocolo GMTP. . . . .   | 9  |
| 1.6  | Tela da ferramenta de administração do OpenWRT [1] com suporte ao GMTP. Nessa tela, permitir que o administrador do roteador configure registros de participação em uma ou mais redes CDN. . . . . | 10 |
| 1.7  | Um usuário precisa descobrir e selecionar seus parceiros. . . . .  | 21 |
| 1.8  | Cenário e passos para seleção de nós intra caminhos $W_j$ . . . . .  | 22 |
| 1.9  | Cenário e passos para seleção de nós por interseção de caminhos $W_j$ . . . . .  | 23 |
| 1.10 | Cenário e passos para seleção de nós por combinação de caminhos $W_j$ . . . . .  | 24 |
| 1.11 | Processo Básico de Estabelecimento de Conexão do GMTP. . . . .   | 30 |
| 1.12 | Fase 3 de conexão do GMTP (Passo 1). . . . .   | 33 |
| 1.13 | Fase 3 de conexão do GMTP (Passo 2). . . . .   | 34 |
| 1.14 | Exemplo da estrutura do buffer de envio e recepção de um nó GMTP com tamanho de $17 p_x$ . . . . .   | 36 |
| 1.15 | Exemplo do mapa de buffer de um nó GMTP com tamanho de $17 p_x$ . . . . .  | 36 |
| 1.16 | Organização do algoritmo de controle de congestionamento no GMTP. . . . .  | 41 |
| 1.17 | Um nó $r_d$ mal-intencionados podem poluir o sistema com conteúdos alterados. . . . .  | 51 |



# **Lista de Tabelas**

# Capítulo 1

## Global Media Transmission Protocol (GMTP)

O *Global Media Transmission Protocol* (GMTP) é um protocolo de rede que atua nas camadas de transporte e de rede (*crossing-layer*) projetado para operar na Internet, a ser utilizado em sistemas de distribuição de fluxos de dados multimídia ao vivo. Trata-se de um protocolo baseado em uma arquitetura híbrida P2P/CDN, onde os dados de um ou mais sistemas são transmitidos através de uma rede de pares P2P, onde os nós cooperam entre si a fim de obterem um conteúdo multimídia de interesse ao mesmo tempo que ocorrem interações entre os servidores de uma ou mais redes CDN, os quais atuam como super nós para a rede P2P, auxiliando-os no envio e recebimento dos fluxos de dados de eventos ao vivo. À medida que recebe um determinado fluxo de dados de um evento ao vivo, os nós cliente reproduzem tal conteúdo para o usuário final, através de um processo em execução na camada de aplicação, ao passo que o roteador de sua rede realiza parcerias com outros roteadores os quais possuem nós clientes também interessados no mesmo conteúdo a fim de reproduzi-lo aos seus usuários finais.

As trocas de dados entre nós GMTP ocorrem por meio do envio e recebimento de pequenas partes do conteúdo de uma mídia, que são transmitidas por diferentes nós da rede, constituindo um fluxo de datagramas IP. Estes fluxos são transmitidos em modo *multicast* ou em múltiplos fluxos *unicast* compartilhados (multi-unicast), realizando-se controle de congestionamento sem garantia de entrega. A escolha do modo de transmissão utilizado para disseminar um determinado conteúdo ocorre automaticamente, ou seja, sem a influência da

aplicação que, simplesmente “sintoniza” sua conexão em um determinado canal definido pelo roteador, correspondente ao fluxo de dados de interesse do usuário final. Tal abstração para a camada de aplicação ocorre de modo que os processos em execução utilizam o GMTP através de uma API compatível com as especificações de socket BSD e POSIX.

Por conseguinte, o GMTP permite o estabelecimento de conexões entre diversas aplicações, executadas de forma distribuída em cada sistema final, tornando-as compatíveis entre si, uma vez que o protocolo desacopla a forma como os dados são transportados da forma como estes são exibidos ao usuário final, emulando os sistemas tradicionais de TV e rádio. Assim, promove-se a integração do GMTP em aplicações já existentes, consideradas futuras adoções, ao tempo que permite-se a utilização dos novos recursos introduzidos no protocolo, evitando-se a complexidade de construção dos sistemas de transmissão de fluxos de dados de eventos ao vivo.

Nas próximas seções deste capítulo, detalha-se o funcionamento do GMTP, conforme a seguinte organização:

- Na Seção 1.1, apresenta-se uma visão geral do protocolo, como cenário de atuação, arquitetura, canais de comunicação e tipos de nós e pacotes.
- Na Seção 1.2, formaliza-se as definições e restrições do protocolo, que serão utilizadas nas seções subsequentes.
- Na Seção 1.3, descreve-se o processo de constituição da rede de favores, bem como aspectos de conexão multi-ponto através da introdução de um novo conceito de sockets P2P. Detalham-se os aspectos inerantes à constituição de uma rede P2P, tais como o registro de participação de um nó e o processo de seleção de nós parceiros.
- Na Seção 1.4, discute-se sobre aspectos de transmissão e recepção de fluxos de dados, com os algoritmos utilizados para compartilhar um fluxos de dados e as estratégias de disponibilização e obtenção das partes de uma mídia.
- Na Seção 1.5, apresentam-se detalhes de funcionamento dos algoritmos de controle de congestionamento utilizados no GMTP.
- E, por fim, na Seção 1.6, apresentam-se outros aspectos relacionados ao GMTP, tais

como finalização de conexão, tolerância à desconexão, eleição de nós relatores e segurança.

## 1.1 Visão Geral do GMTP

O GMTP é composto por dois módulos chamados de *GMTP Intra* e *GMTP Inter*, que operam na camada de transporte e de rede, respectivamente. O *GMTP Intra* fornece serviços às aplicações de rede a fim de abstrair a complexidade na execução de tarefas comuns a qualquer sistema, tais como conexão multi-ponto, multiplexação/demultiplexação de segmentos IP e controle de congestionamento. O *GMTP Inter* é responsável por constituir uma rede de sobreposição P2P composta por roteadores, os quais funcionam como pontes de acesso aos servidores de uma rede CDN. Sendo assim, para viabilizar a disseminação de conteúdos multimídia, emprega-se o Princípio da Cooperação de Brigadas de Incêndio (*Fire Bucket Brigade Principle*), onde cada nó roteador de um caminho constituído entre o servidor que transmite a mídia e o cliente interessado em obtê-la, pode replicar o conteúdo sendo roteado para os clientes conectados diretamente a ele e assim sucessivamente, análogo a ilustração da Figura 1.1. No caso do GMTP, é como se cada roteador fosse responsável por apagar os focos de incêndio próximos a ele, ou melhor, atender a demanda dos clientes diretamente conectados a ele, ao passo que ajuda os outros a fazer o mesmo.



Figura 1.1: Analogia do Princípio da Cooperação de Brigadas utilizado no GMTP para distribuição de conteúdos multimídia ao vivo.

Na Figura 1.2, observa-se o cenário global de atuação do protocolo GMTP, onde ilustram-se os nós *Clientes GMTP* interessados em obter o conteúdo de um determinado evento ao vivo. Neste caso, observa-se também um *Servidor GMTP*, que está conectado a uma rede CDN e atua como fonte geradora de dados. Na prática, os nós *Clientes GMTP* são aplicações de rede capazes de iniciar uma sessão GMTP, que transmitem, recebem e reproduzem

dados multimídia de um determinado evento. Os nós *Clientes GMTP* estão conectados a um nó *Repassador GMTP*, que é executado em um roteador de rede e, junto com outros nós *Repassadores GMTP*, efetivamente constituem a rede de sobreposição P2P. Os *Repassadores GMTP* também podem se conectar a um ou mais *Servidores GMTP*. Os *Servidores GMTP* são as fontes de conteúdos multimídia, obtidos através de três formas: i) diretamente a partir de uma unidade geradora de conteúdo (filmadora e/ou microfone); ii) a partir de um *Cliente GMTP*; e/ou iii) a partir de outro *Servidor GMTP* (troca de dados entre os servidores da CDN). Os *Servidores GMTP* recebem sinalizações de controle contendo requisições dos nós *Repassadores GMTP*, que ao receberem uma resposta correspondente a sua requisição, atendem a demanda de um ou mais nós *Clientes GMTP*.

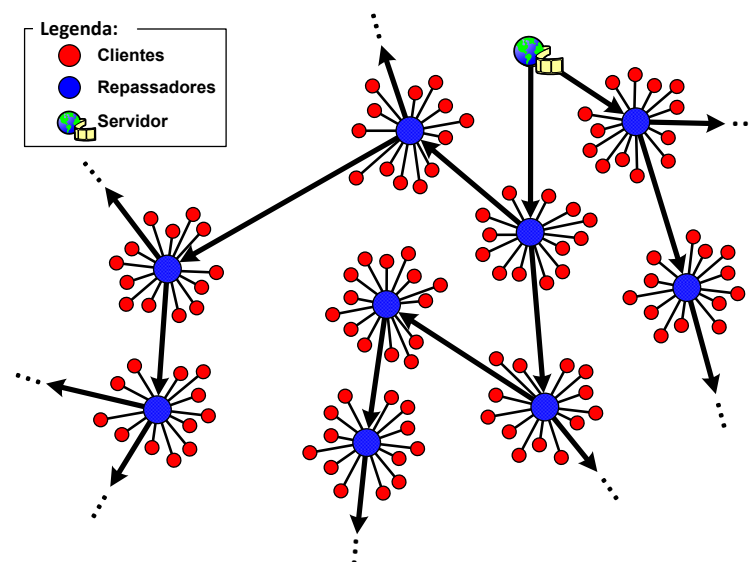


Figura 1.2: Cenário global de atuação do GMTP.

Quando um nó *Cliente GMTP* deseja reproduzir um determinado evento, este envia uma requisição destinada ao nó *Servidor GMTP* que está transmitindo o conteúdo de interesse, como atualmente acontece em qualquer conexão na Internet. A diferença é que um pedido de conexão é interceptado por algum nó *Repassador GMTP* durante o trajeto do pedido de conexão até o nó *Servidor GMTP*, que então determina os melhores parceiros para atendê-la. Em geral, isto ocorre já no roteador de borda do *Cliente GMTP*, que funciona como nó *Repassador GMTP* de origem. Caso o nó *Repassador GMTP* não encontre nenhum nó parceiro capaz repassar a mídia de interesse, este encaminha tal requisição ao nó *Servidor GMTP* que transmite a mídia correspondente. Em todo caso, sempre o nó *Repassador GMTP* de ori-

gem assumirá o controle da requisição do *Cliente GMTP*, habilitando-se como candidato a parceiro para outros nós *Repassadores GMTP*, quando motivados por requisições originadas pelos seus *Clientes GMTP*.

O posicionamento dos nós *Repassadores GMTP* e suas habilidades permitem a redução do número de fluxos de dados correspondente a um mesmo evento. Além disso, permite-se uma maior escalabilidade do número de nós *Clientes GMTP* interessado em receber um mesmo fluxo de dados. Por este mesmo motivo, o protocolo GMTP é flexível para permitir que um nó *Repassador GMTP* atue somente encaminhando conteúdos multimídias entre duas ou mais redes distintas, mesmo que este não esteja conectado a nenhum nó *Cliente GMTP* interessado por tal conteúdo. Desta forma, maximiza-se o uso de canais de transmissão ociosos, em particular das redes residenciais, as quais seus usuários muitas vezes estão ausentes e portanto sem fazer uso dos recursos disponíveis, não necessitando, inclusive, manter um determinado computador da sua rede interna ativo (ligado), como é obrigatório em todas as outras soluções similares e baseadas em arquitetura P2P.

Pelo princípio da cooperação de brigadas empregado no GMTP, as requisições de conexão podem ser originados não apenas por nós *Clientes GMTP* para seu respectivo nó *Repassador GMTP*, mas também as requisições podem ocorrer entre nós *Repassadores GMTP* que, motivados pelos interesses dos seus nós *Clientes GMTP*, podem formar parcerias entre si. Isto significa que um nó *Repassador GMTP* pode agir como se fosse um nó *Servidor GMTP*, respondendo às requisições originadas por seus nós *Clientes GMTP* ou de outros nós *Repassadores GMTP*, como se a requisição estivesse alcançado o *Servidor GMTP* que oficialmente transmite o conteúdo, o que ocorre de forma transparente para a aplicação.

Na Figura 1.3, observam-se detalhes do cenário supracitado, introduzindo-se o conceito de um grupo especial de nós chamados de nós *Relatores GMTP*. Estes nós são responsáveis por enviar relatórios periódicos sobre o estado da transmissão ao seu nó *Repassador GMTP*, que os utiliza para regular a taxa de transmissão de um ou mais fluxos de dados, impedindo-se que a rede entre em colapso de congestionamento.

### 1.1.1 Terminologias e Convenções

Nesta seção, apresentam-se algumas definições, terminologias e convenções utilizadas no restante deste documento, de acordo com a Figura 1.4.

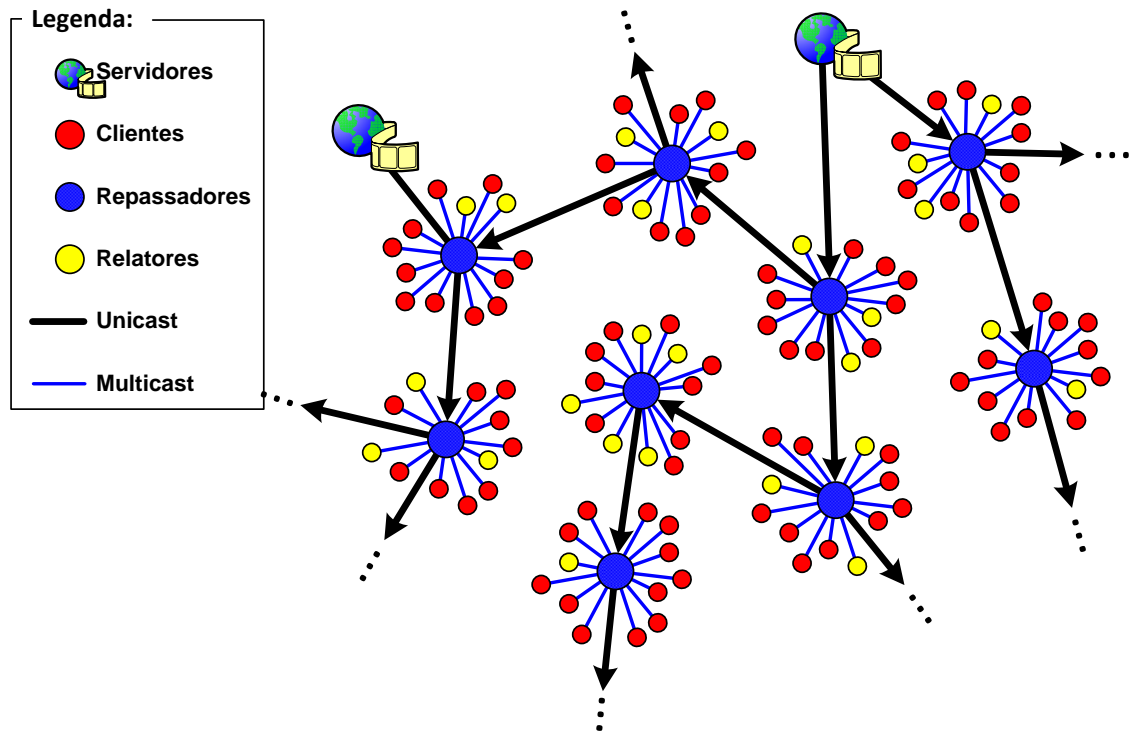


Figura 1.3: Rede de sobreposição construída dinamicamente pelo GMTP com a presença de nós repassadores e relatores.

#### Tipos de Nós:

- Nó GMTP ou Processador GMTP:** qualquer processador de rede que implementa o protocolo GMTP. É um sistema computacional que implementa parte ou todo do protocolo GMTP, sendo capaz de interpretar os cabeçalhos dos pacotes definidos pelo GMTP e realizar ações pré-definidas. Não há restrições de qual tipo de processador de rede pode implementar qual(is) parte(s) do GMTP.
- Cliente GMTP:** é um *nó GMTP* capaz de reproduzir e gerar conteúdos multimídia ao vivo. Em geral, um *Cliente GMTP* é um sistema final que executa um processo a nível de sistema operacional, representando uma aplicação manipulada pelo usuário final. A maioria dos *Clientes GMTP* funciona apenas de forma passiva, recebendo o fluxo de dados de um conteúdo multimídia e entregando para um processo em execução, contribuindo na execução do algoritmo de controle de congestionamento.
- Servidor GMTP:** é um *nó GMTP* capaz de capturar um evento ao vivo e gerar conteúdos digitais de áudio e vídeo ou ainda, receber de um *Cliente GMTP* tais conteúdos.

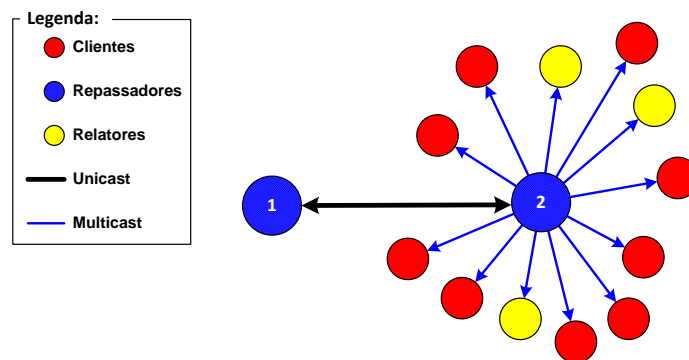


Figura 1.4: Tipos de Nós e modos de conexões do GMTP.

