

UMA VISÃO TUTORIAL DOS MODELOS DE ALOCAÇÃO DE BANDA (BAM – BANDWIDTH ALLOCATION MODELS) COMO MECANISMO DE PROVISIONAMENTO DE RECURSOS EM REDES IP/MPLS/DS-TE

Rafael Freitas Reale

Universidade Federal da Bahia, Instituto Federal da Bahia/Brazil
reale@ifba.edu.br

Joberto Sergio Barbosa Martins

Universidade Salvador/Brazil
joberto.martins@unifacs.br

Romildo Martins da S. Bezerra

Instituto Federal da Bahia/Brazil
romildo@ifba.edu.br

Gilvan Martins Durães

Instituto Federal da Bahia/Brazil
gilvan.duraes@catu.ifbaiano.edu.br

Resumo: Os Modelos de Alocação de Banda (BAM – *Bandwidth Allocation Models*) foram concebidos inicialmente de forma a suportar a implantação de regras e limites de utilização de recursos como banda para Classes de Tráfego (TCs) em Redes IP/MPLS/DS-TE. Os BAM evoluíram inicialmente na sua proposta básica de implantar regras e limites de utilização de banda focando exclusivamente no contexto de Redes IP. Em efeito, entre os BAM mais citados e pesquisados na literatura, destacam-se as opções MAM (*Maximum Allocation Model*), RDM (*Russian Dolls Model*), AllocTCSharing e GBAM (*Generalized BAM*). Outro aspecto relevante, evolutivo e interessante dos BAM demonstrado na literatura é a sua aplicabilidade em outros contextos como na alocação de recursos para redes ópticas, provisionamento de recursos em nuvem e suporte à avaliação de neutralidade em redes de telefonia. Além disso, os BAM também tem sido pesquisados como mecanismo de suporte para a otimização, reconfiguração e implantação de soluções com características autônomicas em redes IP. Diante desta abrangência e possibilidades de aplicações, este artigo propõe uma visão tutorial dos Modelos de Alocação de Banda com um foco específico no provisionamento de recursos em Redes IP. Isso de forma a apoiar não somente a pesquisa como também a curva de aprendizado de pesquisadores e desenvolvedores interessados na temática. O artigo apresenta de forma sequencial e tutorial os conceitos envolvidos com os BAM. Apresenta-se desde os conceitos mais básicos do IP, passando pelo MPLS, DS-TE e Engenharia de Tráfego. Em seguida, os BAM mais relevantes são apresentados e discutidos, complementando com uma simulação onde se explora a utilização dinâmica dos BAM de forma a configurar e/ou otimizar parâmetros de operação de rede tais como utilização, bloqueio e preempção, dentre outros.

Abstract: Bandwidth Allocation Models (BAMs) were initially conceived as a support element defining rules and limits for resource allocation (bandwidth) for Traffic Classes (TCs) in IP/MPLS/DS-TE networks. BAMs evolved on its basic purpose to deploy rules and limits for TC resources focusing on IP networks. As such, distinct BAM models and solutions were developed such as MAM (*Maximum Allocation Model*), RDM (*Russian Dolls Model*), AllocTCSharing e GBAM (*Generalized BAM*). Another important, relevant and interesting aspect of BAM evolution is its ability to be applied on new contexts like optical networks resource allocation, cloud computing resource provisioning and support to neutrality evaluation in telephony networks. Beyond that, BAMs have been applied and researched as a basic tool and support to optimization, reconfiguration and deployment of management systems with autonomic characteristics. Considering then this large scope and research interest involved, this paper presents a tutorial vision of the BAMs focusing specifically on resource provisioning for IP/MPLS/DS-TE networks. The paper presents sequentially the concepts around BAM, starting from basic IP needs and following with MPLS, DS-TE and Traffic Engineering related aspects. Following that, the most relevant BAMs are introduced and discussed. Finally, a simulation is presented exploring the dynamic switching of BAM models towards parameters reconfiguration and optimization like utilization, preemption and blocking among others.

Keywords: Modelos de Alocação de Banda (BAM - *Bandwidth Allocation Models*); MPLS; DS-TE; MAM; AllocTCSharing; RDM; G-BAM.

I. INTRODUÇÃO

A Internet alcançou um papel primordial nas comunicações mundiais, suportando uma gama bastante variada de serviços e aplicações. Contudo suas aplicações esbarram na inexistência de garantia para os parâmetros de operação da rede devido ao seu estilo “melhor esforço” (*Best Effort*).

As aplicações em tempo real (*real-time*) ou interativas, (como aquelas de áudio, vídeo e jogos), precisam, normalmente, de certa garantia de banda, atraso, variação do atraso (*jitter*) e perda de pacotes para operar de uma forma satisfatória para o usuário. Uma grande perda de pacotes, como em uma aplicação de voz, pode haver cortes na comunicação, e um grande atraso pode gerar um desconforto para os interlocutores [1].

Com intuito de definir uma configuração de operação para a rede que considera as necessidades em termos de banda, atraso e outras métricas, definiu-se o conceito de qualidade de serviço – *Quality of Service* (QoS). A qualidade de serviço em redes IP pode ser entendida como sendo a técnica utilizada para definir o desempenho de uma rede relativa às necessidades das aplicações, como também o conjunto de tecnologias que possibilita às redes de computadores oferecerem garantias de desempenho [2]. Para prover QoS é necessária a implantação de mecanismos auxiliares à arquitetura TCP/IP, pois esta, em sua proposta inicial, não suporta estas garantias.

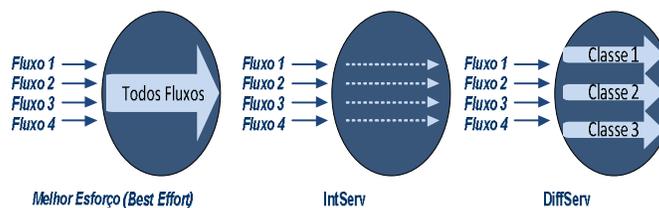


Figura 1. Melhor Esforço versus IntServ versus DiffServ

Complementarmente às soluções anteriores indicadas (Figura 1), pode-se fazer uso das técnicas de Engenharia de Tráfego para adequar os recursos de uma rede às suas aplicações. As técnicas de Engenharia de Tráfego possibilitam um mapeamento baseado em critérios de operação da rede dos fluxos de tráfego conforme seus requisitos de QoS com a obtenção de vantagens, tais como a redução dos pontos de congestionamento e uma utilização mais eficiente da rede [6].

A solução *DiffServ Aware MPLS Traffic Engineering* (DS-TE) foi mais recentemente proposta como uma alternativa de organização de fluxos de tráfego que pode ser utilizada juntamente com soluções tecnológicas para o QoS como DiffServ e o MPLS. A solução DS-TE, obviamente, também pode ser utilizada no escopo das aplicações de Engenharia de Tráfego [7].

Na solução DS-TE é possível mapear os fluxos, com base em seus requisitos de QoS, em Classes de Tráfego

As soluções atuais existentes e mais frequentemente utilizadas para implantação de um suporte de QoS em redes IP são: superdimensionamento, serviços integrados (IntServ), serviços diferenciados (DiffServ) e MPLS/DS-TE.

O superdimensionamento é a solução na qual se disponibilizam recursos muito além do necessário, como banda, espaço em *buffers* e capacidade nos roteadores a fim de evitar bloqueios por falta de recursos. O superdimensionamento é uma forma intuitiva e muito utilizada de obter QoS; porém deve-se levar em conta sua viabilidade financeira [3].