Em geral, um *Servidor GMTP* é um sistema final que participa de uma rede CDN.

- **Repassador GMTP:** é um *Nó GMTP* com habilidades de repassar os fluxos de dados originados de um ou mais *Servidores GMTP* ou de um outro nó *Repassador GMTP*.
- **Relator GMTP:** é um *Cliente GMTP* com habilidades de enviar relatórios periódicos ao repassador sobre o estado da transmissão.

#### Modos de Transmissão:

- **Unicast:** toda comunicação que ocorre entre dois nós *Repassadores GMTP*, com a interpretação do conceito definido por *unicast* em sua forma tradicional no contexto de redes de computadores.
- **Multi-unicast:** é um conjunto formado por dois ou mais canais de transmissão *unicast*.
- **Multicast:** toda comunicação que ocorre entre um nó *Repassador GMTP* e seus respectivos *Clientes GMTP*, com a interpretação do conceito definido por *multicast* em sua forma tradicional no contexto de redes de computadores.

O modo *multicast* sempre é utilizado para a transmissão dos datagramas correspondentes ao fluxo de dados multimídia, porém quando este modo não é suportado pela rede, executa-se o modo *multi-unicast* do protocolo. É mandatório que o modo *multicast* seja utilizado para transmissões entre um nó *Repassador GMTP* e seus *Clientes GMTP* diretos. O modo *unicast* é utilizado para que *Clientes GMTP* estabeleçam uma conexão com um *Servidor*



*GMTP* ou um *Repassador GMTP* e passe a distribuir o conteúdo de dados multimídia em sua rede local.

Deste ponto em diante, os termos *Nó GMTP*, *Cliente GMTP*, *Servidor GMTP*, *Repassador GMTP* e *Relator GMTP* serão utilizados em sua forma simplificada, ou seja, *nó*, *cliente*, *servidor*, *repassador* e *relator*, respectivamente. Além disso, estes termos não serão mais formatados em itálico, bem como os termos *socket*, *unicast*, *multi-unicast* e *multicast*. Ademais, quando o termo *transmissão* ou *transmissão de um evento* for mencionado, denotar-se-á a transmissão de um fluxo de datagramas IP correspondente a um evento ao vivo, utilizando-se o protocolo GMTP.

Embora alguns autores considerem os termos “repasse” e “roteamento” como conceitos distintos, neste trabalho ambos os termos são considerados sinônimos e devem ser interpretados como a capacidade que um nó GMTP tem de receber dados em uma interface de rede de entrada e encaminhar estes dados através de uma interface de rede de saída, permitindo-se que uma mesma interface de rede seja utilizada como entrada e saída ao mesmo tempo.

As palavras “deve”, “não deve”, “requerido”, “pode”, “não pode”, “recomendado” e “opcional”, incluindo suas variações morfológicas, devem ser interpretadas como descrito na RFC 2119 [2], em inglês.

### 1.1.2 Arquitetura

Na Figura 1.5, ilustra-se a arquitetura geral do GMTP.

### 1.1.3 GMTP Intra e GMTP Inter

De acordo com a arquitetura apresentada na seção anterior, define-se:

- **GMTP Intra:** parte do protocolo GMTP executada na camada de transporte da pilha de protocolos TCP/IP, corresponde ao módulo interno de uma rede, composta por nós clientes e relatores, disponibilizado no sistema operacional e utilizado pela aplicação através de uma API de socket GMTP. Um socket GMTP é a representação de uma instância do protocolo GMTP em execução, sendo responsável por gerenciar todas as atividades de comunicação da aplicação correspondente ao meio externo (outros processos GMTP). No contexto de uma conexão, o GMTP Intra mantém diversas variáveis

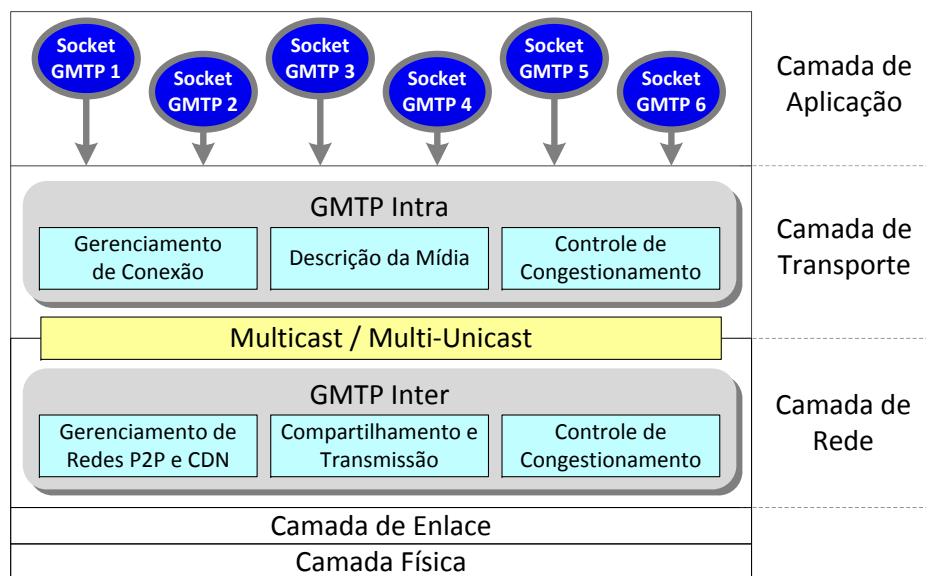


Figura 1.5: Arquitetura do Protocolo GMTP.

de estado que representam uma instância e executa algoritmos para gerenciamento de conexão (estabelecimento e desconexão) e eleição de nós parceiros, determinação do formato e preenchimento dos parâmetros que definem uma determinada mídia digital, permitindo que a aplicação defina os valores de tais parâmetros e ou obtenham acesso aos valores dos mesmos, controle de congestionamento e multiplexação e demultiplexação de datagramas IP. O GMTP não faz verificação de conteúdo por mecanismo de soma de verificação.

- GMTP Inter:** parte do protocolo GMTP executada na camada de rede da pilha de protocolos TCP/IP e corresponde ao módulo externo de uma rede, composta por vários nós repassadores que cooperam entre si. É executado por um roteador de rede e aceita conexões oriundas de um nó cliente ou de um nó repassador. No contexto de uma conexão, o GMTP Inter mantém variáveis de estado relacionadas às funções de sua responsabilidade, tais como estabelecimento de conexão com nós servidores ou repassadores, seleção de nós repassadores parceiros, eleição de nós relatores, controle de congestionamento assistido pela rede e controle de compartilhamento de fluxos multimídia.

No GMTP Inter, permite-se a configuração de parâmetros iniciais de configuração da

rede de favores e da integração com servidores de uma ou mais CDN, como ilustrado na Figura 1.6. Nesse caso, o usuário administrador de um nó repassador pode definir os seguintes parâmetros:

- registro de participação em uma ou mais redes CDN;
- largura de banda (*download* e *upload*) que deseja compartilhar;
- o período (faixa de dias e horários) que o roteador funcionará como nó repassador;
- quantidade máxima de parcerias que podem ser realizadas;
- quantidade máxima de fluxos de dados que podem ser compartilhados;
- parâmetros avançados relacionados aos algoritmos de controle de congestionamento;
- download automático ou não do certificado digital de um nó servidor; e
- realização de cache ou não dos certificados digitais obtidos.

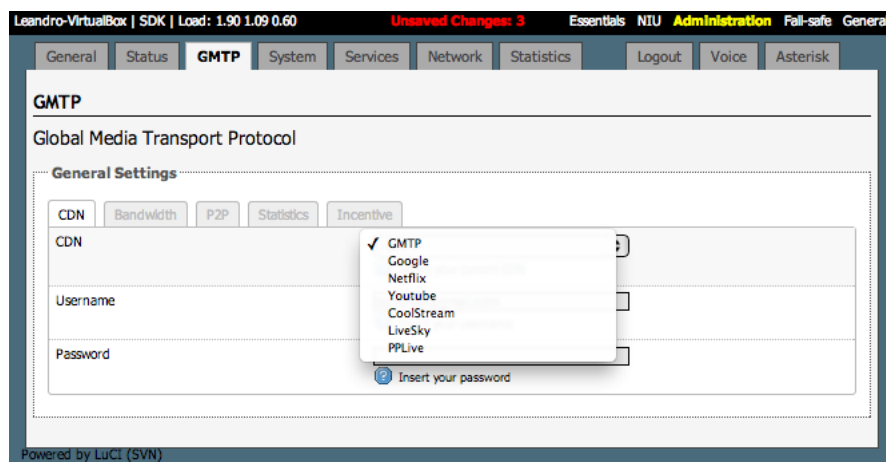


Figura 1.6: Tela da ferramenta de administração do OpenWRT [1] com suporte ao GMTP. Nessa tela, permitir que o administrador do roteador configure registros de participação em uma ou mais redes CDN.

### 1.1.4 Principais funções do GMTP

- Registro de participação de um nó repassador em um nó servidor. Isto permite o suporte à pré-seleção de nós parceiros filtrados por métricas que influenciam na qualidade de experiência do usuário ao assistir um evento ao vivo, como atraso fim-a-fim.

- Acesso a uma transmissão através de um processo de conexão em três-vias (3WHS), com a requisição de conexão transmitida ao servidor e podendo ser interceptada por um nó repassador em seu trajeto ao servidor, com suporte automático de detecção e uso dos modos de transmissão suportados pelo nó repassador.
- Descoberta de nós parceiros entre redes distintas e negociação de parcerias, com suporte a formação de parcerias baseadas em métricas que influenciam na qualidade de experiência do usuário.
- Envio e recebimento de fluxos de dados compartilhados entre nós da mesma rede através de multicast e uso de fluxos unicast entre redes distintas, porém sem a relação de uma conexão por cliente e assim evitando o fenômeno da tragédia dos bens comuns, discutido na Seção ??.
- Suporte a algoritmos de controle de congestionamento assistidos pela rede e de fluxos multicast. Troca de relatórios periódicos entre os nós repassadores sobre a transmissão.
- Eleição de nós relatores com suporte a tolerância a desconexões de nós, com notificação e reeleição de novos nós.
- Possibilidade de permitir que os nós clientes verifiquem a autenticidade das partes de uma mídia, por meio do uso de certificado digital determinado no nó servidor para impedir ataques de poluição.

### 1.1.5 Canais de Comunicação

No GMTP, utilizam-se dois canais de comunicação para executar suas funcionalidades, o de transmissão unicast e o de transmissão multicast. A seguir, definem-se tais conceitos.

#### Canal de Transmissão Unicast:

O canal de controle e recepção unicast é criado por todos os nós repassadores ao iniciar uma instância do protocolo GMTP. Na prática, trata-se de um socket que os nós repassadores formam as devidas parcerias para transmitir os fluxos de dados uns para os outros e posteriormente serem disseminados em modo multicast pelos respectivos nós repassadores aos seus clientes.

Do ponto de vista de roteamento, todo nó repassador deve avaliar os datagramas GMTP e realizar as ações apropriadas, definidas nas próximas seções deste capítulo. Por exemplo, no processo de estabelecimento de conexão, a ser detalhado na Seção 1.4.2, ao processar um pacote GMTP transmitido por um nó cliente, o nó repassador deve verificar se o pacote é do tipo *GMTP-Request* e, em caso positivo, deve-se retornar um pacote do tipo *GMTP-Response* ao nó cliente, se o fluxo de dados de interesse do nó cliente especificado no pacote *GMTP-Request* já estiver sendo recebido por tal nó repassador.

### **Canal de Repasse Multicast:**

Além do canal de controle, define-se no protocolo GMTP um canal de repasse utilizado por um nó repassador para encaminhar datagramas vindos de um servidor ou de outro repassador para a rede local. Esse canal de repasse, na prática, é um socket multicast criado pelo nó repassador para transmitir os datagramas para todos os seus clientes com interesse em reproduzir o mesmo fluxo de dados de um evento ao vivo.

O *socket de repasse multicast* deve ser criado quando um nó repassador passa a obter um determinado fluxo de dados correspondente a um determinado evento de interesse de pelo menos um dos seus clientes. Na prática, quando isto acontece, o repassador deve criar um socket multicast em um endereço IP e número de porta escolhida aleatoriamente para repassar os dados vindos do servidor ou de outro repassador para dentro de sua rede. A faixa de endereços IP multicast que o nó repassador deve utilizar para criar seu socket de repasse para um determinado fluxo de dados é a de escopo local 239.192.0.0/14, definida na RFC 2365 [3]. Como é uma faixa de endereços IP multicast de domínio local, não se faz necessário registrar o uso desses endereços. Isto significa que para todo fluxo de dados de um evento ao vivo, deve-se alocar um endereço IP e uma porta. No caso do esquema de endereçamento IPv4, com isto, será possível definir a transmissão de exatamente de 17.179.607.040 (dezesete bilhões, cento e setenta e nove milhões, seiscentos e sete mil e quarenta) diferentes fluxos de dados em uma rede local, o que é mais do que suficiente e escalável por vários séculos.

### 1.1.6 Tipos de Pacotes

Toda comunicação entre dois ou mais nós GMTP ocorre através da troca de datagramas IP, que carregam sinalizações de controle e/ou dados da aplicação. Para isso, faz-se necessário registrar o uso de um código para o campo *Protocolo* do cabeçalho de um datagrama IP junto à *Internet Assigned Numbers Authority* – IANA<sup>1</sup>. Com a padronização do protocolo GMTP e a publicação da sua RFC, provavelmente será utilizado o código 100, como já está definido no documento *Protocol Numbers*<sup>2</sup> da IANA.

No cabeçalho dos pacotes GMTP, existe um campo denominado *tipo do pacote* com tamanho de 4 *bits*, que são descritos a seguir. Este campo determina qual tipo de informação está contida em um determinado pacote GMTP e, ao processá-lo, o nó GMTP deve executar uma determinada ação.

0. *GMTP-Request*: Cliente envia requisição para obter um fluxo de dados multimídia dado um nome do fluxo de interesse;
1. *GMTP-RequestNotify*: Repassador notifica um cliente que um fluxo de dados está prestes a ser transmitido ou já está sendo transmitido em um determinado canal de repasse multicast;
2. *GMTP-Response*: Repassador confirma o estabelecimento de uma parceria com outros nó repassador, dado um determinado fluxo de dados;
3. *GMTP-RelayQuery*: Repassador pode solicitar ao servidor uma lista de possíveis nós repassadores parceiros;
4. *GMTP-Data*: Qualquer nó utiliza para transmitir dados da aplicação;
5. *GMTP-Ack*: Qualquer nó utiliza para confirmar a recepção de um determinado pacote, seja pacotes previamente contendo dados ou não;
6. *GMTP-DataAck*: Combinação dos pacotes GMTP-Data e GMTP-Ack (*PiggyBack*);

---

<sup>1</sup>IANA: <http://www.iana.org/>

<sup>2</sup>O código 100 foi utilizado no passado por um outro protocolo de mesma sigla, mas foi descontinuado e se tornou obsoleto. O uso de tal identificador está sendo negociado junto a IETF e a IANA <http://www.iana.org/assignments/protocol-numbers/protocol-numbers.xhtml>

7. *GMTP-MediaDesc*: Servidor transmite esse pacote para descrever informações sobre a mídia sendo transmitida em uma determinada transmissão;
8. *GMTP-DataPullRequest*: Repassador envia um pedido para obter o mapa de buffer atual de um outro repassador parceiros;
9. *GMTP-DataPullResponse*: Resposta ao pedido para obtenção de um mapa de buffer;
10. *GMTP-Elect*: Repassador envia para um cliente o pedido para tal cliente atuar como nó relator;
11. *GMTP-ElectReply*: Cliente envia para o repassador uma confirmação de que pode atuar como relator;
12. *Reservado*: Reservado para uso futuro e ignorado pelos nós que o processa;
13. *Reservado*: Reservado para uso futuro e ignorado pelos nós que o processa;
14. *GMTP-Close*: Servidor, repassador ou cliente solicita o término de uma conexão;
15. *GMTP-Reset*: Determina, incondicionalmente, a finalização de uma conexão.

Nas próximas seções, descreve-se todas as possíveis ações do GMTP e os tipos de pacotes envolvidos na comunicação entre os seus nós. No Apêndice ??, apresenta-se detalhes acerca do uso dos tipos de pacotes do GMTP, sendo seu teor bastante técnico e portanto dedicado aos leitores interessados em sua implementação.

## 1.2 Definições, Relações e Restrições do GMTP

Nesta seção, descrevem-se formalmente as definições, relações e restrições do protocolo GMTP. Para isto, faz-se uso de fundamentos de álgebra booleana, lógica proposicional, teoria de conjuntos e teoria dos grafos [4–7].

1. Seja  $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_e\}$ , onde  $e \in \mathbb{N}$ , o conjunto dos roteadores de uma rede de computadores, por exemplo, a Internet, tal que existe uma relação  $R \rightarrow B$  que determina que os nós repassadores  $r_d \in R$  podem sobrepor os roteadores em  $B$  (*overlay network*).