A solução *Integrated Services* (IntServ) baseia-se no esquema reserva de recursos antes do estabelecimento da comunicação para os fluxos de tráfego. O IntServ é recomendado para pequenas redes ou redes de pequeno porte, pois é preciso sinalizar, processar e manter os estados de cada fluxo que atravessa a rede o que, por sua vez, gera problemas de escalabilidade para redes maiores como a Internet [4] [5].

Os serviços diferenciados comumente chamados de *Differentiated Services* (DiffServ) buscam oferecer QoS baseado na agregação de fluxos em classes de serviço e numa configuração adequada de filas e mecanismos de escalonamento de pacotes nos roteadores. A agregação de fluxos em classes de serviços pré-determinadas oferece escalabilidade (escalabilidade ou flexibilidade) para redes de grande porte de maneira geral [4] [5].

(CT) que podem ser utilizadas numa estratégia de QoS. Uma das recomendações das redes DS-TE é a adoção de um modelo de alocação de banda para definir as regras que serão utilizadas para a reserva de banda por CT nos enlaces e um algoritmo de escolha do melhor caminho ciente dos requisitos e configuração das CTs. Nas redes DS-TE, o desempenho da rede como um todo está diretamente associada à escolha correta do modelo de alocação de banda e do algoritmo de seleção de caminhos adequado aos fluxos nela existentes. Os modelos de alocação de banda e algoritmo de seleção de caminhos necessitam de uma atenção especial nas redes DS-TE, pois um dos principais fatores de degradação da qualidade de serviço é a disputa por banda entre as aplicações em rede.

II. MPLS (*MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING*)

Com o crescimento da Internet e das redes IP, o roteamento de pacotes passou a ser uma tarefa crítica. A

cada roteador, os cabeçalhos dos pacotes IP precisam ser lidos e, com base na sua tabela de rotas, encaminhado para uma determinada interface de saída (*Table Lookup*). Essa tarefa é mais crítica para roteadores de núcleo da rede onde estas tabelas podem crescer em tamanho e, além disso, o tráfego de pacotes tende a aumentar. Motivado a reduzir a análise e processamento do cabeçalho IP nos roteadores e assim melhorar o desempenho do roteamento, surgiram as redes *Multiprotocol Label Switching* (MPLS).

Com o uso de rótulos (*labels*), com a função de agregar fluxos que possuem as mesmas necessidades de encaminhamento, uma rede habilitada a MPLS transforma a tarefa de roteamento de pacotes em uma simples atividade de comutação de pacotes, através de uma busca indexada em uma tabela de rótulos. Apesar do foco das redes MPLS ser as redes IP, o cabeçalho MPLS que contém o rótulo é colocado entre os cabeçalhos da camada de enlace e camada de rede, permitindo-as trabalhar de forma independente dos protocolos destas. Devido à característica de independência da camada de enlace e de rede nas redes que o utilizam, o MPLS é definido como multiprotocolo (*multiprotocol*).

As redes MPLS utilizam dois tipos de roteadores: os *Label Switch Edge Routers* (LERs) e os *Label Switch Routers* (LSRs). Os LERs são roteadores de borda que têm por objetivo ler os cabeçalhos IP e designar um rótulo que será utilizado pelos LSRs, com o fim de encaminhar os pacotes em um domínio MPLS. Os LSRs são roteadores de núcleo que utilizam apenas os rótulos como índice para uma busca indexada em sua tabela de informação de encaminhamento por rótulo - *Label Information Base* (LIB), sendo esta a única informação necessária para o encaminhamento dos pacotes (*forwarding*). Vale ressaltar que os LSRs não precisam analisar o cabeçalho dos pacotes IP para encaminhá-los.

O resultado operacional das redes MPLS são caminhos comutados por rótulos (*label*) chamados *Label Switched Paths* (LSPs), que tornam as redes MPLS também uma alternativa tecnológica para Engenharia de Tráfego, devido ao encaminhamento de pacotes poderem ser orientados a uma escolha da trajetória fim-a-fim (*path*) e através da utilização do mecanismo IP de roteamento explícito na fonte (*IP Source Routing*). Acho que vale uma explicação breve...3 linhas

Todo pacote ao chegar a um domínio MPLS é mapeado em uma classe de equivalência de encaminhamento, *Forwarding Equivalence Class* (FEC), no roteador de borda MPLS (LER). O mapeamento dos pacotes às FECs é definido pelo gerente da rede. O gerente da rede conta com uma gama de possibilidades para mapear os pacotes nas FECs como: endereço de destino, endereço de origem, porta de destino, porta de origem, classe de serviço, entre outros parâmetros. As FECs agrupam pacotes que terão o mesmo tratamento de

encaminhamento ao longo de um domínio MPLS. Uma FEC é mapeada em um rótulo inicial que corresponde a um LSP e, desta forma, todos os pacotes associados a uma FEC seguirão este LSP.

Os LSPs (*Label Switched Paths*) são caminhos virtuais fim-a-fim (*Path-LSP*) construídos através da comutação dos rótulos nos roteadores MPLS. Todos os fluxos mapeados em um determinado LSP seguem o mesmo caminho devido ao mesmo encaminhamento pela rede. Em função destas características, os LSPs são mapeados pelas FECs para encaminhar pacotes que possuem as mesmas necessidades de encaminhamento fim-a-fim (requisitos de operação).

III. DS-TE (*DIFFSERV AWARE MPLS TRAFFIC ENGINEERING*)

A arquitetura *DiffServ Aware MPLS Traffic Engineering* (DS-TE) foi proposta por [7] como forma de prover QoS e Engenharia de Tráfego em uma granularidade de classes. As redes DS-TE podem ser consideradas uma evolução das redes MPLS com Engenharia de Tráfego (MPLS-TE), já que conservam as características globais de encaminhamento e controle das mesmas, além de introduzirem extensões para suportar o conceito de alocação de banda, seleção de caminhos baseado em restrições e estabelecimento de caminho, considerando-se em múltiplas classes de tráfego [8].

Nas redes DS-TE é possível mapear os fluxos (LSPs) com base em seus requisitos de QoS em Classes de Tráfego (CT), alocando os recursos necessários fim-a-fim. O mapeamento destes fluxos é realizado no plano de controle pelo algoritmo de seleção de caminhos baseado em restrições. Este, por estar em execução no plano de controle, pode ter acesso à base de dados de Engenharia de Tráfego (*Traffic Engineering Database – TED*) para escolher o melhor caminho não apenas para o novo LSP, mas para a rede como um todo, melhorando assim o número de LSPs que poderão ser atendidos na rede.

O principal diferencial das redes DS-TE para as redes MPLS-TE é a possibilidade de agrupar e gerir a qualidade de serviço em Classes de Tráfego. Le Faucher e Lai conceituam em [7] Classe de Tráfego como:

O conjunto de troncos de tráfego que passam por um determinado enlace, que está governado por um conjunto específico de restrições de utilização de banda nos enlaces da rede. Uma Classe de Tráfego (CT) é utilizada para os propósitos de alocação da banda, para o roteamento baseado em restrições e para o controle de admissão nas redes DS-TE. Um determinado Tronco de Tráfego pertence ao mesmo CT em todos os enlaces da rede DS-TE.

O conceito de Classe de Tráfego implica em um conjunto de restrições de utilização de banda (*Bandwidth Constraints – BCs*) para cada CT. Estas restrições, bem como o uso atual das larguras de banda por CT, são, nas

redes DS-TE, informações essenciais que devem ser entendidas por todos os componentes que antes operavam apenas com a visão do uso do enlace.