2. Seja  $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_a\}$ , onde  $a \in \mathbb{N}$ , o conjunto finito de todos os nós servidores.
3. Seja  $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_d\}$ , onde  $d \in \mathbb{N}$ , o conjunto finito de todos os nós repassadores.
4. Seja  $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_f\}$ , onde  $f \in \mathbb{N}$ , o conjunto finito de todos os nós clientes.
5. Seja  $(\mathbb{P}, \prec) = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_h\}$ , onde  $h \in \mathbb{N}$ , o conjunto *totalmente ordenado* (*to-set*), sem repetição, dos pacotes de dados gerados pelos nós  $s_a \in S$  durante a transmissão de um evento ao vivo  $\mathcal{E}$ . Note que o símbolo  $\prec$  é utilizado para representar precedência entre dois elementos diferentes.
6. Seja  $\mathcal{T} = \{S, R, C_i, P\}$ , as relações e restrições estabelecidas entre os diferentes tipos de nós participantes de uma transmissão de um evento ao vivo  $\mathcal{E}$ , tal que:
  - Seja  $C_i : r_d \rightarrow 2^C$ ,  $\forall r_{d_1}, r_{d_2} \in R$ ,  $C_i(r_{d_1}) \cap C_i(r_{d_2}) = \{\emptyset\}$ , uma função tal que  $C_i(r_d)$  denota todos os clientes relacionados a um nó repassador  $r_d$ , de modo que nenhum nó  $c_f \in C$  pode estar relacionado com dois ou mais nós  $r_d$ ;
  - $(P, \prec) = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_x\}$ , onde  $x \in \mathbb{N}$ . Isto é, o conjunto *parcialmente ordenado* (*poset*) dos pacotes de dados  $p_x$  transmitidos por um nó  $s_a$  ou por um nó  $r_d$ , também chamado de fluxo de pacotes de dados ou apenas fluxo de dados, de modo que:
    - Um fluxo de dados  $P$  é dito *fluxo completo*, representado por  $P^\bullet$ , se e somente se  $P \leftrightarrow \exists \mathbb{P}_\theta$  (relação bijetora), tal que  $\mathbb{P}_\theta \in 2^\mathbb{P}$  e  $\mathbb{P}_\theta \neq \{\emptyset\}$ . Ou seja, um *fluxo completo*  $P^\bullet$  é um conjunto *to-set* e portanto não apresenta lacunas;
    - $\rho : (p_x, P) \rightarrow (P^\triangleleft, \prec) = \{p_x, p_{x+1}, p_{x+2}, p_{x+3}, \dots\}$ , tal que  $P^\triangleleft \subset P$ , uma função  $\rho(p_x, P)$  que define um sub-fluxo de pacotes de dados  $P$  a partir de um determinado pacote  $p_x \in P$ . Neste caso, como  $P^\triangleleft \subset P$ , se  $P^\triangleleft \rightarrow P^\bullet$ .
7. Seja  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_w\}$ , o conjunto finito de todos os nós relatores de uma transmissão  $\mathcal{T}$ , onde:
  - $L_\theta \subset L$ , tal que  $L_\theta \in 2^{C_i(r_d)}$  e  $L_\theta \neq \{\emptyset\}$ , o conjunto de nós relatores de um nó repassador  $r_d$ . Ou seja, qualquer nó cliente  $c_f \in C_i(r_d)$  pode atuar como um nó relator  $l_w$  de um nó repassador  $r_d$ , pois  $C_i(r_d) \cup L_\theta = C_i(r_d)$ .



8. Seja  $T = \{t_u \mid t_u \in Z \text{ e } \varphi(s_a, P) = 1\}$ , tal que  $Z = S \cup R$  e  $u \in \mathbb{N}$ , o conjunto dos nós  $s_a$  e  $r_d$  que transmitem ou repassam os pacotes de dados  $p_x \in P$ , onde:

- $\varphi : (t_u, P) \rightarrow \{0, 1\}, \forall (t_u, P) \in \{T \times \{P\}\}$ , uma função booleana que determina se um nó  $t_u \in T$  transmite o fluxo de dados  $p_x \in P$  de um evento  $\mathcal{E}$ , onde 0 e 1 denotam, respectivamente, *falso* e *verdadeiro*.

9. Seja  $\eta = G(Z, W)$ , um grafo formado com vértices de nós servidores e repassadores, que podem estar interligados entre si por um conjunto de diferentes caminhos  $W$ , onde:

- $W = \bigcup_{m=1}^j W_j$ , onde  $j \in \mathbb{N}$  é a quantidade de todos os possíveis caminhos  $W_j$ . Isto é,  $W$  é o conjunto de todos os caminhos por onde o fluxo de dados  $P$ , pode ser transmitido, sendo um caminho definido por um conjunto  $(W_j, \prec)$  totalmente ordenado (*toset*):

- $(W_j, \prec) = \{w_m \mid s_a, r_1, r_2, r_3, \dots, r_d\}$ , tal que  $s_a, r_d \in Z$ , tal que  $\forall w_m, w_{m+1} \in W_j : w_m \prec w_{m+1}$  e  $W_j \neq \{\emptyset\}$ . Isto é,  $W_j$  é um conjunto de nós que denota um dos possíveis caminhos por onde um fluxo de dados  $p_x \in P$  pode ser transmitido, obrigatoriamente a partir de um nó servidor  $s_a$ , chamado de pivô ou raiz, até um nó  $r_1$ ;
- Um caminho  $W_j$  é dito *caminho semi-completo*, representado por  $W_j^\circ$ , se e somente se  $W_j \leftrightarrow \exists B_\theta$  (bijetora), tal que  $B_\theta \in 2^B$  e  $B_\theta \neq \{\emptyset\}$ . Isto é, todos os roteadores  $b_e \in B$  são sobrepostos por um nó  $r_d \in W_j^\circ$ ;
- Um caminho  $W_j$  é dito *caminho completo*, representado por  $W_j^\bullet$ , se e somente se tal caminho for  $W_j^\circ$  e se  $(W_j^\circ - \{s_a\}) \subset T$ . Isto é, um caminho é completo se para todo nó  $\forall w_m \in W_j$ , desconsiderando o nó  $s_a$ , todos os nós  $r_d$  são transmitem o fluxo de dados  $P$ .

- Seja  $\sim : (W_j, \prec) \rightarrow (W_j, \succ)$ , uma função reversa  $\sim(W_j)$  de um conjunto *to-set*. Isto é, se  $(W_j, \prec) = \{w_m \mid s_a, r_1, r_2, \dots, r_d\}$ , então  $\sim(W_j) = \{w_m \mid r_d, r_{d-1}, r_{d-2}, \dots, r_1, s_a\}$ ;

- Seja  $\delta : (t_u, W_j) \rightarrow (W_j^\triangleleft, \prec) = \{t_u, t_{u-1}, t_{u-2}, \dots, t_2, t_1\}$ , tal que  $W_j^\triangleleft \subset W_j$ , uma função  $\delta(t_u, W_j)$  que define um sub-caminho de  $W_j$  a partir de um nó  $t_u \in W_j$

até um nó  $t_1 \in W_j$ . Neste caso, como  $W_j^{\triangleleft} \subset W_j$ , tem-se que  $W_j^{\circ} \rightarrow W_j^{\triangleleft\circ}$  ou  $W_j^{\bullet} \rightarrow W_j^{\triangleleft\bullet}$ ;

- O custo total para transmitir um pacote  $p_x \in P$ , através de um caminho  $W_j$ , é denotado pela função  $\zeta : W_j = \sum_{j=1}^{|W_j|} \gamma(w_m, w_{m+1})$ , tal que  $\gamma$  é uma função que determina o custo para transmitir o pacote  $p_x$  entre dois nós distintos  $\forall w_m, w_{m+1} \in W_j: w_m \prec w_{m+1}$ . No GMTP, utiliza-se a métrica atraso entre dois nós distintos para realizar o cálculo de custo, podendo-se utilizar outras métricas, como número total de saltos no caminho  $W_j$ ;
- Conjectura 1:  $\forall r_d \in R$  e  $\forall c_f \in C$ ,  $r_d$  é mais estável que qualquer  $c_f$  com relação a sua disponibilidade e participação em uma rede de favores  $\eta$ . No ponto de vista das redes de computadores, um roteador torna-se indisponível com menos frequência (desconecta-se) se comparado com seus nós clientes. Como se sabe, nas transmissões de dados na Internet, a participação de um roteador no processo de transmissão de um fluxo de dados qualquer é fundamental, mesmo que seja apenas para rotear os pacotes de tal fluxo. Assim, dado que para um cliente receber um determinado pacote primeiramente este pacote deve passar pelo seu roteador padrão (de aborda), quando um roteador se desconecta, nenhum de seus clientes será capaz de receber os pacotes de dados, porém a recíproca não é verdadeira. Ou seja, caso um cliente se desconecte, outros clientes em sua mesma rede continuarão sendo capazes de receber um fluxo de dados encaminhados pelo seu roteador;
- Conjectura 2: as tabelas de roteamento dos nós  $w_m \in W_j$  não mudam frequentemente e são independentes umas das outras. No mundo real (Internet), as rotas entre quaisquer nós  $c_{f_1}$  e  $c_{f_2} \in C$  não se alteram com um nível de frequência que desestabilize a comunicação entre estes, apesar de se tratar de uma rede comutada por datagramas IP. Mesmo se estas mudanças ocorrerem em uma rota de um caminho  $W_j$ , o impacto causado é temporário e insignificante no ponto de vista da qualidade de experiência do usuário ao assistir a um evento  $\mathcal{E}$ .

Desta forma,  $\eta$  representa formalmente a rede de sobreposição constituída pelo GTMP (informalmente ilustrada na Figura 1.3), definindo-se as relações e restrições estabelecidas

em  $\mathcal{T}$  e as conjecturas consideradas para a execução de tal protocolo.

Nas próximas seções, descrevem-se as funcionalidades do GMTP com base em  $\eta$ , explicando-se os mecanismos computacionais empregados no protocolo para a transmissão de um evento ao vivo  $\mathcal{E}$ . Para isto, utiliza-se uma abordagem *top-down*, a partir do processo de constituição de  $\eta$ , em seguida discutindo-se aspectos inerantes ao processo de distribuição de conteúdos multimídia, que envolvem os nós em  $\mathcal{T}$ ,  $C$  e  $S$ , e suas funções específicas.

### 1.3 Constituição da Rede de Favores $\eta$

A constituição da rede de favores  $\eta$  ocorre por meio do registro de participação de um ou mais  $r_d \in R$  a um ou mais  $s_a \in S$ , direta ou indiretamente por meio de outros repassadores  $r_q \in R$ . Todo esforço realizado nesse processo é visando otimizar a transmissão de um fluxo de pacotes  $p_x \in P$  a um cliente  $c_f \in C$ , podendo ser distribuído pelos nós  $r_d$  por meio de diferentes caminhos  $W_j \in W$ . Por este motivo, o GMTP busca determinar um caminho sub-ótimo  $W_\theta$  para que a experiência de um usuário ao assistir um evento  $\mathcal{E}$  seja a melhor possíveis, segundo as métricas estabelecidas anteriormente. Em outras palavras, busca-se sempre o melhor caminho  $W_\theta$  tal que  $\zeta(W_\theta) < \zeta((\forall W_j \in W \text{ e } W_\theta \neq W_j))$  e, sempre que possível, com  $W_\theta^\bullet$ .

#### 1.3.1 Registro de participação de $r_d$ em $\eta$

O procedimento de registro de participação de um nó  $r_d$  em uma rede  $\eta$  é o primeiro passo, e um dos mais importantes. Um nó  $r_d$  envia uma mensagem de registro de participação a um nó  $s_a$  utilizando o pacote GMTP\_REGISTER, que constituirá um caminho  $W_j$ . Para isto, todos os nós  $r_d$  no caminho entre  $r_d$  e  $s_a$  alteram o pacote GMTP\_REGISTER, adicionando seu identificador único que, na prática, é o endereço IP. Quando o pacote GMTP\_REGISTER alcança seu destino ( $s_a$ ), nele conterà a lista ordenada de todos os nós repassadores até  $s_a$ , que de fato é um caminho  $W_j$  entre  $r_d$  até  $s_a$ . Tal informação é enviada de volta ao nó  $r_d$  por meio do pacote GMTP\_REGISTER\_REPLY. Posteriormente,  $W_j$  é utilizado no processo de formação de parcerias, a ser discutido mais adiante na Seção 1.3.2.

O interessante no GMTP é que o registro de participação ocorre quando um nó deseja participar da rede de sobreposição, não necessariamente quando se deseja obter um fluxo de

dados multimídia para assistir a um evento  $\mathcal{E}$ . Em ambos os casos, o algoritmo de registro de participação é o mesmo. A diferença primordial é que se um  $r_d$  solicitar previamente um registro de participação a um  $s_a$ , inicialmente sem interesse por um evento  $\mathcal{E}$  qualquer, será possível mapeá-lo mais rapidamente para seleção de um subconjunto de possíveis nós parceiros  $r_q$ . Neste caso, pode-se utilizar  $r_d$  para repassar pacotes de dados  $p_x$  mesmo quando  $C_i(r_d) = \{\emptyset\}$ . De forma similar, caso  $\exists c_f \in C_i(r_d)$  interessado em  $\mathcal{E}$  e  $\varphi(r_d, P) = 1$ , pode-se reduzir o tempo de início de reprodução do fluxo de dados  $P$ , bastando para isto  $r_d$  começar a encaminhar o fluxo de dados  $P$  para o nó  $c_f$ , o que ocorre em modo multicast. Este assunto será retomado na Seção ??.

No Trecho de Código 1, apresenta-se o pseudo-algoritmo utilizado por um nó repassador  $r_d$  para se registrar a um nó servidor  $s_a$ . Note que o processo de registro não requer que um nó repassador  $r_d$  registre qualquer interesse sobre um evento  $\mathcal{E}$ . Além disso, no final do procedimento do registro de participação, o nó  $r_d$  passa a conhecer sobre  $W_j$  através do pacote GMTP\_REGISTER\_REPLY (linha 8). Note também que no GMTP toda transferência de pacotes de controle é feita com garantia de entrega, com os nomes das funções representadas com o sufixo *Rdt* (*reliable data transfer*).

Uma outra decisão importante tomada no GMTP é que um nó repassador  $r_d$  deve periodicamente sinalizar sua participação na rede de favores (*keep-alive*), ou seja, após o registro de participação, o repassador  $r_d$  precisa enviar periodicamente sinalizações de controle (*polling*) sobre sua participação na rede de favores. Um repassador  $r_d$  também sinaliza sua desconexão a  $s_a$  quando não desejar mais participar da rede de favores  $\eta$ .

**Algorithm 1:** registerRelay( $s_a, c_f = \text{nulo}$ )

---

```

1   $\text{servs} \leftarrow \text{getCurrRegedServers}();$                                 /*  $\text{servs} \subset S$  */
2   $\text{pkt} \leftarrow \text{makePkt}(\text{GMTP\_REGISTER}, s_a);$                     /* register request */
3  if  $\text{pkt} = \text{OK}$  then
4       $\text{sendPktRdt}(\text{pkt});$                                 /* send request pkt of  $r_d$  to  $s_a$  */
5       $\text{pkt} \leftarrow \text{recvPktRdt}(\text{GMTP\_REGISTER\_REPLY});$ 
6      if  $\text{pkt} = \text{OK}$  then
7           $\text{servs}[\text{length}(\text{servs})] \leftarrow s_a;$ 
8           $W_j \leftarrow \text{parsePath}(\text{pkt});$                     /* get the  $W_j$  until  $s_a$  */
9          if  $c_f \neq \text{NULL}$  then
10             /* notify  $c_f$  that  $r_d$  is registered in  $s_a$  */
11              $\text{pkt} \leftarrow \text{makePkt}(\text{GMTP\_CONN\_REPLY}(1), c_f);$ 
12              $\text{sendPktRdt}(\text{pkt});$ 
13         end
14     else
15         /* Notify admin or try again or... */
16         if  $c_f \neq \text{NULL}$  then
17             /* impossible to register  $r_d$  in  $s_a$ . Notify  $c_f$ . */
18         end
19     end
20 return  $\text{servs};$ 

```

---

Assim, o registro de participação de um nó  $r_d$  gera um conjunto de caminhos  $W$  por onde um fluxo de dados  $P$  pode ser transmitido. Sendo assim, quanto mais nós  $r_d$  se registrarem em nós  $s_a$ , mais caminhos  $W_j$  serão conhecidos e portanto quanto mais caminhos forem conhecidos, mais parcerias poderão ser formadas entre os nós  $r_d$ . Consequentemente, quanto mais parcerias formadas, maior será o número de nós  $c_f$  capazes de receber um fluxo de dados  $P$  originado em  $s_a$ , mas disponíveis através dos seus respectivos nós  $r_d$  ou de seus parceiros.

### 1.3.2 Seleção de Nós

Nesta seção, discute-se sobre o processo de seleção de nós parceiros  $r_q$ , os quais auxiliam  $r_d$  a obter um fluxo de dados  $P$  (Figura 1.7).



Figura 1.7: Um usuário precisa descobrir e selecionar seus parceiros.

No GMTP, implementam-se os seguintes métodos para formação de parcerias, que são executados em paralelo, durante a transmissão de um fluxo de dados  $P$  de um evento  $\mathcal{E}$ .

1. Formação de parcerias intra  $W_j$ ;
2. Formação de parcerias por intersecção de  $W_j$ ; e
3. Formação de parcerias por combinação de  $W_j$ .

#### Formação de parceria intra $W_j$ :

No protocolo GMTP, os nós  $w_m \in W_j$  são automaticamente considerados parceiros entre si e por isto qualquer  $w_m$  pode repassar um fluxo de dados  $P$  para o nó  $r_d$  em questão. Dessa forma, qualquer nó pode agir como se fosse um nó  $s_a$ , sendo este o método mais simples e direto que um nó  $r_d$  pode fazer para obter um fluxo de dados  $P$ . Na Figura 1.8, Passos 1 e 2, ilustra-se essa abordagem.

No Passo 1, ilustra-se um cenário de rede com 19 nós  $r_d$  e dois nós  $s_a$ . No Passo 2, ilustra-se o pedido de registro de participação do nó  $r_9$  ao nó  $s_2$ , o que constitui o caminho  $W_1$ . Este processo pode se repetir ao longo da rede, sendo necessário apenas armazenar o caminho  $W_j$  sem precisar manter conexão entre os nós de um dado caminho  $W_j$  – vide Conjecturas 1 e 2, apresentadas na Seção 1.2. Tal abordagem é interessante porque quando

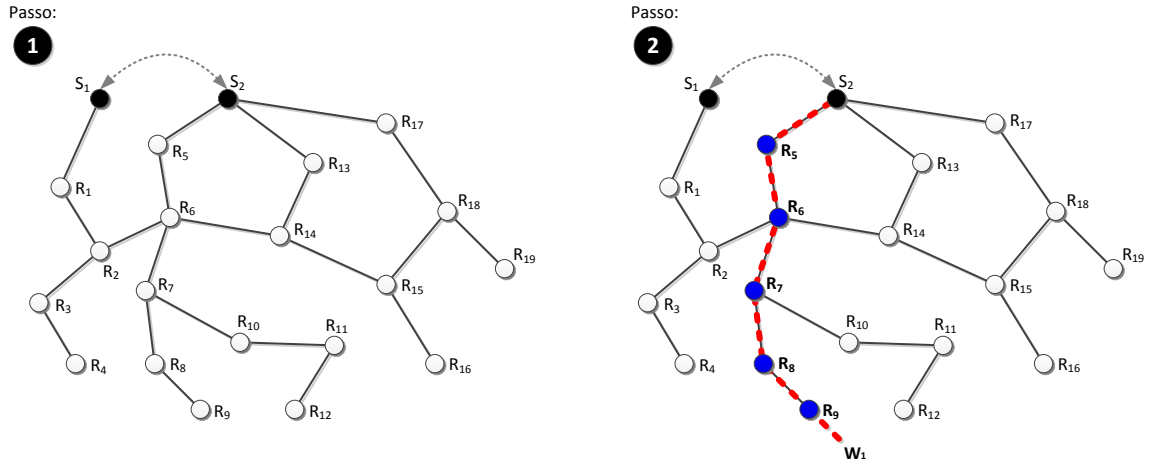


Figura 1.8: Cenário e passos para seleção de nós intra caminhos  $W_j$ .

um nó  $r_d$  solicita o fluxo de dados  $P$  de um evento  $\mathcal{E}$ , motivado por algum nó  $c_f \in C_i(r_d)$ , um nó  $w_m$  pode enviar uma resposta a  $r_d$  como se fosse o servidor  $s_a$ , se  $\varphi(w_m, P) = 1$ .

Dessa forma, permite-se que  $r_d$  descubra mais rapidamente outros candidatos a parceiros  $r_q$ , tal que  $\varphi(r_q, P) = 1$ , efetivando-se parcerias quando ocorrer  $C_i(r_d) \neq \{\emptyset\}$ , incluindo possíveis parcerias com os próprios nós em  $W_j^\triangleleft = \sim(\delta(r_{q+1}, W_j))$ , em caso de desconexão prematura de  $r_q$ , por exemplo. Neste exemplo, o nó  $r_d$  é adicionado ao caminho  $W_j^\triangleleft$ , tal que  $r_d \prec r_{q+1}$ . Isto permite reduzir o tempo de (re)início de reprodução do evento  $\mathcal{E}$  por um nó  $c_f$ , contribuindo na melhoria na qualidade de experiência do usuário. Aspectos sobre desconexões e as ações realizadas pelo GMTP nesse contexto são discutidos na Seção 1.6.1.

### Formação de parceria por intersecção de $W_j$ :

O processo de formação de parcerias por intersecção ocorre pela identificação de um ou mais nós comuns a dois caminhos  $W_j$ . Esse caso é ilustrado nos Passos 1 e 2 na Figura 1.9.

Após o registro de participação de  $r_9$  e a consequente constituição de  $W_1$  (Figura 1.8), se o nó  $r_{11}$  também solicitar o registro de participação (Passo 1 da Figura 1.9),  $r_7$  se torna candidato a parceiro de  $r_{11}$ ,  $W_1 \cap W_2 = \{s_2, r_5, r_6, r_7\}$  (Passo 4). Assim, para este exemplo, o método de formação de parcerias por intersecção de  $W_j$  cobrirá o seguinte caso: após o primeiro nó  $c_f \in \sum_{d=8}^{12} C_i(r_d)$  solicitar o fluxo de dados  $P$ , o nó  $r_7$  será o nó comum entre os caminhos  $W_1$  e  $W_2$  e o mais próximo de qualquer nó abaixo dele, tal que  $\varphi(r_7, P) = 1$ . Dessa forma, para as próximas requisições para obter o fluxo de dados  $P$ , originadas por

$\forall c_f \in \sum_{d=8}^{12} C_i(r_d)$ , motivará algum nó  $r_{d=8..12}$  a enviar tal requisição para  $s_2$ , que passará obrigatoriamente por  $r_7$ , que a interceptará e responderá para o nó  $r_d$  correspondente, como se fosse o nó  $s_2$ . Aspectos relacionados ao envio de dados nesse contexto serão discutidos na Seção 1.4.

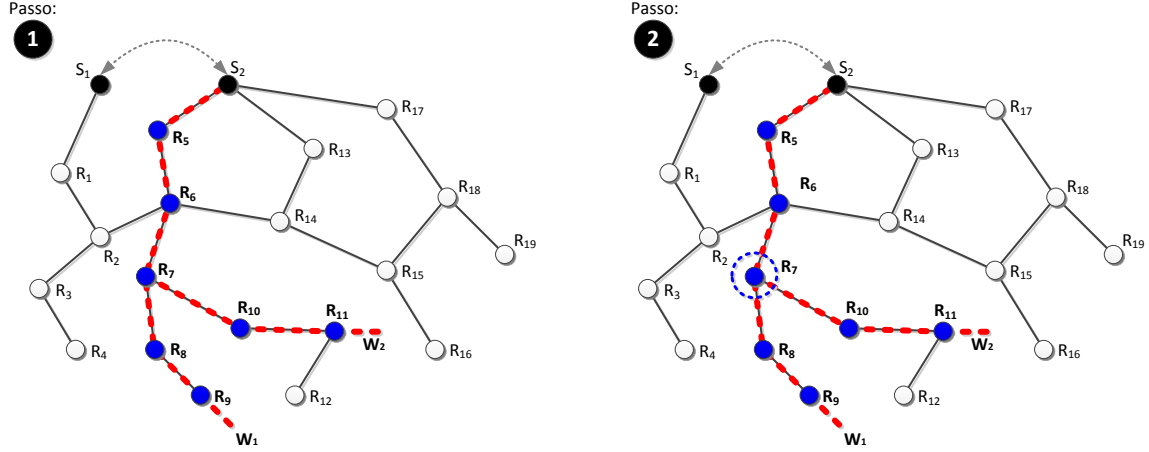


Figura 1.9: Cenário e passos para seleção de nós por interseção de caminhos  $W_j$ .

### Formação de parceria por combinação de $W_j$ :

O método de seleção de nós por meio da combinação de caminhos  $W_j$  considera um nó *pivot*  $s_a$  e o conjunto  $W$  de caminhos conhecidos, mas que não se interceptam (Passo 1 na Figura 1.10). Tais caminhos também são constituídos pelo processo de registros de participação de um nó  $r_d$ , porém o nó  $s_a$  é responsável por determinar candidatos a parceiros de um determinado nó  $r_d$ . Note que este é o único caso que o nó  $s_a$  participa do processo de formação de parcerias. Isto é possível porque um nó  $s_a$  conhece um conjunto de caminhos  $W_j \subset W$  gerados no processo de registro de participação de cada nó  $r_d$  em  $s_a$  (Passo 2). No exemplo da Figura 1.10,  $s_2$  conhece os caminhos  $W_1$  e  $W_3$  e pode compartilhar essa informação com o nó  $s_1$ .

Em geral, o algoritmo funciona da seguinte forma:  $s_a$  processa os caminhos  $W_j$  conhecidos e determina quais são os melhores parceiros para um determinado nó  $r_d$ , sendo tal informação enviada para  $r_d$ . No caso do cenário ilustrado na Figura 1.10, Passo 2, é possível combinar os caminhos  $W_1$  e  $W_2$  pelos nós  $r_6$  e o  $r_{15}$ . Nesse caso, existem duas opções, ilustradas nos Passos 3 e 4. A primeira opção é o nó  $r_6$  repassar o fluxo de dados  $P$  para o



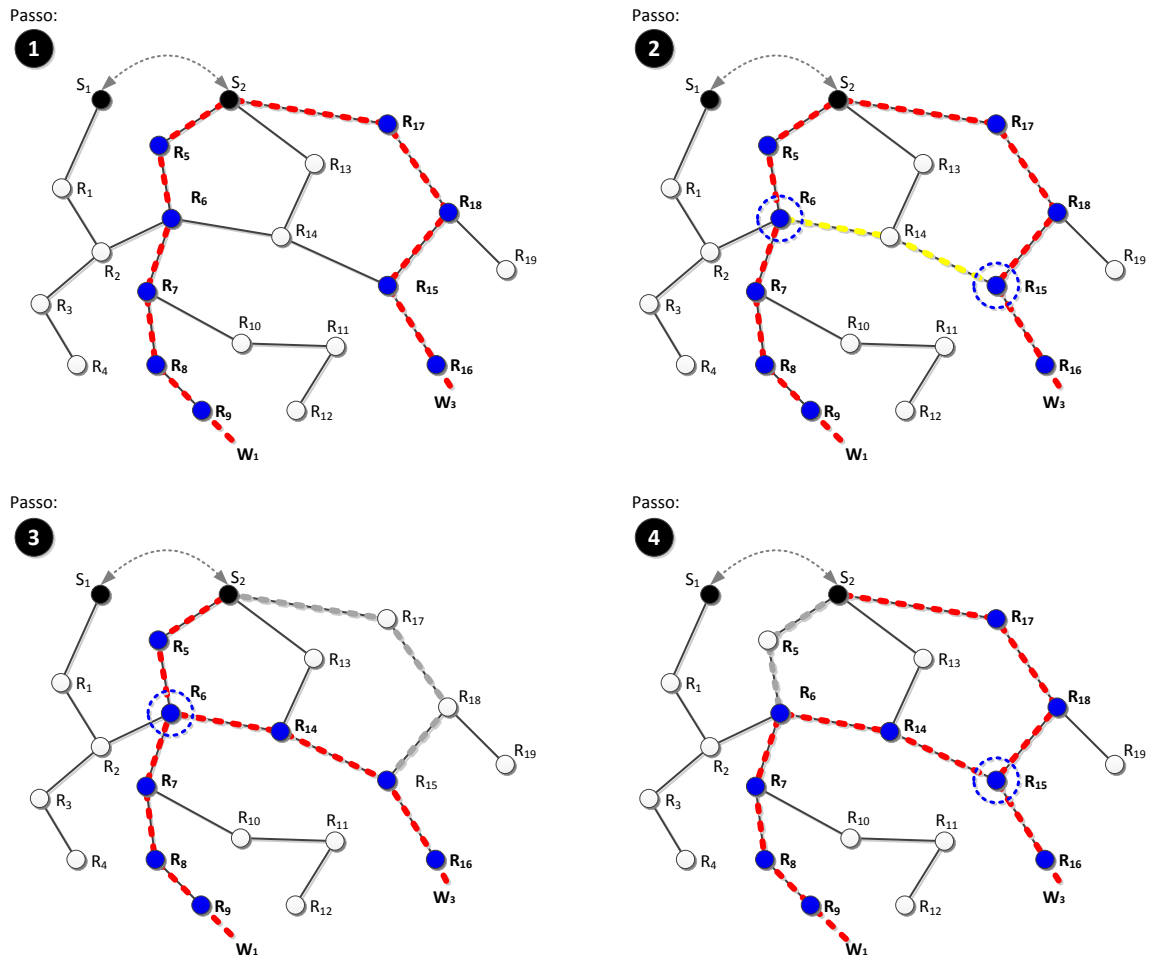


Figura 1.10: Cenário e passos para seleção de nós por combinação de caminhos  $W_j$ .

nó  $r_{15}$ , através do nó  $r_{14}$  (Passo 3). A segunda opção é o nó  $r_{15}$  repassar o fluxo de dados  $P$  para o nó  $r_6$ .

No Trecho de Código 2, apresenta-se um pseudo-algoritmo sobre como esse mecanismo funciona, executado em  $s_a$ .

**Algorithm 2:** matchPartnersByPathIntersection( $W_j, r_d$ )

---

**Data:**  $relayPartners \leftarrow []$

```

1 mspf  $\leftarrow$  0.4;      /* paths are considered similar if similarity
   level is equal or above mspf value */
2 pathSet  $\leftarrow$  getKnownPaths();      /* get  $W$  known in this  $s_a$  */
3 foreach  $W_x \in W$  do
4   if matchSimilarPath( $W_x, W_j$ )  $\geq$  mspf then
       /* Get the closest partner in the path (intersection
          between  $W_x$  and  $W_j$ ) and add to the list of
          prospective partners for  $r_d$ . */
5     prosRelay = NULL;
6     foreach  $w_m \in W_x$  do
7       if  $w_m \in W_j$  then
8         relayPartners[length(relayPartners)]  $\leftarrow$  prosRelay;
9       end
10    end
11  end
12 end
13 pkt  $\leftarrow$  make_pkt(GMTP_ADV_RELAY( $relayPartners$ ),  $r_d$ );
14 send_pkt_rdt(pkt);

```

---

Note que, os nós  $s_a$  podem trocar informações sobre os caminhos  $W$  através da rede CDN, tornando-as disponíveis através da chamada da função *getKnownPaths()*. Este compartilhamento pode otimizar, ainda mais, o processo de formação de parcerias entre os nós em  $R$ . Apesar disso ser possível, em geral, isso não é necessário, principalmente considerando transmissão de eventos em tempo real com suporte a um rede CDN. Isto porque o tráfego de fluxos de dados  $P$  termina se concentrando em uma região devido ao mecanismo de balanceamento de carga empregado na CDN e portanto o servidor alocado pela infraestrutura da CDN é sempre o ideal para o nó  $c_f$  interessado em  $P$ . Na prática, o GMTP não considera a troca de caminhos  $W$  entre servidores  $s_a$ . Em vez disso, no GMTP, caso nenhum nó  $r_q \in W_j$  seja capaz de interceptar uma requisição de  $r_d \in W_j$ , naturalmente tal requisição

alcançará o nó  $s_a \in W_j$ , pois o endereço de destino da requisição sempre é o de  $s_a$ . A partir desse ponto, cria-se a possibilidade de algum nó  $w_m \in W_j$  interceptar requisições de outros nós  $r_d$ .

Note que isto não significa que  $r_d$  fará parcerias com todos os nós  $r_d$  indicados por  $s_a$ . As parcerias serão efetivadas apenas de acordo com os interesses individuais de cada nó  $r_d$  por um fluxo de dados  $P$ . Este aspecto é discutido em mais detalhes quando a função de requisição de um fluxo for apresentada na Seção 1.4.

Com base na Conjectura 1, se um nó  $r_d$  realizar seu registro de participação antes de uma solicitação de um nó  $c_f$ , interessado por um evento  $\mathcal{E}$ , pode-se formar parcerias de melhor qualidade para transmitir que o fluxo de dados  $P$ . Por exemplo, considere  $r_q \in T - S_s$ , definido para uma transmissão  $\mathcal{T}$ . Pode-se determinar previamente um sub-caminho  $\delta(r_q, W_j)$ , tal que  $r_d$  possa realizar uma parceria com  $r_q$ , quando um nó  $c_f \in C_i(r_d)$  estiver interessado em assistir a  $\mathcal{E}$ . Este procedimento pode ser realizado através da interseção de dois ou mais caminhos  $W_j$ , baseando-se em um nó pivô  $s_a \in W_j$ , que origina o fluxo de dados  $P$ . Além disso, periodicamente os nós  $r_d$  avaliam a disponibilidade de cada  $W_j$  conhecido e atualiza uma tabela que armazena informações relacionadas as métricas de qualidade de serviço, como o atraso fim-a-fim.

### 1.3.3 Sobre o melhor caminho $W_j$

De acordo com os métodos empregados de seleção de nós, é possível obter diferentes caminhos  $W_j$ , partindo-se de um nó  $r_d$  para um nó  $s_a$ . Por este motivo, é importante definir, a partir de um conjunto de caminhos possíveis, qual é o melhor caminho a utilizar e ordená-los de acordo com a prioridade de uso. Com isto, é possível obter  $P$  a partir de múltiplos  $r_d$  e usar caminhos alternativos em caso de falha de algum caminho, por exemplo, por desconexão. No GMTP, a ordem de prioridade para uso de cada caminho  $W_j$  é determinada de acordo com dois critérios:

1. Menor atraso fim-a-fim entre  $r_d$  e  $s_a$ ;
2. Maior tempo de disponibilidade dos nós  $w_m \in W_j$ ;
3. Menor número de nós  $w_m \in W_j$ ;

4. Se o caminho for  $W_j^\bullet$ ;
5. Escolha aleatória de  $W_j$  entre os  $W$  conhecidos.

O critério 1 é determinado através da medição do RTT. O critério 2 é obtido através de tal informação compartilhada por cada nó  $w_m \in W_j$ . O critério 3 é determinado pela contagem simples do número de  $w_m \in W_j$ . O critério 4 é determinado através da verificação da condição  $|W_j| = \text{ttl}(r_d, W_j)$ , onde  $\text{ttl}$  é uma função que determina o número de saltos entre o nó  $r_d$  até o último nó  $w_m \in W_j$ , que é um nó  $s_a$ . Na prática, este valor pode ser obtido através do valor do campo TTL (*Time-to-Live*), disponível no cabeçalho IP de qualquer pacote. O critério 5 é utilizado em caso de não determinação do melhor  $W_j$  até o critério anterior.