Le Faucher e Lai recomendam o uso de no máximo 8 (oito) classes de tráfego (CTs): da CT0 a CT7. Quanto maior o valor numérico da CT, maior é a sua prioridade. Desta forma, a CT0 é a classe de menor prioridade, enquanto a CT7 é a de maior prioridade. São necessárias pelo menos duas CTs para ser provida a diferenciação de serviços por classes de tráfego [7].

As redes DS-TE suportam a configuração de prioridades para casos de efetiva concorrência por recursos da rede. As prioridades em redes DS-TE são divididas em prioridade de estabelecimento (*setup*) e prioridade de manutenção (*hold*). Se um novo LSPy possuir maior prioridade de estabelecimento do que a prioridade de manutenção do LSPx já estabelecido, este poderá sofrer preempção para o estabelecimento do LSPy. As prioridades de estabelecimento e manutenção podem variar de 0 (zero) a 7 (sete), sendo 0 (zero) o valor mais prioritário e o valor 7 (sete) o valor menos prioritário.

O processo de encerramento de LSPs, devido à necessidade de recursos para estabelecer um novo LSP, é chamado de preempção. Estes são utilizadas em situações de competição de recursos em que é necessário garantir prioridade entre dois ou mais LSPs. São indispensáveis cuidados especiais com este processo, pois pode induzir o LSP que sofre preempção a tentar ser restabelecido, o que pode levar à preempção de outro LSP e este a um outro em um processo em cascata.

A arquitetura DS-TE introduziu a definição de TE-Classes. Uma TE-Classe é um par ordenado composto pela CT e prioridade de preempção. Segundo a definição, um domínio DS-TE pode ter uma CT com uma ou mais TE-Classes com prioridade diferentes e uma ou mais TE-Classes com a mesma prioridade em CTs distintas. Como é possível uma combinação de 8 (oito) classes de tráfego (CT) com 8 (oito) prioridades, totalizam-se em 64 (sessenta e quatro) as possibilidades de TE-Classes. Le Faucher e Lai sugerem a escolha de, no máximo, 8 (oito) TE-Classes. As combinações possíveis possibilitam ao gerente de rede inúmeras configurações, introduzindo flexibilidade na aplicação de diferentes formas de prioridade/preempção [7].

Em geral pode-se inferir os seguintes resultados operacionais das TE-Classes:

- Na mesma CT
 - Prioridade igual – não permite preempção entre LSPs da mesma CT.
 - Diferentes prioridades – permitem preempção entre LSPs da mesma CT
- Em CT distintas
 - Prioridades distintas – permitem preempção entre LSPs de CTs distintas.

- Prioridade igual – não permite preempção entre CTs distintas.

A. CÁLCULO DE ROTAS

Para a escolha do melhor caminho para um fluxo de pacotes é necessário a especificação de critérios passíveis de utilização para escolha deste caminho, também conhecido como requisito ou restrição - Banda, Número de Saltos (*hops*), Prioridade do LSP, Perda de Pacotes, Atraso -, entre outros.

Para selecionar o caminho que atenda às restrições ou requisitos impostos a um novo LSP, é necessário que haja uma base dados com as informações da rede que serão utilizadas como entrada para o algoritmo de cálculo de caminhos baseado em restrições. Cabe destacar que o processo de seleção de caminhos nas redes DS-TE necessitam de extensões na base de dados TED, protocolo de seleção de caminhos baseado em restrições e divulgação dos estados dos enlaces. Estes agora necessitam de informações de uso e limites de banda na granularidade de classes de tráfego, ao invés de somente por enlace como era feito nas redes MPLS-TE.

No cálculo de LSPs com controle centralizado (Figura 2), uma entidade gerenciadora central realiza o cálculo da rota e aciona o protocolo de estabelecimento de LSPs do plano de controle. Nesta entidade gerenciadora central, serão concentradas as informações dos estados da topologia e enlaces da rede. A entidade gerenciadora central deve ser capaz de receber uma requisição de estabelecimento de LSP do usuário, definir o caminho baseado em suas restrições, enviar comandos e configurações aos roteadores da rede de forma que seja possível o estabelecimento do novo LSP, preemptar LSPs e/ou rotear novamente o tráfego de acordo com as necessidades da rede [9].

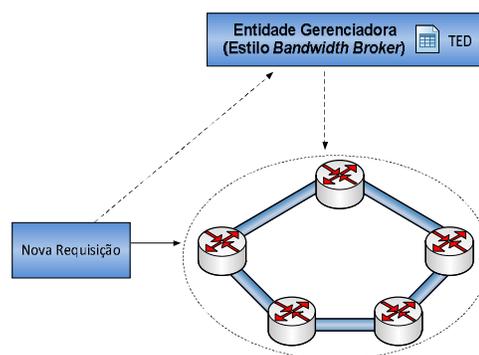


Figura 2. Cálculo de LSPs com Controle Centralizado Arcabouço DS-TE

Para o cálculo de LSPs em controle distribuído, a base de dados de Engenharia de Tráfego denominada TED está distribuída nos roteadores da rede, conforme ilustra a Figura 3. Estes roteadores são os responsáveis pelo cálculo do caminho que cada LSP seguirá na rede.

Para que o cálculo de rota do LSP seja efetuado de forma correta, as informações de restrições e do estado dos enlaces devem estar presentes e, também, devem ser atualizadas nos roteadores. Para isso, são necessários protocolos de estado do enlace como o *Intermediate System-to-Intermediate System - Traffic Engineering* (ISIS-TE) ou o *Open Shortest Path First - Traffic Engineering* (OSPF-TE) que, periodicamente, atualizam a TED em cada roteador e procuram garantir o cálculo de rota do LSP com informações atualizadas [8] [10].

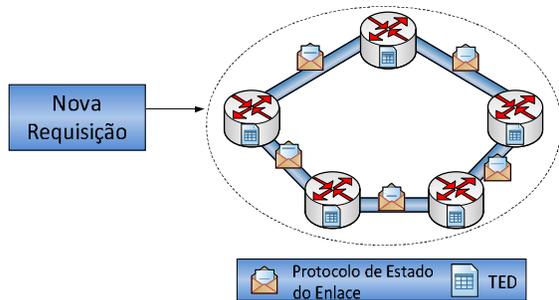


Figura 3. Cálculo de LSPs com Controle Distribuído Arcabouço DS-TE

B. Estabelecimento do LSP

Os dois protocolos mais difundidos para o estabelecimento de caminhos em redes DS-TE são os protocolos *Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering* (RSVP-TE – RFC 3209) e *Constraint-based Routing Label Distribution Protocol* (CR-LDP – RFC 3212) [11] [12].

O CR-LDP é uma evolução do protocolo *Label Distribution Protocol* (LDP) que além de distribuir os rótulos entre os roteadores MPLS com intuito de estabelecer novos LSPs permite especificar a reserva de banda nos enlaces pelos quais o novo LSP irá passar. Em fevereiro de 2003, o IETF definiu na RFC 3468 o protocolo CR-LDP como obsoleto, concentrando esforços exclusivamente no protocolo RSVP-TE [13].

Em redes DS-TE é necessário estender o protocolo RSVP-TE devido a necessidade de considerar a reserva de banda por CT¹. O protocolo RSVP-TE estendido tem por objetivo a configuração, manutenção, encerramento e sinalização de erro dos caminhos DS-TE [11].