Note que no GMTP é possível que um nó  $r_d$  tenha simultaneamente mais de um nó  $r_d$  parceiro, porém não mais do que uma certa qualidade configurável devido ao fato de que os pacotes  $p_x$  dos fluxos  $P$  serem transientes, portanto não faz sentido realizar muitas parcerias. No caso do GMTP, a quantidade máxima padrão de parcerias que um nós  $r_d$  realiza é 5, valor praticado em outras soluções similares para transmissão de fluxos de dados ao vivo baseados em arquitetura P2P.

## 1.4 Distribuição de $P$ em $\eta$

No GMTP, a transmissão de dados é feita utilizando uma estratégia híbrida *pull/push* para obtenção do fluxo de dados  $P$ . O método *push* é adotado como padrão, onde os nós  $s_a$  iniciam a transmissão de  $p_x \in P$  para os demais nós  $w_m \in W_j$ , onde  $w_1 = s_a$ . Já o método *pull* é utilizado quando um nó  $c_f$  precisa obter parte de uma mídia que está prestes a ser reproduzida e ainda não foi repassada por um nó  $r_d$  via *push*, de acordo com o seu mapa de *buffer*. Os nós  $r_d$  e  $c_f$  mantêm seus próprios mapas de *buffer*, sendo que um nó  $r_d$  sempre terá um mapa de *buffer* mais atualizado do que os mapas de *buffer* dos seus clientes.

Nessa seção, apresentam-se detalhes sobre como o GMTP realiza a disseminação de  $P$  e como os nós  $c_f$  recebem tal conteúdo para reprodução, discutindo-se aspectos sobre indexação de conteúdos, requisição e recepção de uma mídia, compartilhamento e controle de congestionamento.

### 1.4.1 Indexação de Conteúdo

No GMTP, um fluxo de dados  $P$  tem um nome único que o identifica em qualquer nó, seguindo o princípio das redes centradas no conteúdo. Sendo assim, todo evento  $\mathcal{E}$  é identificado por um nome que é utilizado por qualquer nó para solicitar o fluxo de dados  $P$  correspondente a  $\mathcal{E}$ .

No caso do GMTP, um nome para o evento é definido por um UUID (*Universally Unique Identifier*) de 128 bits [8]. Na sua forma canônica, um evento  $\mathcal{E}$  é representado por uma sequência de 32 dígitos hexadecimal, exibidos em cinco grupos separados por hífen, na forma de  $\{8\}-\{4\}-\{4\}-\{4\}-\{12\}$ . Por exemplo,  $\mathcal{E} = 641f931f-d3ac-50e3-b625-537574541f1f$ .

O identificador de um evento  $\mathcal{E}$  é criado pelo nó  $s_a$  que gera a mídia, e o divulga através de um serviço similar ao DNS ou por meio de uma busca de diretório. Além disso, um nó GMTP poderá requisitar uma lista dos fluxos transmitidos por  $s_a$ . De posse de um identificador para um evento  $\mathcal{E}$ , um nó GMTP poderá solicitar  $P$  de  $\mathcal{E}$  aos seus nós parceiros ou diretamente a um nó  $s_a$ . A divulgação dos identificadores de todos os eventos transmitidos por um nó  $s_a$  é feito no seguinte formato textual e consultado pelo registro do tipo SID (*Streaming Identifier*) do DNS. Por exemplo, suponha um serviço de distribuição de conteúdos multimídia da Rede Globo de Televisão, uma requisição poderá ocorrer como ilustrado no Trecho de Código 3, utilizando qualquer ferramenta de resolução de nomes por tipo de registro a um servidor DNS. Note que três eventos estão registrados, identificados pelos seus respectivos nomes.

---

**Algorithm 3:** Requisição da lista de eventos de um distribuidor de conteúdo.

---

```

1  dig -t SID globo.com
2  QUESTION SECTION:
3    globo.com.  IN  SID
4  ANSWER SECTION:
5    globo.com.  IN  SID  "111f931f-d3ac-10e3-b62f-f17f74541f1f"
6    globo.com.  IN  SID  "72c44591-7d82-427c-825f-722f015787c1"
7    globo.com.  IN  SID  "0bb0b9f5-f57d-4da5-8a6c-13acf1965188"
8  SUMMARY:
9    Query time: 4 msec
10   SERVER: 192.168.1.252:53(192.168.1.252)
11   WHEN: Tue Jul 16 15:44:25 2013

```

---

### 1.4.2 Estabelecimento de conexão e compartilhamento para obter $P$

O processo de conexão do protocolo GMTP é separado em três fases. A primeira acontece quando um nó qualquer  $c_1$  deseja obter  $P$  transmitido por um nó  $s_a$  e não existe nenhum outro nó  $c_f$  em sua rede local recebendo  $P$  (passos 1 e 2 da Figura 1.11) através de um nó  $r_d$ , tal que  $c_1 \in C_i(r_d)$ . A segunda fase acontece quando um novo nó  $c_2 \in C_i(r_d)$  deseja obter o mesmo fluxo  $P$  do nó  $c_1$  (passos 3 e 4 da Figura 1.11). E, por fim, a terceira fase acontece quando o nó  $r_d$  começa a buscar novos parceiros a fim de obter  $P$  de mais outros nós parceiros.

### 1.4.3 Fase 1: primeira requisição a um fluxo $P$

Na primeira fase, o nó  $c_1$  envia um pedido de conexão para o nó  $s_a$ , que é interceptado por  $r_d$ , cuja principal responsabilidade é repassar  $P$  para quaisquer outros nós  $c_f \in C_i(r_d)$ .

O estabelecimento de uma conexão GMTP ocorre quando um nó  $c_f$  cria um socket e envia um pacote do tipo *GMTP-Request* contendo o nome do fluxo  $P$  (camada de transporte), destinado ao nó  $s_a$  (camada de rede). Como na fase 1 assume-se que não existe nenhum nó  $c_f$  recebendo o fluxo  $P$ , o pacote *GMTP-Request* alcança obrigatoriamente seu nó  $r_1$ , que

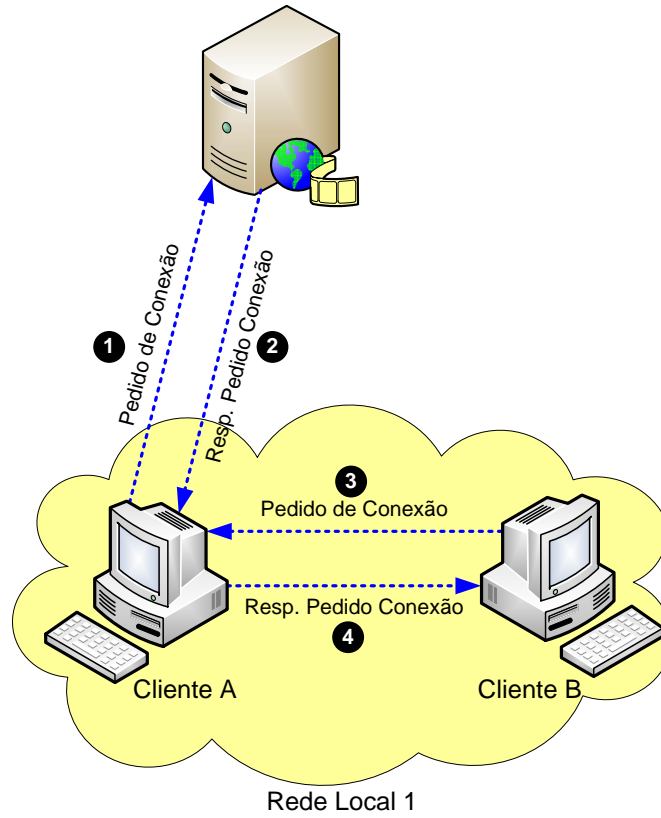


Figura 1.11: Processo Básico de Estabelecimento de Conexão do GMTP.

verifica a inexistência do registro de recepção do fluxo  $P$  e por isso roteia o pacote *GMTP-Request* com destino ao nó  $s_a$  correspondente. À medida que o pacote *GMTP-Request* é repassado através dos nós  $r_d \in W$ , selecionado conforme discutido na Seção 1.3.2, cada nó  $r_d$  que o processar tal pacote, verifica se existe registro de recepção do fluxo  $P$ . Em caso positivo, o respectivo nó  $r_d$  envia um pacote do tipo *GMTP-Response* para  $r_1$  que, ao recebê-lo, registra a recepção de  $P$ , envia um pacote do tipo *GMTP-RequestNotify* para notificar  $c_1$  que o fluxo  $P$  será iniciado. Neste ponto, conclui-se a fase 1 do processo de estabelecimento de conexão e o fluxo  $P$  começa a ser transmitido entre os nós  $r_1$  e  $r_d$ . Note que, por serem pacotes de controle, estes pacotes são transmitidos com garantia de entrega, similar ao mecanismo adotado pelo TCP.

#### 1.4.4 Fase 2: próximas requisições para obter $P$

A fase 2 de conexão ocorre quando futuras requisições a  $P$  ocorrerem após a fase 1, originadas por qualquer nó  $c_f \in C_i(r_1)$ . Tais solicitações são também interceptadas por  $r_1$ , que confirma a existência de recepção de fluxo  $P$  e o repassa também para o nó  $c_f$  solicitante, notificando  $c_f$ , por exemplo,  $c_2$ , usando o pacote do tipo *GMTP-RequestNotify*, tal como ocorreu na fase 1, porém com uma diferença: a configuração de um canal de transmissão multicast na rede local.

O canal de transmissão multicast é configurado para atender ao mesmo tempo os nós  $c_1$  e  $c_2$ , ao permitir o envio do fluxo de dados  $P$  para um grupo multicast configurado dinamicamente pelo nó  $r_d$ . A configuração automática consiste em gerar aleatoriamente um número de porta e enviar um pacote do tipo *GMTP-RequestNotify* contendo tal informação e com a flag binária chamada multicast ativada. Após a criação de tal pacote,  $r_1$  o envia para o nó  $c_2$  e também notifica  $c_1$ , que então realiza as configurações devidas para receber o fluxo em modo *multicast*. Além do bit de sinalização multicast, o pacote do tipo *GMTP-RequestNotify* também contém um campo de endereço IP (32 bits), que especificará qual endereço IP o nó  $r_d$  passará a transmitir os dados (canal de repasse), e mais um campo para especificar o número de porta (16 bits), que especifica a porta correspondente ao canal de repasse.

#### 1.4.5 Fase 3: busca por mais parceiros $r_d$ para obter $P$

Na fase 3, o nó  $r_d$  inicia um processo de aumentar suas parcerias a fim de obter mais rapidamente os pacotes  $p_x \in P$  e caminhos  $W$  alternativos em caso de falha e/ou desconexões de algum nó parceiro  $r_d$ . Ao considerar os aspectos discutido na Seção 1.3.2, nota-se que na Fase 1 e 2 utiliza-se os modos de formação de parcerias intra  $W$  e por intersecção, porém ainda resta fazer uso do modo de formação de parceria por combinação de  $W$  (Figura 1.10). Na fase 3 de conexão, o GMTP explora tal recurso.

Nesse contexto, seja um nó  $r_3$  que esteja recebendo  $P$  originado em um nó  $s_a$ . Para conseguir mais nós parceiros, o nó  $r_3$  envia uma requisição do tipo *GMTP-RelayQuery* para  $s_a$  e obtém um subconjunto de nós  $r_d$  candidatos a parceiro de  $r_3$ , como ilustrado na Figura 1.12. Note que a lista de nós parceiros enviada pelo nó  $s_a$  é construída usando o algoritmo 2 e portanto os nós  $s_a$  funcionam como um indexador (*tracker*) de nós parceiros, executando uma



pré-seleção de nós parceiros para  $r_3$ . Esta pré-seleção ajuda o nó  $r_3$  a selecionar os melhores parceiros disponíveis, de acordo com os critérios definidos em 1.3.3.

Diante do exposto, faz-se necessário registrar três procedimentos importantes realizados pelo GMTP na Fase 3:

1. um nó  $r_d$  pode enviar periodicamente requisições do tipo *GMTP-RelayQuery* para o servidor a fim de descobrir melhores parceiros e aumentar seu leque de opções. Apesar disso, a quantidade de possíveis parceiros de um nó  $r_d$  não significa, necessariamente, que tal nó mantém a mesma quantidade de parcerias efetivas para obter um fluxo de dados  $P$ . Os parâmetros de periodicidade de requisições do tipo *GMTP-RelayQuery* e a quantidade máxima de parcerias efetivas pode ser alteradas pelo administrador de  $r_d$  e tem valores padrões de 10 minutos e 5 nós, respectivamente;
2. como ilustra-se na Figur 1.13, apenas na Fase 3, permite-se requisições do tipo *GMTP-Request* partindo de um nó  $r_{d_3}$  em direção a outro nó  $r_{d_2}$ , que irá enviar um resposta do tipo *GMTP-Response* se  $r_{d_1}$  enviar uma chave secreta aceita por  $r_{d_2}$  e encaminhada para  $r_{d_1}$  pelo nó  $s_a$ , que a obteve de  $r_{d_2}$  no processo de registro de participação discutido na Seção 1.3.1. Note que nesse caso, mesmo se nó  $r_{d_2}$  não estiver recebendo o fluxo de dados  $P$  de interesse de  $r_{d_1}$ , o nó  $r_{d_2}$  deve estabelecer uma conexão (Fase 1) para obtê-lo e então repassar  $P$  para  $r_{d_1}$ ;
3. como se considera uma arquitetura híbrida P2P/CDN, o nó  $s_a$  pode facilmente realizar um mecanismo de balanceamento de carga, incluindo na lista, como se fosse um nó  $r_d$ , um outro nó  $s_a$ , levando-se em consideração, inclusive, todos os critérios estabelecidos na Seção 1.3.3.

#### 1.4.6 Compartilhamento de $P$ entre $s_a$

Além do processo transparente para se obter um fluxo de dados  $P$  empregado no GMTP, como os nós  $s_a$  constituem uma rede CDN, estes podem negociar entre si o envio e a recepção de um fluxo de dados  $P$  de acordo com as requisições submetidas aos nós  $r_d$ . Desta forma, se um nó  $r_d$  enviar uma requisição para obter  $P$  de um evento  $\mathcal{E}$  a um nó  $s_a$  e este não esteja recebendo tal fluxo,  $s_a$  poderá solicitá-lo a outros nós  $s_a$  da CDN que participa.



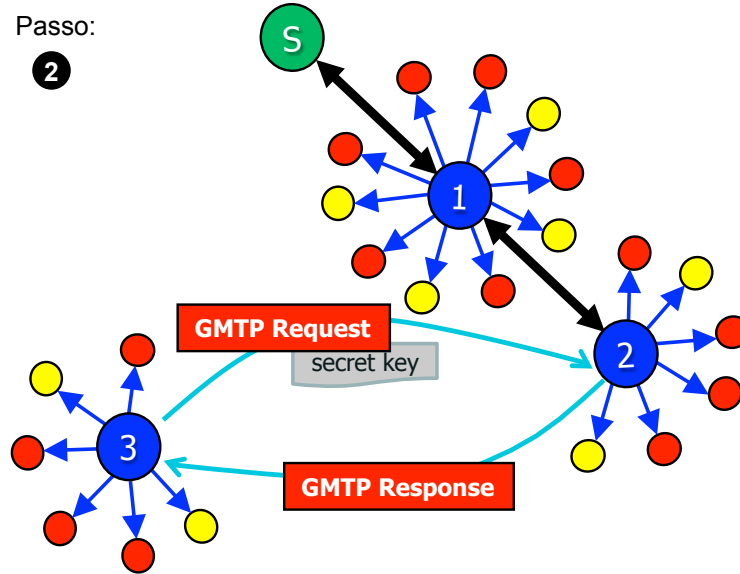


Figura 1.13: Fase 3 de conexão do GMTP (Passo 2).

o presente momento, não se conhece nenhuma solução que permita configuração dinâmica de canais multicast da forma que foi explicada nesta seção, com benefícios diretos para a aplicação e para a rede, fazendo-se uso dos recursos computacionais e de rede de forma mais apropriada, como será discutido no Capítulo ??.

#### 1.4.7 Envio e recebimento de $p_x \in P$ em $\eta$

Após o estabelecimento de conexão, os nós  $r_d$  trocam dados entre si em modo unicast a fim de obter  $P$ , constituído de pacotes  $p_x$  do tipo *GMTP-Data* e *GMTP-DataAck*. De forma similar, os nós  $r_d$  utilizam os mesmos tipos de pacotes para enviar  $p_x \in P$  para os nós  $c_f$ , porém em modo multicast. Nesta seção, detalha-se como o GMTP executa as funções para transmissão que, em ambos os casos, realiza-se controle de congestionamento, sendo tal função descrita na Seção 1.5.

Após o processo de estabelecimento de conexão, o GMTP entra no estado de transmissão de dados. Se o GMTP estiver em funcionamento em um nó  $s_a$  ou em um  $r_d$ , o estado é o de *transmitindo dados*, ao passo que quando executado em um cliente o estado é o de *recepção de dados*. Nesta seção, discute-se o funcionamento do mecanismo de transmissão e recepção de dados no GMTP.

Para o transporte de dados da aplicação, um  $s_a$  ou um  $r_d$  deve criar pacotes do tipo *GMTP-Data* ou o *GMTP-DataAck* e enviá-los aos nós  $c_f$  através do socket correspondente à

conexão estabelecida. Embora o protocolo GMTP transmite dados sem garantia de entrega, em alguns casos, dados de controle podem ser transmitidos de forma confiável. Nestes casos, durante a transmissão de dados, um nó GMTP utiliza-se do pacote do tipo *GMTP-Data* para enviar dados, ao passo que utiliza-se pacote *GMTP-Ack* para confirmar a recepção de pacotes, ou ainda, utiliza-se *GMTP-DataAck* para enviar pacotes de dados e ao mesmo tempo confirmar a recepção de pacotes de dados vindos da direção oposta (*piggyback*).

### Buffer de Envio e Recepção:

A transmissão de um evento  $\mathcal{E}$  consiste no processo de disseminação dos pacotes  $p_x \in P$  através dos nós interessados em obtê-lo. Para isto, cada nó GMTP controla um buffer de envio e recepção no formato de uma estrutura de dados do tipo array, onde cada posição é utilizada para armazenar um pacote  $p_x$  (Figura 1.14). Ao receber  $p_x$ , um nó GMTP armazena-o no buffer e posteriormente o entrega para a aplicação, que o reproduz para o usuário final. Para o envio ou repasse de um pacote, o nó GMTP consome os pacotes  $p_x$  do buffer e transmite para o(s) nós interessados, seja em modo unicast e/ou em modo multicast. Isto porque é possível que um nó  $r_{d_1}$  repasse  $p_x$  para um outro nó  $r_{d_2}$  (unicast) ao mesmo tempo que  $r_{d_1}$  pode repassar  $P$  para seus nós  $c_f$  (multicast).

O buffer de envio e recepção do GMTP tem seu tamanho definido no processo de estabelecimento de conexão, sendo determinado um valor mínimo e um valor máximo, sendo estes permanecendo fixos durante todo o ciclo de vida de uma conexão GMTP. Essa decisão é importante porque permite um nó  $r_d$  alocar previamente o recurso necessário para um determinado fluxo de dados  $P$ . O tamanho do buffer é especificado pelo nó  $s_a$  e sempre é propagado para os demais nós no cabeçalho do pacote do tipo *GMTP-MediaDesc*, como discutido a seguir. Este aspecto é muito importante, pois a aplicação que deve tomar tal decisão, de acordo com o tipo e formato da mídia a ser transmitida. Para o GMTP, é importante apenas ter conhecimento sobre o tamanho do buffer para executar ações de descarte de  $p_x$ .

### Mapa de *buffer*:

O mapa de buffer do GMTP descreve o estado atual do buffer de envio e recepção de um nó GMTP. Como ilustrado na Figura 1.15, trata-se de uma estrutura de dados binária que determina se um pacote  $p_x$  está ou não presente no buffer de um respectivo nó GMTP.

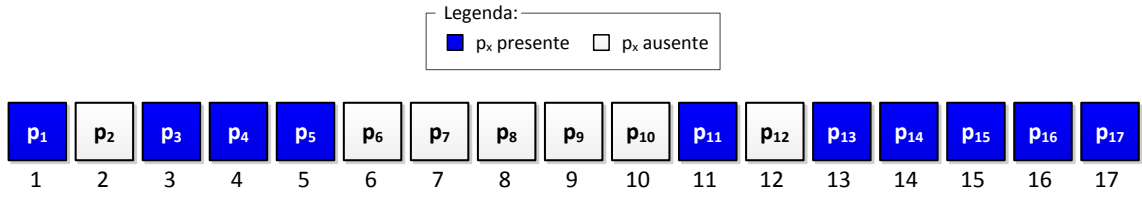


Figura 1.14: Exemplo da estrutura do buffer de envio e recepção de um nó GMTP com tamanho de 17  $p_x$ .

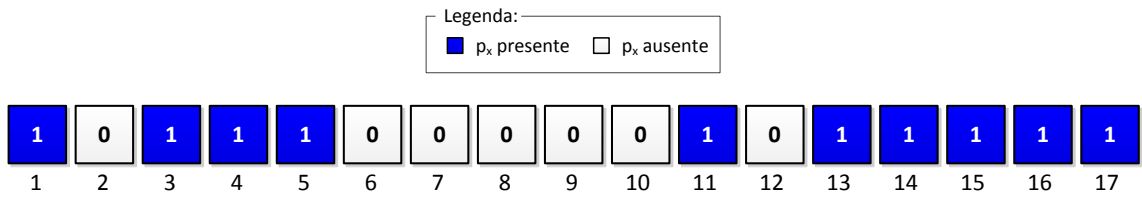


Figura 1.15: Exemplo do mapa de buffer de um nó GMTP com tamanho de 17  $p_x$ .

O mapa de buffer é utilizado por um nó GMTP para sinalizar seu atual estado com relação a um determinado fluxo de dados  $P$ . Um nó GTMP pode enviar o mapa de buffer completo, como ilustrado na Figura 1.15, ou o mapa de buffer apenas dos  $p_x$  presentes ou ausentes. Na prática, um nó GMTP envia para um nó GMTP parceiro o mapa de buffer dos  $p_x$  presentes quando deseja indicar a sua atual disponibilidade; ao passo que envia o mapa de buffer dos  $p_x$  ausentes quando deseja obtê-los;

As trocas do mapa de buffer entre os nós GMTP ocorrem sob demanda, utilizando o método *pull*, uma vez que o método *push* é utilizado por padrão. Neste caso, quando um nó  $r_d$  percebe a falta de um ou mais pacotes  $p_x$ , este pode solicitar a um ou mais nós  $r_d$  os pacotes  $p_x$  ausentes e então obtê-los usando o método *pull*. Para isso, um nó  $r_d$  enviar aos seus nós parceiros  $r_d$  o mapa de buffer dos pacotes  $p_x$  ausentes e aguarda as respostas sobre tal disponibilidade. Essa sinalização ocorre através do uso do pacote do tipo *GMTP-DataPullRequest*, que é preenchido com o mapa de buffer dos pacotes ausentes e transmitido aos respectivos nós parceiros. Ao receber esse tipo de requisição, um nó parceiro avalia seu conteúdo e responde com o pacote do tipo *GMTP-DataPullResponse*, o qual contém o mapa de buffer dos pacotes disponíveis, seguido dos pacotes  $p_x$  do tipo *GMTP-Data*. Note que os pacotes do tipo *GMTP-DataPullRequest* e *GMTP-DataPullResponse* são transmitidos com

garantia de entrega, ou seja, caso sejam perdidos, o GMTP garante sua retransmissão. Para isto, o GMTP utiliza o mecanismo básico de envio e confirmação utilizando o pacote do tipo *GMTP-DataAck* ou *GMTP-DataAck*. No caso de falha na execução de uma requisição utilizando o método *pull*, o nó GMTP pode reavaliar a necessidade de retransmitir o pedido, pois é possível que os  $p_x$  ausentes já tenham sido expirados e requisitá-los novamente não fará mais sentido.

Na prática, o mapa de buffer utilizado para sinalizar a presença ou ausência de  $p_x$  é representado por faixas de acordo com o índice do buffer. Por exemplo, para representar o mapa de buffer dos pacotes ausentes ilustrados na Figura 1.15, o nó GMTP preenche o pacote do tipo *GMTP-DatapullRequest* com a sequência 2;6-10;12. Ao receber esta sequência, o nó  $r_d$  parceiro responde com o pacote do tipo *GMTP-DatapullResponse* contendo o mapa de buffer de quais pacotes serão enviados e começa a transmiti-los nessa ordem.

### Descarte de pacotes:

O descarte de pacotes  $p_x$  ocorre sempre no nó  $r_d$  e em duas situações:

1. **Por transbordo do buffer:** descartar os primeiros pacotes  $p_x$  recebidos se o buffer alcançou seu limite, mesmo que ainda não tenham sido repassados. Uma otimização não explorada neste trabalho, mas que é possível de ser realizada, é o descarta seletivo de pacotes, primeiro os que tenham menos impacto na qualidade da mídia, por exemplo, pacotes de dados contendo quadros B (codificação mpeg). Isto não impede que o vídeo seja reproduzido, porém com perda de qualidade, ao passo que permite-se a transmissão de conteúdo com os recursos disponíveis;
2. **Por duplicação:** ocorre quando o pacote  $p_x$  já foi recebido anteriormente. Tal verificação é feita de acordo com o número de sequência presente em cada pacote  $p_x$ .

### Descrição do fluxo $P$ :

O GMTP é um protocolo de transporte e por isto não precisa conhecer o tipo da mídia a ser transmitida. Porém, levando-se em consideração que uma das principais motivação do GMTP é promover a compatibilidade entre diferentes aplicações que o utiliza, faz-se neces-

sário que as aplicações conheçam o tipo da mídia e assim permitir que qualquer aplicação consiga reproduzir o fluxo de dados  $P$ .

Nesse contexto, incorporou-se no GMTP um mecanismo para descrever  $P$  e permitir que a camada de aplicação receba tal descrição. Para isto, utiliza-se o padrão SDP (*Session Description Protocol*), definido na RFC 2327 [12], uma vez que já é um padrão utilizado pela maioria das aplicações multimídia e portanto facilita a adaptação destas para o uso do GMTP. Apesar de ter um propósito geral para descrever sessões multimídia, no GMTP, o SDP tem o propósito de descrever o conteúdo de  $P$  para permitir que os nós  $c_f$  interessados em  $P$  interpretem seu conteúdo e sejam capazes de reproduzi-lo.

Desta forma, o GMTP utiliza o pacote do tipo *GMTP-MediaDesc* para encapsular o conteúdo de descrição SDP. O conteúdo SDP é gerado pelo nó  $s_a$  e disseminado para os nós  $r_d$ , que os repassam para os nós  $c_f$  no processo de estabelecimento de conexão, descrito na Seção 1.4.2. Com isto, o nó  $c_f$  obtém as seguintes informações sobre  $P$ :

- Identificador do fluxo de dados  $P$ ;
- A codificação e endereçamento da mídia:
  - O formato da mídia (H.261 video, MPEG video, etc.);
  - O endereço e porta para obter a mídia (multicast); e
- Informação para validação de cada pacote  $p_x \in P$ . Este assunto será retomado na Seção 1.6.3.

Um exemplo de uma mensagem SDP transmitida pelo GMTP é apresentado no Trecho de Código 4, onde:

- $v$ , a versão do SDP;
- $o$ , a lista de nós  $s_a$  que a distribui;
- $s$ , o nome da mídia, como discutido na Seção 1.4.1;
- $i$ , o título da mídia;
- $u$ , a URI que descreve detalhes sobre a mídia;

- $c$ , as informações de conexão, como o tipo da rede, a versão do protocolo de rede e o endereço do nó  $r_d$ ;
- $k$ , a chave de criptografia se os pacotes  $p_x \in$  estiverem criptografados;
- $f$ , o certificado digital emitido pelo nó  $s_a$  para validação do conteúdo de  $p_x$ , se desejado;
- $m$ , o tipo da mídia, a porta de conexão e protocolo de transporte; e
- $a$ , atributos adicionais sobre a mídia como, por exemplo, qualidade, idioma, taxa de bits mínima e máxima necessária para transmitir a mídia, em bytes.

---

**Algorithm 4:** Exemplo de uma mensagem SDP no pacote *GMTP-MediaDesc*.

---

```

1  v=0
2  o=- IN IP4 177.135.177.241, IP4 186.192.82.163, IP6 2001:0db8:85a3::7344
3  s=72c44591-7d82-427c-825f-722f015787c1;      /* ver Seção 1.4.1 */
4  i=An Introduction about Global Media Transmission Protocol (GMTP).
5  u=http://www.ic.ufal.br/projects/gmtp/introduction.ps
6  c=IN IP4 200.17.113.100
7  k=base64:aGVsbG8gd29ybGQK
8  f=x509:http://vid12.akamai.com/certs/cert.crt;    /* ver Seção 1.6.3 */
9  m=audio 49170 GMTP/RTP/AVP 16000-20000
10 m=video 51372 GMTP/RTP/AVP 163840-655360
11 a=type:multicast
12 a=sendrecv
13 a=quality:10;                                     /* ver Seção ?? */
14 a=lang:en;                                         /* ver RFC1766 [13] */
15 a=framerate:23.0

```

---

Nesse exemplo do Trecho de Código 4, utiliza-se a primeira versão do protocolo SDP e descreve-se a transmissão de dois fluxos  $P$  (Linhas 10 e 11), sendo um deles de áudio e outro de vídeo. Os fluxos estão sendo distribuídos por três nós  $s_a$  (Linha 2), dos quais dois



são acessíveis através de endereços IPv4 e um através de um endereço IPv6. Os dois fluxos de áudio e vídeo  $P$  são repassados por um nó  $r_d$  acessível por um endereço IPv4 (Linha 6) através das portas 49170 e 51372, respectivamente (Linhas 9 e 10). O conteúdo transmitido é criptografado utilizando base64 e a chave especificada deve ser utilizada para decifrar o conteúdo dos pacotes  $p_x$  (Linha 7). Nesse contexto de segurança, determina-se também que é possível realizar a verificação da autenticidade do conteúdo de cada pacote  $p_x$  através do certificado digital disponível na URL especificada na Linha 8. Alguns parâmetros adicionais da mídia são especificados entre as Linhas 13 e 17, como a qualidade da mídia, que varia entre 1 e 10. Além disso, informações importantes relacionadas as mídias são as taxas de bits sendo, neste exemplo, o áudio variando entre 16000 *Bytes* à 20000 *Bytes* e o vídeo entre 156250 *Bytes* e 625000 *Bytes* (Linhas 10 e 11).

É importante salientar que os nós  $r_d$  utilizam as informações de taxa de bits para determinar o tamanho do buffer necessário para permitir a transmissão da mídia, como discutido anteriormente. Note que o tamanho do buffer é definido em consonância com os parâmetros determinados pelo algoritmo de controle de congestionamento executado no módulo GMTP-Inter, a ser discutido em detalhes na Seção 1.5.

## 1.5 Controle de Congestionamento em $\eta$

No GMTP, disponibiliza-se um arcabouço para adição de novos algoritmos de controle de congestionamento de forma modularizada. Desta forma, permite-se a adição e remoção de novos algoritmos de controle de congestionamento. Atualmente, o GMTP oferece dois algoritmos, um voltado para transmissões em modo unicast e outro voltado para transmissões em modo multicast.

Na prática, definiu-se um algoritmo para controle de congestionamento híbrido, cujo comportamento dependerá se o nó que o executa está transmitindo em modo unicast ou em multicast. Em modo de transmissão unicast, utilizado na comunicação entre os nós  $r_d$ , definiu-se a taxa de transmissão de um nó GMTP através de um algoritmo de janela deslizante baseado em uma equação cúbica, com suporte aos protocolos RCP [1] e ConEx [1]. Já em modo de transmissão multicast, executa-se um algoritmo baseado em relatórios transmitidos pelos nós  $l_w$ , eleitos em cada rede controlado por um nó  $r_d$ , tal que  $l_w \in C_i(r_d)$ . Como

ilustrado na Figura 1.16, para a parte do algoritmo que funciona em modo unicast, dar-se o nome de *GMTP Unicast Congestion Control* (GMTP-UCC), ao passo que para a parte do algoritmo que funciona em modo multicast, dar-se o nome de *GMTP Multicast Congestion Control* (GMTP-MCC).

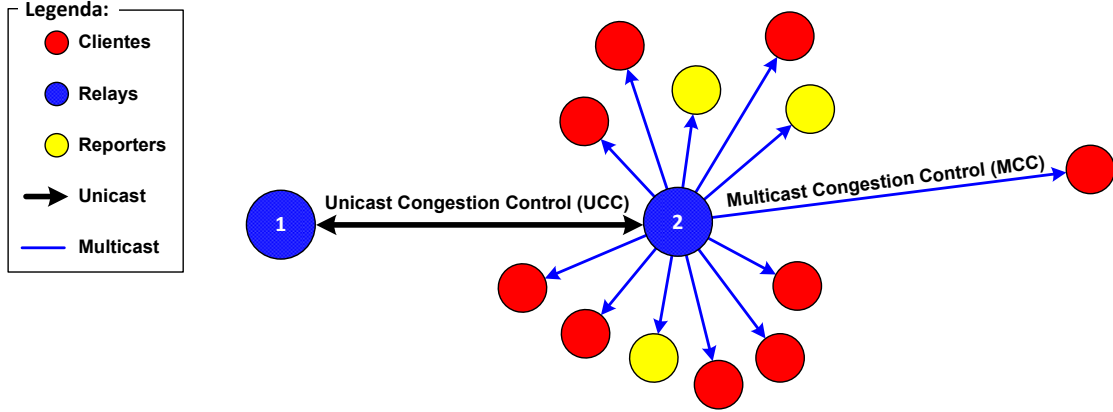


Figura 1.16: Organização do algoritmo de controle de congestionamento no GMTP.