A operação básica do RSVP-TE para o estabelecimento de um LSP em uma rede DS-TE é feita através da troca de mensagens dos tipos PATH e RESV. Após a escolha do caminho pelo algoritmo de seleção de caminhos baseado em restrições, o plano de controle envia uma solicitação de estabelecimento para o roteador de borda MPLS (LER) de origem e este propaga mensagens do tipo PATH para o próximo roteador do

¹ Devido a esta necessidade, foi adicionado um novo objeto à mensagem PATH chamado *Class Type Object* que contém a CT da novo LSP.

caminho selecionado, que por sua vez encaminha outra mensagem PATH para o próximo, até chegar ao roteador de borda MPLS (LER) de destino. O roteador de destino confirma a reserva de recursos através de mensagens RESV, que são propagadas até o roteador de origem como pode ser observado na Figura 4 [11].

Uma das premissas das redes DS-TE é a adoção de um modelo de alocação de banda para definir as regras de que serão utilizadas para reserva de banda (BCs) pelas CTs nos enlaces. O desempenho da rede está diretamente associado à escolha correta do modelo de alocação de banda e do algoritmo de seleção de caminhos baseado em restrições adequado aos fluxos existentes nesta.

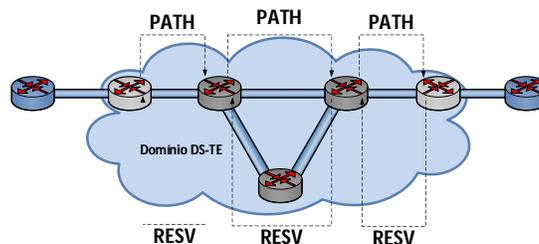


Figura 4. Troca de Mensagens PATH e RESV no Protocolo RSVP-TE

IV. MODELOS DE ALOCAÇÃO DE BANDA

Em uma rede DS-TE necessitamos da adoção de um modelo de alocação de banda (BAM) para efetivarmos as regras e limites para utilização dos enlaces pelas Classes de Tráfego (CTs). O modelo de alocação de banda define se um LSP será aceito, bloqueado ou sofrerá preempção em um determinado enlace. O modelo de alocação de banda está associado a um algoritmo de seleção de caminhos que definem os enlaces utilizados por um novo LSP (rota/caminho) sendo criado.

A Figura 5 apresenta uma classificação das principais estratégias de alocação de banda pelos BAMs. Na Figura 5 é possível observar o uso de três tipos de alocação de recurso [14]:

- Recurso privado (*Private*) – Nesta forma de alocação o recurso é exclusivo da Classe de Tráfego (CT);
- Compartilhamento de “alta para baixa” (*high-to-low* – HTL)² – Nesta forma de alocação a banda alocada para CTs de maior prioridade e não utilizada pode ser compartilhada, de forma temporária, com CTs de menor prioridade; e

² Nesta estratégia, se considera a “preempção” de aplicações menos prioritárias sempre que existe uma necessidade de banda por parte das aplicações mais prioritárias.

- Compartilhamento de “baixa para alta” (*low-to-high* – LTH)³ – Nesta forma de alocação a banda alocada para CTs de menor prioridade, e não utilizada, pode ser compartilhada, de forma temporária em forma de empréstimo, com CTs de maior prioridade.

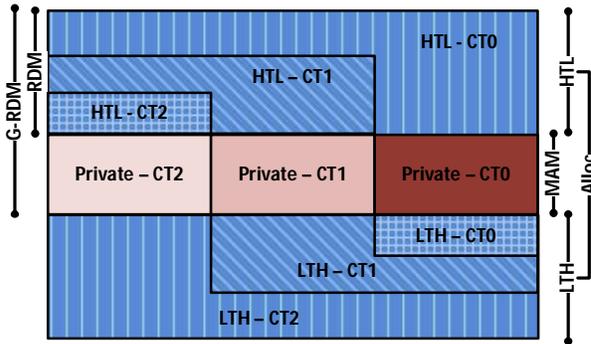


Figura 5. BAMS e estratégias de alocação de banda.

Existem diversos modelos de alocação de banda dentre eles destacamos: o *Maximum Allocation Model* (MAM), *Russian Doll Model* (RDM), *Generalized-RDM* (G-RDM), *AllocTC-Sharing* e *Generalized-BAM* (G-BAM).

A. Maximum Allocation Model (MAM)

O MAM corresponde a uma versão mais conservadora entre os modelos de alocação de banda existentes. Utilizando apenas a estratégia de recursos privados, o MAM efetivamente isola classes de tráfego (CT) de forma que não há nenhum compartilhamento de banda entre aplicações pertencentes a classes diferentes, conforme ilustra a Figura 6 [15].

Devido ao isolamento total entre o de diferentes CTs não existe necessidade de mecanismos de preempção.

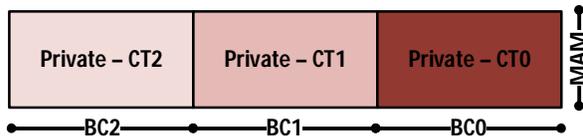


Figura 6. Modelo de Alocação de Banda MAM

B. Russian Doll Model (RDM)

O diferencial do modelo RDM com relação ao modelo MAM está principalmente na utilização da estratégia de compartilhamento “alta para baixa” (HTL).

³ Nesta estratégia, o conceito de “empréstimo” corresponde ao uso temporário da banda alocada a CTs menos prioritárias por parte dos LSPs mais prioritários. E “devolução” corresponde ao prematuro encerramento de um LSP prioritário estabelecido por empréstimo.

O raciocínio geral envolvido na operação do modelo RDM é derivado do modelo básico de prioridades utilizado por aplicações em rede. No caso, a banda livre das aplicações mais prioritárias pode ser temporariamente utilizada por aplicações menos prioritárias. Neste cenário, considera-se a “preempção” de aplicações menos prioritárias por parte das aplicações prioritárias sempre que existir uma necessidade de banda por parte das aplicações prioritárias (Figura 7) [16].

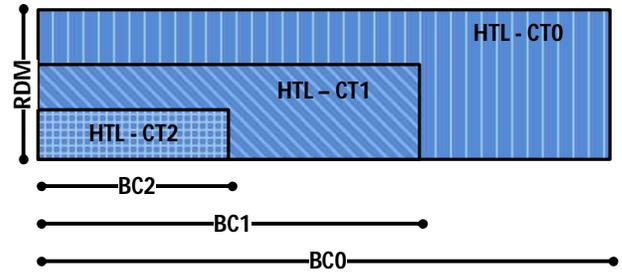


Figura 7. Modelo de Alocação de Banda RDM.

C. Generalized-RDM (G-RDM)

O *Generalized-RDM* (G-RDM), proposto por Adami e outros (2007), é uma solução híbrida do MAM e do RDM, que propõe reunir o melhor dos dois modelos de alocação de banda. Os autores integram as estratégias de compartilhamento “alta para baixa” com a estratégia de recursos privados em um mesmo BAM. Os *private pools* formam a banda reservada da classe em que outras CTs não podem utilizar. *Common pools* são a banda compartilhada com outras CTs de menor prioridade [17].

Como pode ser observado na Figura 8, o G-RDM divide virtualmente o enlace em duas partições. Na primeira partição, é aplicado o modelo MAM obtendo o efeito operacional de bandas privadas para as CTs com isolamento total entre as mesmas. Na segunda partição, é aplicado o modelo RDM com efeito operacional de compartilhamento da banda disponível de CTs de alta prioridade para CTs de baixa prioridade. Desta forma, o gerente da rede pode configurar a reserva de banda privada e compartilhada para as CTs.