### 1.5.1 Controle de Congestionamento Unicast

O GMTP-UCC funciona de forma similar ao protocolo RCP (Rate Control Protocol) [14], porém com alguns diferenciais a serem discutidos a seguir. O RCP é um protocolo para controle de congestionamento assistido pela rede que tenta emular um *Processor Sharing* (PS), como um roteador. Nesse caso, se um roteador pudesse obter a informação exata sobre o número de fluxos de entrada em um dado instante  $t$ , a taxa de transmissão ideal para cada fluxo de dados seria  $R_{ps}(t) = \frac{C}{N(t)}$ , onde  $C$  corresponde à capacidade do link e  $N(t)$  ao número de fluxos no instante  $t$ .

Dessa forma, Nandita et. al [14] argumenta que para um roteador funcionar de forma equânime, tal roteador deve oferecer a mesma taxa de transmissão para todos os fluxos transmitidos através dele, mantendo-se a fila de roteamento perto de zero a fim de evitar que apenas os fluxos que tem pacotes na fila de repasse compartilhem a largura de banda disponível. Com base nisso, Nandita et. al [14] determinou a Equação 1.1, onde  $R(t)$  é a taxa de transmissão que deve ser oferecida para cada fluxo de dados que passa pelo roteador. Com base na Equação 1.1, estima-se a largura de banda disponível em um determinado canal, representado pela porção  $\alpha(C - y(t)) - \beta \frac{q(t)}{d_0}$  (mudança agregada) e a dividir por  $N(t)$ .

Como é impossível determinar o valor exato de  $N(t)$ , estima-se  $\hat{N}(t) = \frac{C}{R(t-T)}$  e para atualizar  $R(t)$  com mais frequência do que no tempo de um RTT, escala-se a mudança agregada por  $\frac{T}{d_0}$ , resultando na Equação 1.2, onde:

$$R(t) = R(t - d_0) + \frac{\alpha(C - y(t)) - \beta \frac{q(t)}{d_0}}{\hat{N}(t)} \quad (1.1)$$

$$R(t) = R(t - T) \left[ 1 + \frac{\frac{T}{d_0} \left( \alpha(C - y(t)) - \beta \frac{q(t)}{d_0} \right)}{C} \right] \quad (1.2)$$

- $d_0$ , é a média móvel dos valores de  $RTT_s$ , calculada através da Equação 1.3, onde  $\theta$  é o ganho e corresponde a 0.02. Note que quanto maior o valor de  $\theta$ , mais rápida será a convergência de  $d_0$  ao valor de  $RTT_s$ .

$$d_0 = \theta \times RTT_s + (1 - \theta) \times d_0 \quad (1.3)$$

- $T = \min(RTT_{user}, d_0)$ , sendo  $RTT_{user}$  um tempo definido pelo usuário caso seja necessário atualizar  $R(t)$  mais rápido do que o tempo de  $d_0$ ;
- $R(t - T)$ , é a última taxa de transmissão medida;
- $y(t)$ , é a taxa de tráfego de entrada medida no intervalo entre a última atualização da taxa de transmissão e  $d_0$ ;
- $q(t)$ , é o tamanho instantâneo da fila de repasse, em bytes;
- $\alpha$  e  $\beta$ , são parâmetros pré-definidos que determinam a estabilidade e o desempenho;
- $C$ , é a capacidade do link.

No GMTP-UCC, o algoritmo para controle de congestionamento, adaptado do RCP, funciona da seguinte forma:

- 1° Todo nó  $r_d$  mantém uma única taxa de transmissão  $R(t)$ , que é oferecida para todos os fluxos de dados passando por  $r_d$  em um certo instante  $t$ . Cada nó  $r_d$  atualizada  $R(t)$  aproximadamente a cada RTT.

2° Todo pacote dos tipos *GMTP-Ack*, *GMTP-Data* ou *GMTP-DataAck* carrega duas informações de controle (campo no cabeçalho):

- *taxa de transmissão proposta* ( $R_p$ ): corresponde à taxa de transmissão necessária para transmitir um fluxo de dados  $P$ , em geral, calculada pelo nó  $s_a$ ;
- *RTT na fonte* ( $RTT_s$ ): corresponde ao RTT estimado entre quaisquer nós  $t_u, t_{u+1} \in W_j$ , ou seja, o RTT entre dois nós  $t_u$  e  $t_{u+1}$  que processam o respectivo pacote  $p_x$  de um fluxo de dados  $P$  para repassar aos seus nós  $c_f \in C_i(t_u)$  e em  $C_i(t_{u+1})$ , respectivamente.

3° No início de uma transmissão de um fluxo de dados  $P$ , o nó  $s_a$  transmite um pacote  $p_x$  com o valor de  $R_p$  correspondente à taxa de transmissão desejada para transmitir o referido fluxo  $P$ , com o valor para  $RTT_s = \infty$ . A taxa de transmissão desejada  $R_p$  deve ser calculada pela aplicação, de acordo com a taxa de bits da mídia a ser transmitida e repassada à instância do GMTP no nó  $s_a$ .

4° Todo nó  $w_m = r_d$  que receber um pacote  $p_x$ , se  $R(t) < R_p$ , então  $R_p \leftarrow R(t)$ , caso contrário nenhuma modificação é realizada nesse campo. Nesse ínterim, se existir pelo menos um nó  $\in C_i(w_m)$  interessado em obter os pacotes  $p_x \in P$  (Seção 1.4.2),  $w_m$  executa as seguintes ações:

- (a) repassa  $p_x$  para seus nós  $c_f$  em modo multicast (Seção 1.4.7);
- (b) cria um pacote *GMTP-Ack* contendo  $R_p$  e o envia de volta para seu nó parceiro  $w_{m-1}$ . O pacote *GMTP-Ack* também carrega um campo de  $RTT_s$ . Quando  $w_m$  receber um pacote *GMTP-Ack*, deve-se utilizar  $RTT_s$  para atualizar a média móvel do RTT para os fluxos que passam por ele, representado por  $d_0$ .

5° O nó  $w_m$  deve usar  $R_p$  como a nova taxa de transmissão para enviar os próximos pacotes de dados  $p_x$  para seu nó parceiro  $w_{m+1}$ . Na prática,  $R_p$  é a menor taxa de transmissão oferecida ao longo do caminho  $W_j$ .

6° Todo nó  $r_d$  atualiza periodicamente sua taxa de transmissão local  $R(t)$  de acordo com a Equação 1.2.

Sendo assim, no caso do GMTP, a ideia básica é a seguinte: para quaisquer dois nós  $t_1, t_2 \in W_j$ , a taxa de transmissão a ser utilizada por  $t_1$  e  $t_2$  será definida pela menor taxa de transmissão oferecida pelos nós  $w_m \in W_j$  posicionados entre  $t_1$  e  $t_2$ . Com isto, se existir largura de banda disponível entre  $t_1$  e  $t_2$ , ou seja,  $C - y(t) > 0$ , então o GMTP compartilhará igualmente o canal entre todos os fluxos, inclusive para o fluxo entre  $t_1$  e  $t_2$ . Caso contrário, ou seja, se  $C - y(t) < 0$ , o canal é considerado saturado e o GMTP reduzirá a taxa de transmissão igualmente para todos os fluxos, inclusive para o fluxo entre  $t_1$  e  $t_2$ . Especificamente, no intervalo de tempo  $T$ , a largura de banda necessária para repassar todos os pacotes  $p_x$  que estão na fila de repasse em um certo instante  $t$  corresponde à  $\frac{q(t)}{d_0}$ .

### **Escolha do algoritmo RCP em detrimento ao XCP:**

Tanto o RCP quanto o XCP são os protocolos mais famosos do estado da arte que tentam emular um PS entre os fluxos que passam por ele, e por este motivo as equações de controle tanto do RCP quanto do XCP são similares. O grande dilema foi decidir qual dos dois poderia ser adotado no GMTP-UCC. A diferença entre eles é o modo que cada um tenta convergir  $R_{rcp}(t)$  e  $R_{xcp}(t)$  para  $R_{ps}(t)$ . Especificamente, a diferença está no tipo de informação enviada para um nó transmissor de um fluxo de dados  $P$  para atualizar o valor de  $R_{rcp}(t)$  ou de  $R_{xcp}(t)$ . O XCP continuamente tenta convergir a taxa de transmissão para um ponto de equilíbrio onde todos os transmissores transmitirão pacotes de dados a uma taxa de transmissão  $R_{xcp}(t)$ , ao passo que o RCP calcula uma única taxa de transmissão que deve ser utilizada por todos os nós transmissores.

No caso do XCP, o protocolo aumenta ou diminui a janela de congestionamento de um fluxo  $P$  de acordo com o tamanho atual da sua janela de congestionamento. Isto ocorre porque o XCP reduz gradativamente os tamanhos da janela de congestionamento dos fluxos com  $R_{xcp}(t)$  maior do que  $R_{ps}(t)$  e gradativamente aumenta o tamanho das janelas de congestionamento dos fluxos com  $R_{xcp}(t)$  menor do que  $R_{ps}(t)$ . Porém, o tamanho da janela de congestionamento é sempre menor para os fluxos iniciados mais recente. Assim, em qualquer momento, os fluxos XCP podem ter diferentes tamanhos de janela de congestionamento e de RTTs, portanto diferentes taxas de transmissão  $R_{xcp}(t)$ .

No RCP, todos os fluxos (novos e antigos) recebem a mesma taxa de transmissão  $R_{rcp}(t)$  baseada no estado atual do nó  $r_d$  com menor largura de banda disponível em um certo instante

$t$ . Isto permite que um fluxo de dados de curta duração termine o mais rápido possível ao passo que os fluxos de dados mais longos não influenciam diretamente no compartilhamento equânime do PS, alocando para estes também uma taxa de transmissão sem permitir que parte da largura de banda disponível fique ociosa por muito tempo.

O XCP é computacionalmente mais complexo do que o RCP, uma vez que define diferentes valores de *feedback* para cada fluxo, envolvendo operações matemáticas (multiplicação e soma) para cada pacote, o que torna um XCP mais lento que o RCP. Pela estratégia de mudança no tamanho da janela de congestionamento, o XCP pode levar múltiplos RTTs para a maioria dos fluxos alcançarem a taxa de transmissão equânime entre eles, mas que mudam com o passar do tempo à medida que novos fluxos são injetados na rede e outros são finalizados, devido à natureza dinâmica das redes. No caso do RCP, esses problemas não ocorrem porque mantém-se uma única taxa de transmissão para todos os fluxos, não envolvendo qualquer computação adicional por pacote  $p_x$  que passa por  $r_d$ .

Desta forma, os aspectos que determinam o funcionamento do RCP são fundamentais quando se trata de transmissão de conteúdos multimídia ao vivo, aliado às outras estratégias adotadas no GMTP para a distribuição de conteúdos multimídia ao vivo. Isto porque, ao tempo que o RCP define uma taxa de transmissão equânime para todos os fluxos, sua reação é rápida às mudanças circunstanciais na rede, tanto para uma super-utilização de um canal quanto para a sua sub-utilização. Como o RCP escala naturalmente com relação à capacidade de transmissão do canal e ao RTT, o seu desempenho é invariante com relação ao tamanho de um fluxo, portanto não importa qual tipo de fluxo as aplicações geram. Isto permite que fluxos de dados GMTP+RCP e TCP+RCP coexistam na Internet de forma equânime, além do GMTP evitar sobrecarga nos nós  $s_a$  devido às outras funções de distribuição de fluxos de dados empregadas, explicadas anteriormente.

## 1.5.2 Controle de Congestionamento Multicast

Da mesma forma que no GMTP-UCC, o objetivo principal do GMTP-MCC é determinar uma taxa de transmissão equânime entre os fluxos de dados transmitidos pelo GMTP e por outros protocolos, como o TCP, porém em modo de transmissão multicast. No caso GMTP-MCC, trata-se de um algoritmo responsável pelo controle de congestionamento em uma rede local constituída por  $\eta_{sub} = r_d \cup C_i(r_d)$ . Na prática, os nós da rede  $\eta_{sub}$  formam um

grupo multicast para a transmissão e recepção de um ou mais fluxos de dados  $P$ , onde o nó  $r_d$  sempre será o transmissor e os nós  $c_f \in C_i(r_d)$  os receptores. A estratégia é que o valor da taxa de transmissão para um fluxo de dados  $P$  seja tão próximo ao valor da taxa de transmissão que o fluxo TCP utilizaria caso fosse transmitido na rede, portanto um algoritmo *TCP-Friendly*. Um fluxo de dados é considerado *TCP-Friendly* quando este não degrada a taxa de transmissão de um fluxo de dados TCP mais do que outro fluxo TCP degradaria se começasse a ser transmitido na rede.

O GMTP-MCC foi inspirado em um protocolo publicado pela IETF chamado *TCP-friendly Rate Control protocol (TFRC)* (RFC 3448 [15]). O TFRC é um mecanismo para controle de congestionamento de fluxos unicast que tenta prevê a taxa de transmissão de um fluxo TCP e utilizá-la em protocolos diferentes do TCP [16]. Trata-se de uma abordagem diferente da utilizada em algoritmos baseados em janela deslizante e que utilizam pacotes de confirmação para determinar a taxa de transmissão de uma conexão, como acontece no TCP. No TFRC, o receptor envia para o transmissor relatórios sobre as perdas observadas e, com base nesse relatório, o transmissor calcula a nova taxa de transmissão. O TFRC é categorizado com um protocolo de controle de congestionamento baseado em uma equação matemática (*Equation Based Congestion Control*). Algoritmos desse tipo são adotados em diversos protocolos, como é o caso dos CCIDs 3 e 4 do DCCP [17, 18]. Em linhas gerais, o algoritmo TFRC funciona da seguinte forma:

- 1° o receptor mede a taxa de perda de pacotes e envia essa informação para o transmissor;
- 2° o transmissor usa esse relatório para medir o RTT até o receptor;
- 3° o transmissor utiliza a Equação 1.4 para determinar qual será a sua próxima taxa de transmissão em função do relatório de perdas e o RTT obtidos anteriormente;
- 4° o transmissor então ajusta sua taxa de transmissão para o valor calculado no passo anterior.

$$R(RTT, p) = \frac{s}{RTT \times (\sqrt{\frac{2 \times p}{3}} + (12 \times \sqrt{\frac{3 \times p}{8}}) \times p \times (1 + 32 \times p^2))} \quad (1.4)$$

Na Equação 1.4 [19],  $T$  é a taxa de transmissão medida em bytes/segundo definida em função de  $s$ , que é o tamanho do pacote medido em bytes;  $RTT$ , é o RTT entre o nó transmissor e o receptor, medido em segundos e  $p$ , a taxa de perda de pacotes observado pelo nó receptor.

Apesar de ser uma estratégia interessante e funcionar em conexões unicast, em transmissões multicast o algoritmo descrito anteriormente não é eficiente. O algoritmo é limitado devido a um problema conhecido por *explosão de retorno* (*feedback implosion*). Esse problema ocorre quando há muitos receptores enviando relatórios de perdas para o mesmo transmissor, o que resulta em uma inundação de relatórios, os quais o transmissor é incapaz de processar em tempo hábil.

Nesse contexto, para evitar o problema da *explosão de retorno*, determinou-se que apenas alguns nós  $c_f$  são obrigados a enviar tais relatórios ao nó  $r_d$ . Estes nós são chamados de nós GMTP Relatores e representados por  $l_w$ . No GMTP-MCC, a versão original do TFRC foi alterada e funciona da seguinte forma:

- 1° O nó  $r_d$  executa um algoritmo de eleição de nós relatores  $l_w \in C_i(r_d)$ . Na Seção 1.6.2, descreve-se o procedimento para eleger os nós  $l_w$ .
- 2° Os nós  $l_w$  calculam a taxa de transmissão utilizando a Equação 1.4, ao invés do transmissor realizar este cálculo, como na versão original do TFRC;
- 3° Os nós  $l_w$  determinam a taxa de eventos de perda, e não todos os receptores do grupo multicast. Para calcular o evento de perda  $p$ , utiliza-se o mesmo procedimento feito pelo TFRC [15, 19], onde um intervalo de perda é determinado por consecutivas perdas de pacotes, desde do primeiro pacote perdido até o último pacote perdido, seguido de um pacote recebido com sucesso;
- 4° O RTT é calculado entre o nó  $l_w$  e o nó  $r_d$ , com o temporizador controlado pelos nós  $l_w$  e não pelo nó  $r_d$ . Isto evita que o nó  $r_d$  tenha que manter estado de temporizador para cada fluxo de dados  $P$  transmitido para os nós  $c_f \in C_i(r_d)$ . Para determinar o valor do parâmetro RTT e calcular a taxa de transmissão através da Equação 1.4, o GMTP-MCC utiliza a Equação 1.3, com  $\theta = 0.25$ , padrão do TCP;



- 5° A taxa de transmissão a ser utilizada pelo nó  $r_d$  é a média aritmética de todas as taxas enviadas pelos nós  $l_w$ ;
- 6° Repete-se todos os passos a partir do passo 2 a cada intervalo igual ao RTT ou quando um intervalo de perda  $p$  é determinado.

Teoricamente, o GMTP-MCC seria um protocolo *TCP-Friendly* se  $R(RTT, p)$  fosse o valor máximo entre as taxas de transmissão relatadas pelos nós  $l_w$ . Porém, optou-se por utilizar a média aritmética dos valores relatados pelos nós  $l_w$  porque, na prática, diversos fatores podem alterar o estado da rede no instante da transmissão usando o valor máximo da taxa de transmissão reportada pelos nós  $l_w$ . Com esta decisão, define-se uma margem de segurança evitando-se que o GMTP-MCC alcance o limite superior para o valor da taxa de transmissão de um fluxo transmitido com TCP. Além disso, a média aritmética suaviza os valores subsequentes para a taxa de transmissão a ser utilizada pelo nó  $r_d$ .

Um aspecto importante na medição do RTT está relacionado com o início de uma conexão GMTP, pois não se sabe o valor para inicial para RTT até o final do processo de estabelecimento de uma conexão. Nesse caso, deve-se utilizar um valor consideravelmente alto para evitar taxas de transmissões maiores do que a rede tem capacidade de suportar. No GMTP, utiliza-se o valor inicial de RTT igual a  $150\text{ ms}$ . Quando um nó  $c_f$  envia um pedido de conexão utilizando o pacote do tipo *GMTP-Request*, o mesmo deve realizar a sua primeira medição do valor de RTT, iniciando-se o marcador de tempo para o cálculo do RTT quando enviar o primeiro *GMTP-Request* e parando-o quando receber o pacote do tipo *GMTP-Response*. Em seguida, deve-se acionar o mecanismo de cálculo da taxa de transmissão através da Equação 1.4, caso o respectivo nó  $c_f$  seja eleito um nó relator.

## 1.6 Outras considerações sobre o GMTP

Nesta seção, apresentam-se brevemente outras funcionalidades do GMTP, tais como o procedimento de desconexão, adaptação de fluxo, eleição de nós relatores e segurança.

### 1.6.1 Procedimentos para desconexão de nós $c_f$ , $l_w$ e $r_d$

O processo de finalização de uma conexão GMTP ocorre com algumas diferenças se comparado com outros protocolos orientados à conexão. Para sinalizar uma desconexão, um nó  $c_f$  transmite um pacote do tipo *GMTP-Close* pelo canal de controle, contendo o nome do fluxo que deseja se desconectar. Ao receber este tipo de pacote, o nó  $r_d$  transmite ao nó  $c_f$  um pacote do tipo *GMTP-Reset*, sinalizando que está ciente do fechamento da conexão. Nesse interim, os nós desalocam recursos relacionados à respectiva conexão. Este procedimento é suficiente para o pedido de finalização de uma conexão de um cliente GMTP, porém para finalizar uma conexão de um nó  $l_w$  e  $r_d$  outros procedimentos são necessários.

#### Desconexão de um nó $l_w$

Como apresentado na Seção 1.5.2, um nó  $l_w$  é responsável por relatar ao nó  $r_d$  as condições de recepção de pacotes  $p_x \in P$  em uma transmissão multicast e assim determinar a taxa de transmissão que deve ser utilizada para repassar o referido fluxo de dados. Sem os nós  $l_w$ , tal procedimento não seria possível. Sendo assim, deve-se realizar um procedimento para eleger um novo nó  $l_w$  quando um nó com tal responsabilidade solicite desconexão. São candidatos a nó  $l_w$  os nós  $c_f$  já recebendo o fluxo de dados  $P$ , e o nó  $l_w$  em procedimento de desconexão deve esperar que o procedimento de nova eleição seja concluído. Nesse interim, o nó  $l_w$  em processo de desconexão deve continuar enviando pacotes do tipo *GMTP-Ack* para o nó  $r_d$ .

#### Desconexão de um nó $r_d$

Um nó  $r_d$  realiza o procedimento de desconexão não por intervenção da aplicação, mas sim quando  $C_i(r_d) = 0$  para um determinado fluxo de dados  $P$ . Neste caso, pode ocorrer uma situação crítica para todos os nós parceiros de  $r_d$ , pois teoricamente estes não poderão mais receber os pacotes de dados  $p_x \in P$ . Para evitar um período de instabilidade na recepção de  $P$  por parte dos nós parceiros de  $r_d$ , o GMTP define um parâmetro chamado de período de carência para novas parcerias (*grace period for new partnerships*). Este parâmetro determina o tempo que um nó  $r_d$  continuará repassando o fluxo de dados  $P$  para seus parceiros. O valor para esse tempo é transmitido para os nós parceiros de  $r_d$ , que por sua vez deve iniciar o procedimento de realizar outras parcerias a fim de continuar recebendo o fluxo de dados  $P$ .

Opcionalmente, um nó  $r_d$  pode aceitar receber de seus nós parceiros tal valor para o referido parâmetro, desde que não ultrapasse um limite máximo definido pelo administrador de  $r_d$ .

### 1.6.2 Eleição de nós $l_w$

Para um fluxo de dados  $P$ , o primeiro nó  $l_w$  será o nó  $c_f$  que iniciar a primeira conexão unicast para obter o referido fluxo. Os seguintes nós  $l_w$  serão os próximos nós  $c_f$  que se conectar para receber o fluxo de dados  $P$ , até atingir um parâmetro que determinará a quantidade máxima de nós  $l_w$  por fluxo de dados  $P$ . Tal parâmetro pode ser determinado pelo administrador do nó  $r_d$ .

Sendo assim, à medida que um nó  $r_d$  recebe pacotes do tipo *GMTP-Request*, no pacote de resposta *GMTP-Response*, o nó  $r_d$  ativa um indicador sinalizando que o referido nó  $c_f$  em processo de conexão deverá se comportar como um nó  $l_w$ , passando a enviar relatórios da taxa de transmissão calculada por ele. Note que este modo de transmissão deve ser implementado com garantia de entrega, ou seja, com a confirmação de recepção de pacotes e retransmissão caso este tipo de pacote seja perdido. Assim, um nó  $r_d$  poderá ter controle sobre a quantidade de nós  $l_w$  e receber relatórios apenas dos nós  $l_w \in L$ .

Uma outra situação que se faz necessária a eleição de nós  $l_w$  é no procedimento de desconexão, como explicado na Seção 1.6.1. Para esse caso, quando o nó  $r_d$  receber o pacote do tipo *GMTP-Close*, este deve verificar se o referido nó  $c_f$  é um nó  $l_w$ . Em caso afirmativo, o nó  $r_d$  deve transmitir para um dos nós  $c_f$  que também recebe o referido fluxo de dados  $P$  (se houver), um pacote do tipo *GMTP-Elect* e aguardar por um *GMTP-ElectReply*. Este procedimento deve ocorrer com garantia de entrega.

### 1.6.3 Segurança

Em uma solução baseada em um modelo de serviço P2P, é possível que nós mal-intencionados poluam o sistema com conteúdos não originais, ou seja, gerados pelo servidor (Figura 1.17).

No GMTP, delega-se a questão de validação de um fluxo de dados  $P$  para a aplicação em execução no nó  $c_f$  que, opcionalmente, pode verificar a autenticidade dos pacotes de dados  $p_x$ . Isto pode ser feito através de mecanismos de segurança já consolidados, como o de

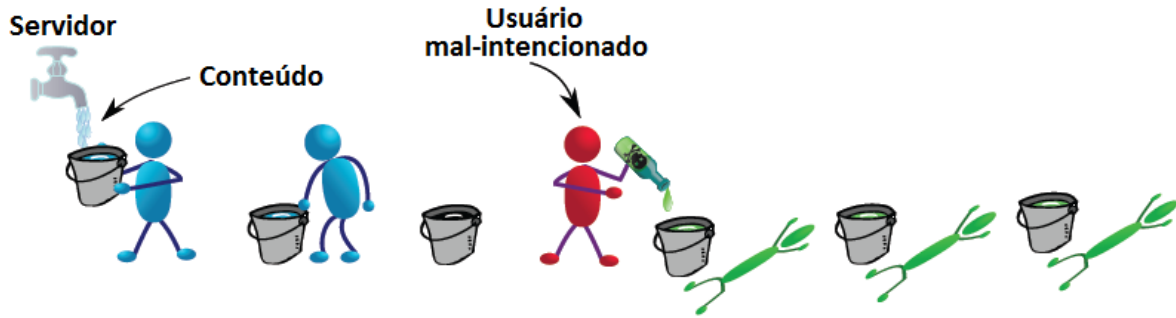


Figura 1.17: Um nó  $r_d$  mal-intencionados podem poluir o sistema com conteúdos alterados.

certificação digital. A obtenção do certificado digital por um nó  $c_f$  deve ocorrer em modo unicast entre este e o nó  $r_d$ , com garantia de entrega.

Apesar da verificação de autenticidade ser verificada pelo nó  $c_f$ , o nó  $r_d$  pode obter o certificado digital disponível no servidor. Isto é feito através do download do certificado digital pela URL especificada no parâmetro  $f$  da descrição da mídia, como ilustra o no Trecho de Código 4, Linha 8. Após o download do referido certificado, o nó  $r_d$  pode realizar cache de tal conteúdo para que os próximos nós  $c_f$  possam obtê-lo mais rapidamente. Independente da forma do download do certificado digital, uma vez o obtido, o nó  $c_f$  pode validar se o conteúdo de dados de cada pacote de dados  $p_x \in P$ .

Como parâmetros de configuração, o administrador do nó  $r_d$  pode habilitar ou não a opção de obter automaticamente o certificado digital ou se prefere que o nó  $r_d$  o obtenha sob demanda. Para essa segunda opção, quando o primeiro nó  $c_f$  desejar obtê-lo, a requisição para seu download é transmitida para a URL especificada. É opcional também para o administrador escolher se o nó  $r_d$  deve realizar cache dos certificados digitais. Se a opção para realização de cache estiver marcada, o nó  $r_d$  deve obter o certificado digital e atualizar o parâmetro  $f$  da descrição da mídia para a nova URL apropriada.

## 1.7 Sumário do Capítulo

Neste capítulo, apresentou-se os fundamentos do *Global Media Transmission Protocol* (GMTP), um protocolo de transporte e rede baseado em uma arquitetura híbrida P2P/CDN para distribuição de fluxos de dados multimídia ao vivo. Tal arquitetura é caracterizadas por um conjunto de nós servidores que obtém o conteúdo multimídia da fonte geradora e o trans-

mite para muitos nós receptores ( $1 \rightarrow n$ ). O GMTP foi proposto para operar principalmente na Internet, permitindo a transmissão de pacotes de dados com suporte a controle de congestionamento sem garantia de entrega, tudo ocorrendo de forma transparente para a aplicação. O GMTP opera na camada de transporte e rede da pilha de protocolos GMTP, realizando transmissão em modo multicast ou de múltiplos fluxos unicast compartilhados entre os nós participantes da transmissão. Neste segundo caso, tal ação ocorre através de uma rede de favores constituída dinamicamente entre os roteadores da rede, evitando a relação de uma conexão por cliente ao nó servidor.

Ao contrário de todos os outros protocolos de transporte e das soluções de aplicação para redes P2P, o foco de definição do GMTP foi reduzir responsabilidade dos nós clientes e aumentar a responsabilidade dos roteadores de rede no processo para distribuição de um determinado conteúdo multimídia. Este foco teve como principal motivação a proposta das Redes Centradas no Conteúdo (CCN), onde o roteador passa a ter um papel com maior participação no processo de entrega de um conteúdo para os nós interessados. Com vistas nos aspectos da CCN, o GMTP oferece um mecanismo de conexão separado em duas fases, quando se decide a forma como um determinado nó cliente obterá o conteúdo de interesse, contando com o suporte dos roteadores nesse processo. Nesse interim, uma grande peculiaridade do GMTP é a função que os nós roteadores passam a ter de realizar parcerias entre si a fim de obter um determinado conteúdo multimídia de interesse, identificado por um nome, como especificado pela teoria das redes centradas no conteúdo.

Diversas estratégias adotadas no GMTP e apresentadas neste capítulo discutidas são diferenciais que permitem a disseminação mais rapidamente de um determinado fluxo de dados originado em um nó servidor. Incorporou-se um mecanismo de *registro de participação* que, após um nó repassador se registrar em um nó servidor, permite-se que os servidores determinem quais são os candidatos a parceiros de um nó repassador, o que ocorre periodicamente. A vantagem é que, *a priori*, permite-se que os nós repassadores avaliem seus parceiros sem necessariamente um nó estar recebendo um fluxo de dados de um determinado evento. Com isto, um nó repassador pode repassar um fluxo de dados para um outro nó repassador sem que o primeiro tenha interesse no referido fluxo, mas devido ao seu posicionamento na rede e sua capacidade computacional e de vazão, pode melhorar o processo de disseminação de um determinado fluxo de dados. Além disso, como se trata de uma rede de favores e os dados

são trocados de forma distribuída, ou seja, nem sempre com a participação de um nó servidor, pode-se empregar um mecanismo para validação dos dados transmitidos pelo servidor, evitando-se ataques de poluição, por exemplo.

Um aspecto importante do GMTP são seus dois algoritmos para controle de congestionamento de fluxos de dados sem garantia de entrega, o GMTP-UCC e o GMTP-MCC. No primeiro, a ser aplicado na transmissão de fluxos de dados unicast entre os nós roteadores, emprega-se uma solução para controle de congestionamento assistido pela rede, onde oferta-se para cada fluxo de dados uma taxa de transmissão igual para todos os fluxos passando por todos os roteadores de um caminho. Nesse caso, a taxa de transmissão é determinada de acordo com a capacidade de transmissão do menor roteador em uma determinada rota. Já no segundo algoritmo, a ser aplicado em fluxos de dados multicast, utiliza-se um algoritmo de controle de congestionamento baseado na equação TFRC (*TCP Friend Rate Control*), fazendo-se uso de nós especiais chamados de relatores para determinar a próxima taxa de transmissão que o roteador deverá utilizar para distribuir o conteúdo multimídia para os nós clientes diretamente conectados a ele.

Por fim, discutiu-se sobre outras funcionalidades do protocolo GMTP, tais como seu mecanismo para finalização de conexão dos tipos de nós do GMTP, eleição de nós relatores e considerações sobre segurança. No próximo capítulo, apresentam-se os resultados e discussões acerca do uso do protocolo GMTP para a distribuição de conteúdos multimídia ao vivo.

# Bibliografia

- [1] TBE. Tbe, 3 2008.
- [2] S. Bradner. Key words for use in rfcs to indicate requirement levels, 3 1997. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2119.txt>. Último acesso: 14 de Novembro de 2013.
- [3] D. Meyer. Administratively scoped ip multicast, 7 1998. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2365.txt>. Último acesso: 14 de Novembro de 2013.
- [4] Jonathan L. Gross and Jay Yellen. *Handbook of Graph Theory (Discrete Mathematics and Its Applications)*. CRC Press, 2 2003. ISBN: 978-1584880905.
- [5] R Séroul. *Programming for Mathematicians*. Springer-Verlag, 2 2000. ISBN: 978-3540664222.
- [6] R. Courant and H. Robbins. *The Algebra of Sets. What Is Mathematics?: An Elementary Approach to Ideas and Methods*. Oxford University Press, 7 1996. ISBN: 978-0195105193.
- [7] K. J. Devlin. *Fundamentals of Contemporary Set Theory*. Springer, 9 1979. ISBN: 978-0387904412.
- [8] P. Leach, M. Mealling, and R. Salz. Congestion exposure (conex) concepts and use cases, 7 2005. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4122.txt>. Último acesso: 14 de Novembro de 2013.
- [9] Erik Nygren, Ramesh K. Sitaraman, and Jennifer Sun. The akamai network: a platform for high-performance internet applications. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, 44(3):2–19, August 2010.

- [10] A. Vakali and G. Pallis. Content delivery networks: status and trends. *Internet Computing, IEEE*, 7(6):68–74, nov.-dec. 2003.
- [11] Mukaddim Pathan, Rajkumar Buyya, and Athena Vakali. Content delivery networks: State of the art, insights, and imperatives. In Rajkumar Buyya, Mukaddim Pathan, and Athena Vakali, editors, *Content Delivery Networks*, volume 9 of *Lecture Notes Electrical Engineering*, pages 3–32. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [12] M. Handley and V. Jacobson. Sdp: Session description protocol, 4 1998. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2327.txt>. Último acesso: 14 de Novembro de 2013.
- [13] H. Alvestrand. Tags for the identification of languages, 2 1995. <http://www.ietf.org/rfc/rfc1766.txt>. Último acesso: 14 de Novembro de 2013.
- [14] Nandita Dukkupati. *Rate control protocol (rcp): congestion control to make flows complete quickly*. PhD thesis, Stanford, CA, USA, 2008. AAI3292347.
- [15] M. Handley, S. Floyd, J. Padhye, and J. Widmer. Tcp friendly rate control (tfrc): Protocol specification, 1 2003. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3448.txt>. Último acesso: 14 de Novembro de 2013.
- [16] 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.
- [17] Eddie Kohler, Mark Handley, and Floyd. Profile for Datagram Congestion Control Protocol (DCCP) Congestion Control ID 2: TCP-like Congestion Control. In *IETF Online RFC*, 3 2006. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4341.txt>. Último acesso: 14 de Novembro de 2013.
- [18] Eddie Kohler and Mark Handley. Profile for Datagram Congestion Control Protocol (DCCP) Congestion Control ID 3: TCP-Friendly Rate Control (TFRC), 3 2006. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4342.txt>. Último acesso: 12/04/2011.
- [19] Jitendra Padhye, Victor Firoiu, Don Towsley, and Jim Kurose. Modeling TCP throughput: a simple model and its empirical validation. In *SIGCOMM '98: Proceedings of*



---

*the ACM SIGCOMM '98 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*, pages 303–314, New York, NY, USA, 1998. ACM Press.