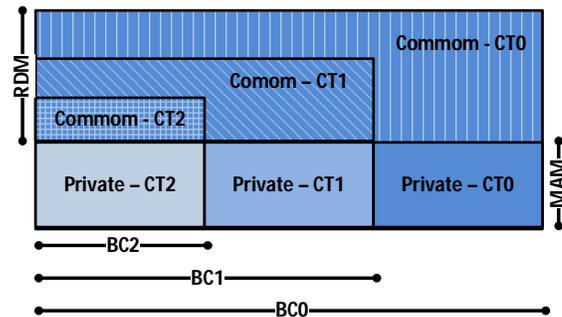


Figura 8. Modelo G-RDM (Generalized-RDM)

D. AllocTC-Sharing (ATCS)

O modelo *AllocTC-Sharing* utiliza uma estratégia oportunista de alocação de recursos (largura de banda). Conforme mostra a Figura 9, o *AllocTC-Sharing* permite duas estratégias de alocação recursos (banda) concomitantemente: compartilhamento de “alta para baixa” (“*high-to-low*” – HTL) e compartilhamento de “baixa para alta” (“*low-to-high*” – LTH). O estilo de alocação de banda “alta para baixa” é equivalente ao modelo RDM. O estilo alocação de banda “baixa para alta” permite que as classes de alta prioridade aloquem temporariamente a banda não utilizada, reservada para as classes de baixa prioridade, em forma de empréstimos [18] [19].

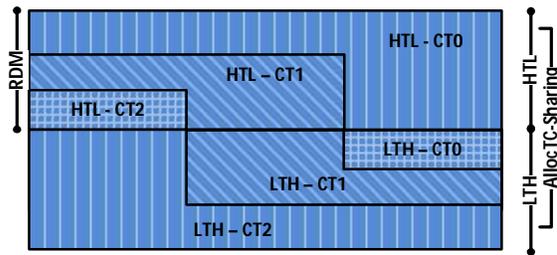


Figura 9. AllocTC-Sharing (ATCS).

E. Generalized-BAM (G-BAM)

O *Generalized BAM* (G-BAM) é um novo modelo de alocação de banda que integra de forma configurável as estratégias de alocação de recurso (banda): recurso privado (*private*), Compartilhamento de “alta para baixa” (*high-to-low* – HTL) e Compartilhamento de “baixa para alta” (*low-to-high* – LTH) [20].

No G-BAM é possível definir o quanto de recurso privado, compartilhamento HTL e compartilhamento LTH é desejado para cada uma das classes de tráfego. O resultado operacional é um modelo de alocação de banda que engloba os principais modelos de alocação de banda (MAM, RDM, *AllocTC-Sharing* e G-RDM) em um único modelo de alocação de banda generalizado, além de permitir novas configurações intermediárias entre os modelos existentes (Figura 10).

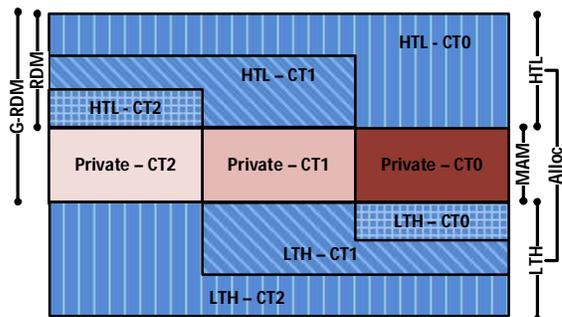


Figura 10. Generalized Bandwidth Allocation Model (G-BAM)

V. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS DE ALOCAÇÃO DE BANDA

Como apresentado na Seção III e detalhado em [21] e [22], o modelo MAM não admite compartilhamento de banda entre classes de tráfego (CT) (ou “alta para baixa” ou “baixa para alta”) e, como tal, é indicado quando se tem um perfil de tráfego de rede onde as classes de tráfego necessitam de alto isolamento. A utilização do modelo MAM em uma rede pode implicar em uma baixa eficiência na utilização de banda do enlace, pois os recursos disponíveis não podem ser compartilhados por LSPs de diferentes CTs.

Já a utilização do modelo RDM permite que aplicações de baixa prioridade possam se beneficiar da banda disponível que seria prioritariamente alocada para aplicações de alta prioridade. Em relação à situação inversa, as aplicações de alta prioridade não podem se beneficiar da banda disponível para as aplicações de baixa prioridade. No caso das aplicações de alta prioridade excederem as suas restrições de banda (além do configurado para a BC), as novas requisições de LSPs serão bloqueadas uma vez que não podem se beneficiar da banda ociosa alocada exclusivamente para aplicações de baixa prioridade. O impacto operacional para este modelo é que a utilização do enlace pode não ser máxima quando utilizado este BAM.

O modelo *AllocTC-Sharing* suporta ambos os estilos de compartilhamento concomitantemente: “alta para baixa” e “baixa para alta”, permitindo a utilização de banda disponível das CTs em ambas as direções. O custo operacional de permitir compartilhamento de banda em ambas as direções é que preempções também pode ocorrer em ambos os sentidos (preempção convencional de aplicações de baixa prioridade pelas aplicações de alta prioridade e “devoluções” de banda que são preempções de aplicações prioritárias estabelecida por empréstimo por aplicações de baixa prioridade).

O *AllocTC-Sharing* tende a maximizar a utilização do enlace de forma oportunista, mas também tem de considerar o impacto de “devolver” a banda emprestada de aplicações de baixa prioridade pelas aplicações de alta prioridade. Como tal, este modelo é mais adequado para aplicações de alta prioridade que permitam o uso elástico de banda.

As características básicas dos BAMs anteriormente descritos são resumidas na Tabela I. O impacto destas características é considerado em relação ao conjunto de aplicações agrupadas como CTs e em execução na rede.

TABELA I. CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS BAMS (MAM, RDM E *ALLOC-TC-SHARING*)

BAM – Características Operacionais	MAM	RDM	ATCS
Compartilhamento de “alta para baixa”	Não	Sim	Sim
Compartilhamento de “baixa para alta”	Não	Não	Sim
Eficiência na utilização de banda com alto volume de tráfego de baixa prioridade	Baixa	Alta	Alta
Eficiência na utilização de banda com alto volume de tráfego de alta prioridade	Baixa	Baixa	Alta
Isolamento entre CTs	Alto	Médio	Baixo

VI. UTILIZAÇÃO DINÂMICA DE BAMS

Conforme descrito nas Seções IV e V e detalhado em [22], cada modelo de alocação de banda tem como foco um determinado perfil de tráfego otimizando alguma métrica como: utilização de enlace, preempção, devolução, bloqueios, fluxos atendidos, entre outros. Diferentes modelos de alocação de banda operam com estratégias de alocação de recursos (banda) distintos e, como tal, o comportamento global da rede é diferente para BAMS distintos sob perfis de tráfego idênticos. Desta forma, a escolha de um modelo de alocação de banda e seus parâmetros necessita estar em sintonia com o perfil de tráfego da rede.

Do ponto de vista da gerência de redes, é mais eficaz a escolha e configuração dos BAMS de acordo com o perfil de tráfego da rede atual, ou seja, de forma dinâmica, considerando requisitos de SLA/QoS das aplicações (indiretamente requisitos das CTs, já que as aplicações são agrupadas em Classes de Tráfego - CTs).

Desta forma, quando o perfil de tráfego de uma rede muda, a utilização de BAMS distintos implica em respostas distintas para as aplicações em termos de demandas por recurso (banda). Neste contexto, argumenta-se que a estratégia de chaveamento entre BAMS pode ser relevante para a operação da rede.

Os resultados apresentados em [22] sugerem que o chaveamento dinâmico de BAMS pode otimizar os recursos da rede e minimizar as preempções e os bloqueios de LSPs. Como consequência, as desvantagens de operação de um determinado BAM, como preempções, devoluções e bloqueio de LSP podem ser minimizadas com a estratégia de chaveamento dinâmico para perfis de tráfego distintos. De maneira geral, a matriz de tráfego da rede pode ser usada como referência para a escolha de quais os parâmetros devem ser aplicadas de acordo com as aplicações ou com o perfil de CTs suportados pela rede.

O chaveamento de BAMS pode ser desencadeado por parâmetros, tais como preempções, bloqueios, devoluções, e utilização do enlace, entre outros. Estes parâmetros geram um conjunto de possibilidades para a configuração de utilização dos BAMS no contexto do gerenciamento de rede.

De maneira geral o G-BAM supre a necessidade de um modelo de transição para os casos onde não há a compatibilidade do BAM relativo às estratégias de alocação de banda.

VII. RECONFIGURAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE BANDA

Diversos artigos tomam como base uma configuração estática das restrições banda para as CTs, mas é necessária a reconfiguração das restrições de banda (BCs) dos modelos de alocação de bandas (BAMS) para que estas evoluam com o perfil de tráfego da rede.

Em [14] foram propostas duas abordagens para reconfiguração de BCs dos modelos de alocação de bandas (BAMS): A abordagem “*HARD*” e a abordagem “*SOFT*”. A abordagem “*HARD*” tem como premissa a reconfiguração imediata dos BCs mesmo que esta reconfiguração tenha impactos de projeto e operacionais nos BAMS. Já a abordagem “*SOFT*” tem como premissa minimizar os impactos de projeto e operacionais, mas para isto necessita de um tempo de transição entre as configurações da BCs.

A solução “*SOFT*” requer um plano de gerenciamento para coordenar a reconfiguração. Este plano executa ajustes de forma gradual observando o encerramento dos LSPs e consequentemente a liberação de recursos e ajustes de forma gradual das restrições de banda nos roteadores. Os efeitos operacionais desta abordagem apontam para uma melhor preservação das características operacionais dos BAMS, mas precisam de um tempo de convergência variado que depende da liberação dos recursos necessários para a reconfiguração.

Para a solução “*HARD*” existem duas situações onde ele pode ser aplicado: (i) CTs com banda disponível para ceder para outra CT e (ii) CTs sem banda disponível para ceder para outras CT.

A reconfiguração das restrições de banda (BC) para os modelos de alocação MAM, RDM e *AllocTC-Sharing* ocorre de forma transparente quando uma banda disponível de uma CT é transferida para outra CT independente de sua prioridade. Ou seja, na situação em que a CTs possui banda disponível para ceder para outra

CT qualquer, seja superior ou inferior, a reconfiguração ocorre sem impactos de projeto ou operacional, apenas atualizando os contadores de estado para refletir as novas restrições de banda (BC).

Para o caso de uma reconfiguração onde não haja banda disponível na CT que está cedendo banda teremos problemas que precisam ser tratados por cada modelo de alocação de banda.

No modelo MAM é necessário implementar o mecanismo de preempção para encerrar uma ou mais LSPs da CT saturada afim de liberar recursos para ajustar as restrições de banda. Esta implementação fere os conceitos do MAM de não haver preempção de recursos entre CTs.

Por outro lado, no modelo RDM a reconfiguração pode utilizar o mecanismo de preempção para encerrar LSPs de CTs de baixa prioridade possibilitando assim que CTs de baixa prioridade saturadas liberem recursos para uma CT de alta prioridade. O principal problema ocorre quando precisamos reconfigurar uma CT de alta prioridade saturada de forma a ceder banda para uma CT de baixa prioridade. Nesta situação precisamos adaptar o mecanismo existente de preempção para encerrar uma ou mais LSP da CT de alta prioridade saturada e ajustar as restrições de banda. Esta solução *hard* irá ferir o modelo RDM ao permitir um LSP de baixa prioridade encerrar um LSP de alta prioridade.

AllocTC-Sharing – Possui implementado tanto o mecanismo de preempção para de “alta-para-baixa” como o mecanismo de devolução (preempção de “baixa para alta”), não sendo necessário maior esforço de implementação. Se faz necessário apenas checar a implementação dos contadores internos para garantir consistência após a reconfiguração dos BCs. Como efeito operacional da solução *hard* podemos ter um LSP de alta prioridade sendo encerrada ou passando a ser contada como empréstimo de uma CT inferior e perdendo sua prioridade intrínseca antes da reconfiguração.

VIII. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Com o objetivo principal de mostrar que modelos de alocação de banda distintos possuem comportamentos

TABELA II. RESTRIÇÃO DE BANDA POR CLASSE DE TRÁFEGO

BCs	Max BC (%)	MAX BC (Mbps)	CT por BC	Max BC (%)	MAX BC (Mbps)	TC por BC
	G-BAM (RDM ou AllocTC-Sharing)			G-BAM (MAM)		
BC0	100	622	CT0+CT1+CT2	40	248,8	CT0
BC1	60	373,2	CT1+CT2	30	186,6	CT1
BC2	30	186,6	CT2	30	186,6	CT2

Os parâmetros configurados para cada LSP foram:

- Tempo de vida - modelada exponencialmente com média de 3600

distintos para um mesmo perfil de tráfego, foram realizados estudos de avaliação de desempenho baseados em simulações computacionais.

Nesta avaliação utilizamos o simulador especializado BAMSIm [23] com o modelo G-BAM configurado de forma a reproduzir o comportamento dos modelos MAM, RDM e *AllocTC-Sharing*. Esta reprodução de comportamentos visa alcançar o objetivo secundário desta simulação que é mostrar a capacidade do modelo G-BAM generalizar os principais modelos de alocação de banda existentes.

A topologia de rede usada tem como base a rede da NTT [24] (Figura 11) contendo 55 nós e 144 links de 622Mbps (STM-4 – SDH). Para este cenário de demonstração definimos uma única fonte de tráfego no Nó 0 e o destino o Nó 54. Desta forma, criamos um gargalo no Enlace 0 que conecta o Nó 0 e o Nó 2.

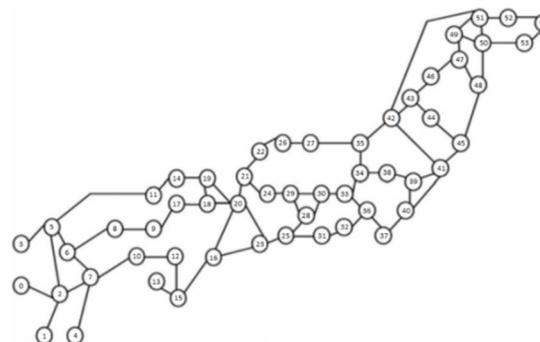


Figura 11. Topologia de rede utilizada nas simulações.

Três classes de tráfego foram configuradas:

- CT0 – aplicações de baixa prioridade;
- CT1 - aplicações de média prioridade; e
- CT2 - aplicações de alta prioridade.

O G-BAM foi configurado refletindo as restrições de banda (*Bandwidth Constraints* - BCs) conforme Tabela II.

segundos, provocando a saturação do Enlace 0;

- Banda– Distribuição uniforme entre 5 Mbps e 15 Mbps;
- Critério de parada – 24 horas (86400s) e
- Intervalo de chegada – Utilização da distribuição de Poisson com $\lambda = 12$ com o objetivo de distribuir 2000 LSPs criando 24 slots de tempo de 1 hora cada. Após a distribuição de LSPs por slots foi utilizada a distribuição uniforme com média de 3600 segundos para definir o momento de estabelecimento de cada LSP no slot.

Podemos observar que número de LSPs em uma determinada hora na Figura 12 reflete a distribuição de Poisson utilizada para definição do intervalo de chegada dos LSPs.

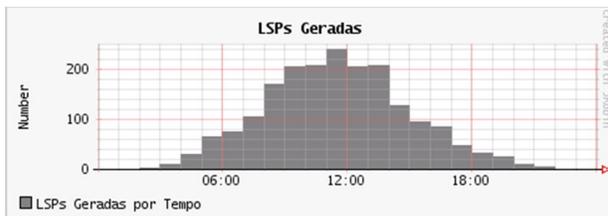


Figura 12. LSPs geradas por tempo.

Observamos na Figura 13 a distribuição dos 2000 LSPs de forma acumulativa no tempo.

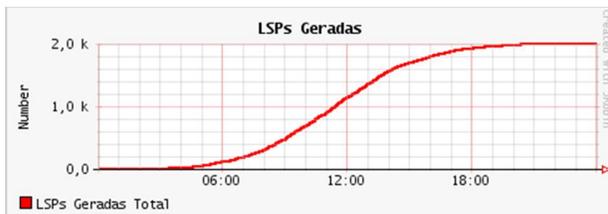


Figura 13. Total de LSPs geradas.

O tráfego apresentado nas Figuras 12 e 13 foi mantido como entrada para os modelos de alocação de banda MAM, RDM e AllocTC-Sharing. A seguir apresentamos o comportamento para cada modelo específico.

A. Maximum Allocation Model (MAM)

O modelo MAM não permite compartilhamento entre classes o que implica em não termos preempções e devoluções. Podemos observar claramente na linha vermelha da CT0 da figura 14 não ultrapassa o limite estabelecido de 248,8 Mbps. Este limite implica em bloqueios como veremos nos seguintes modelos.

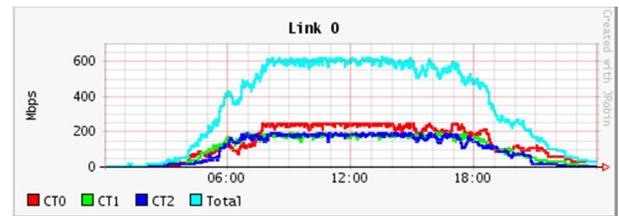


Figura 14. Utilização do Enlace MAM.

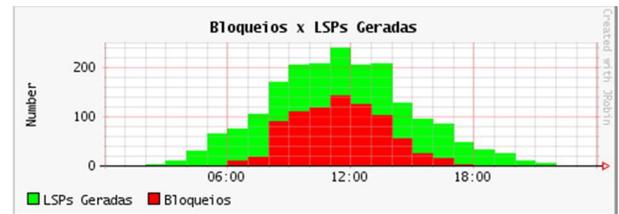


Figura 15. Bloqueios versus LSPs Geradas MAM.

B. Russian Doll Model (RDM)

O modelo RDM permite compartilhamento de “Alta para Baixa” (HTL) o implica na utilização de banda disponível das CTs de alta prioridade por LSPs de CTs de baixa prioridade. Como exemplo, este compartilhamento pode ser observado na linha vermelha da CT0 da figura 16 onde é ultrapassado o limite estabelecido de 248,8 Mbps. Este compartilhamento implica em um menor bloqueio quando comparamos a Figura 17 do modelo RDM com a Figura 15 do modelo MAM.

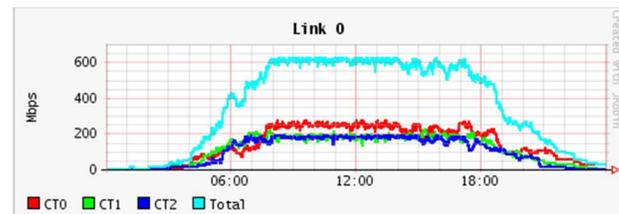


Figura 16. Utilização do Enlace RDM.

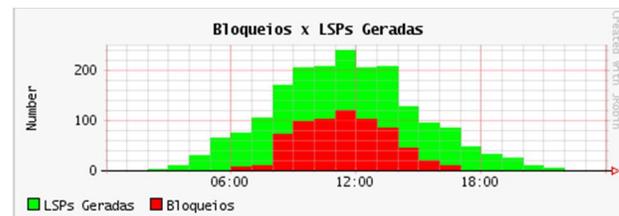


Figura 17. Bloqueios versus LSPs Geradas RDM.

O impacto negativo são as preempções geradas ao devolver a banda utilizada das CTs de alta prioridade (Figura 18).

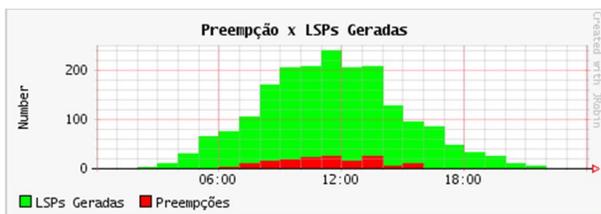


Figura 18. Preempção versus LSPs Geradas RDM.

C. AllocTC-Sharing (ATCS)

O modelo AllocTC-Sharing permite os compartilhamentos de “Alta para Baixa” (HTL) e “Baixa para Alta” (LTH) de forma concomitante gerando um compartilhamento de toda banda disponível no enlace entre as CTs. Podemos observar que a utilização do enlace no modelo AllocTC-Sharing (Figura 19) aproxima ao máximo do seu limite 622,0 Mbps, utilização maior do que a observada no MAM (Figura 14) e RDM (Figura 16).

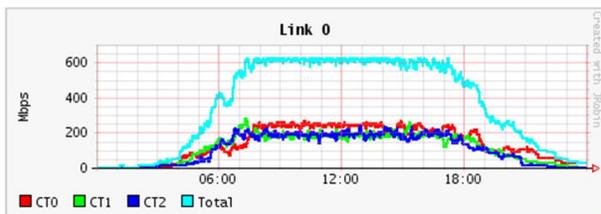


Figura 19. Utilização do Enlace ATCS.

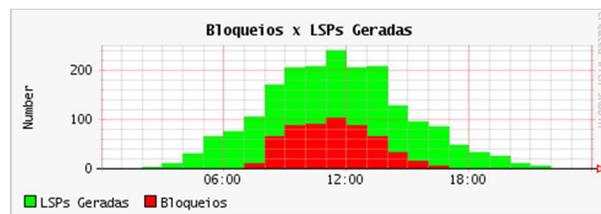


Figura 20 – Bloqueios versus LSPs Geradas ATCS.

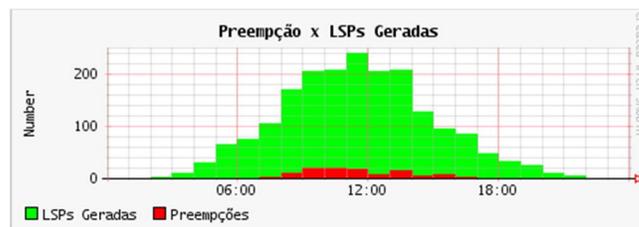


Figura 21 – Preempção versus LSPs Geradas ATCS.

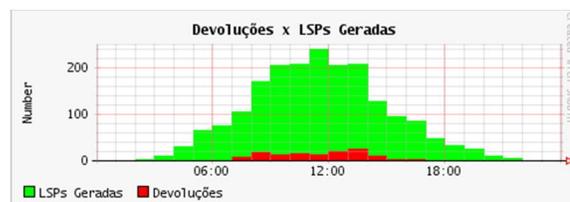


Figura 22 – Devolução versus LSPs Geradas ATCS.

A tabela III apresenta um resumo dos valores totais para cada modelo de alocação de banda e seus parâmetros de avaliação.

TABELA III. RESUMO DAS SIMULAÇÕES

	MAM	RDM	ATCS
Número de LSPs Preemptadas	0	148	111
Número de LSPs Devolvidas	0	0	131
Número de LSPs Bloqueadas	834	688	566
Número de LSPs Geradas	1998	1998	1998
Número de LSPs Estabelecidas	1164	1310	1432
Número de LSPs Finalizada Sem Preempção	1161	1159	1187
Total de Banda Gerada	15925	15925	15925
Total de Banda Finalizada Sem Preempção	8046	8158	8566
Bloqueios CT0	220	144	175
Bloqueios CT1	304	234	212
Bloqueios CT2	310	310	179
Preempções CT0	0	73	49
Preempções CT1	0	75	62
Preempções CT2	0	0	0
Devoluções CT0	0	0	0
Devoluções CT1	0	0	36
Devoluções CT2	0	0	95

A simulação atinge seus objetivos ao demonstrar que os modelos de alocação de banda possuem comportamentos distintos para diferentes perfis de tráfego e também que o modelo G-BAM generaliza corretamente os demais modelos ao refletir os comportamentos teóricos esperados para os mesmos.

IX. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma visão tutorial dos Modelos de Alocação de Banda (BAM) no contexto das Redes IP/MPLS/DS-TE. O artigo apresentou e discutiu as características dos principais modelos de alocação de banda propostos na literatura e, como exemplo de aplicabilidade dos BAM em redes IP, foi destacada a necessidade de reconfiguração das restrições de banda com a utilização dinâmica de BAMs e impactos relevantes em parâmetros de operação de redes tais como a utilização, preempção e bloqueio.

Por fim, foram apresentados resultados de simulação que mostraram a eficiência do modelo GBAM ao permitir reconfiguração dinâmica das restrições de banda e, conseqüente, aplicar diferentes modelos de alocação de banda (MAM, RDM e *AllocTC-Sharing*) em função não somente dos parâmetros de rede como também em função de restrições impostas pelo gerente.

De maneira geral, apresentou-se uma visão tutorial dos BAM e objetivou-se facilitar o entendimento das diversas e possíveis utilizações dos BAM. Além disso, simulou-se uma estratégia de reconfiguração dinâmica como demonstração dos seus potenciais benefícios.

AGRADECIMENTOS

AGRADECEMOS O APOIO FINANCEIRO DA FAPESB (FUNDO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DA BAHIA – BRASIL).

REFERÊNCIAS

- [1] J. Kurose e K. Ross, *Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down*, São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.
- [2] J. Martins, *Managing IP Networks: Challenges and Opportunities*, 1ª ed., New Jersey - USA: John Wiley & Sons/ IEEE Pres, 2003.
- [3] A. Tanenbaum, *Redes de Computadores*, 4ª ed., São Paulo: Campus, 2003.
- [4] J. Monteiro, L. Sampaio e M. Figueredo, "Qualidade de Serviço: Diagnóstico e Alternativas," 2002. [Online]. Available: <http://www.rnp.com.br>.
- [5] G. Armitage, *Quality of Service in IP Networks*, 1ª ed., New Riders Publishing, 2000.
- [6] D. Awduche, *Requirements for Traffic Engineering over MPLS*, IETF, 1999.
- [7] F. Le Faucheur e W. Lai, "Requirements for Support of Differentiated Services-Aware MPLS Traffic Engineering.," IETF, RFC 3564, 2003.
- [8] F. Le Faucheur, "Protocol Extensions for Support of DiffServ-aware MPLS Traffic Engineering.," IETF, RFC 4124, 2005.
- [9] C. SCOGLIO, "TEAM: A Traffic Engineering Automated Manager for DiffServ-Based MPLS Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 134-145, 2004.
- [10] E. Osborne e A. Simba, *Engenharia de Tráfego com MPLS – Projeto, Configuração e Gerenciamento do MPLS-TE para Otimização de Desempenho de Rede*, Cisco System, São Paulo: Campus, 2003.
- [11] D. Awduche, "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels," IETF, RFC3209, 2001.
- [12] B. Jamoussi, "Constraint-Based LSP Setup using LDP," IETF, RFC 3212, 2002.
- [13] L. Andersson e G. Swallow, "The Multiprotocol Label Switching (MPLS) Working Group decision on MPLS signaling protocols," IETF, RFC 3468, 2003.
- [14] R. Reale, R. Bezerra e J. Martins, "Analysis of Bandwidth Allocation Models Reconfiguration Impacts," em *3rd International Workshop on ICT Infrastructures and Services - ADVANCE 2014*, Miami, USA, 2014.
- [15] F. Le Faucheur e W. Lai, "Maximum Allocation Bandwidth Constraints for DiffServ-Aware MPLS Traffic Engineering.," IETF - Internet Engineering Task Force - RFC 4125, 2005.
- [16] F. Le Faucheur, "Russian Dolls Bandwidth Constraints Model for DiffServ-aware MPLS Traffic Engineering.," IETF - Internet Engineering Task Force, 2005.
- [17] D. Adami, C. Callegari, S. Giordano e M. Toninelli, "G-RDM: A New Bandwidth Constraints Model for DS-TE Networks," em *IEEE GLOBECOM*, 2007.
- [18] R. Reale, W. Pinto Neto e J. Martins, "Routing in DS-TE Networks with Opportunistic Bandwidth Allocation Model," em *17th IEEE Symposium on Computers and Communications - ISCC*, Cappadocia, Turkey, 2012.
- [19] R. Reale, W. Pinto Neto e J. Martins, "AllocTC-Sharing: A new Bandwidth Allocation Model for DS-TE Networks," em *7th Latin American Network*

Operations and Management Symposium - LANOMS 2011, Quito, 2011.

[20] R. Reale, R. Bezerra e J. Martins, "G BAM: A Generalized Bandwidth Allocation Model for IP/MPLS/DS-TE Networks," International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications - IJCNC, vol. 6, pp. 635-643, 2014.

[21] R. Reale, R. Bezerra e J. Martins, "A Bandwidth Allocation Model Provisioning Framework with Autonomic Characteristics," International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), vol. 5, pp. 103-119, 2013.

[22] R. Reale, R. Bezerra e J. Martins, "A Preliminary Evaluation of Bandwidth Allocation Model Dynamic Switching," International Journal of Computer Networks and Communications, pp. 131-143, 2014.

[23] W. Pinto Neto e J. Martins, "A RDM-like Bandwidth Management Algorithm for Traffic Engineering with DiffServ and MPLS Support", em International Conference on Telecommunications - ICT, St. Petersburg, Russia, 2008.

[24] M. A. Vega-Rodríguez e A. Rubio-Largo, "The Routing and Wavelength Assignment Problem in Optical WDM Networks tackled under a MultiObjective (MO) approach," [Online]. Available: http://mstar.unex.es/mstar_documentos/RWA/RWA-Instances.html. [Acesso em 12 Novembro 2015].