

Algoritmos de Seleção de Caminho e Gerenciamento de Banda Compartilhada conforme ao Modelo RDM para Classes de Tráfego em Rede DS-TE

Walter da C. P. Neto¹, Joberto S. B. Martins¹, Sérgio de F. Brito²

¹Núcleo de Pesquisa em Redes e Computação – Universidade Salvador (UNIFACS)
Salvador – BA – Brasil

²Departamento de Engenharia e Arquitetura (DEAR) – Universidade Salvador
(UNIFACS) Salvador – BA – Brasil

wcpneto@gmail.com, joberto@unifacs.br, sergiobrito@unifacs.br

Abstract. *MPLS-TE (Multiprotocol Label Switching -Traffic Engineering) and DiffServ are technical alternatives used to support Traffic Engineering and QoS-demanding applications, running on multimedia multiservice networks. This paper proposes the MinPreptDSTE and the ADAPT-RDM algorithms, suitable to allocate LSPs in DiffServ-aware MPLS Traffic Engineering (DS-TE) networks, which use the RDM (Russian Dolls Model) bandwidth constraint model. The operation of the proposed algorithms is integrated. The MinPreptDSTE tries to minimize the number of preemptions on the network by selecting paths considering classes types (CTs) configuration and the RDM model itself. The ADAPT-RDM algorithm preserves hierarchical CTs priorities and efficient resource utilization in the RDM model, by implementing bandwidth sharing among different CTs. The paper describes the proposed algorithms and evaluates their results considering different implementation scenarios.*

Resumo. *MPLS-TE (Multiprotocol Label Switching -Traffic Engineering) e DiffServ são alternativas técnicas usadas para suportar a Engenharia de Tráfego e as aplicações dependentes da qualidade de serviço (QoS), comumente encontradas nas redes multimídia e multiserviço. Este artigo propõe os algoritmos MinPreptDSTE e ADAPT-RDM para a alocação de LSPs em redes DS-TE (DiffServ-aware MPLS Traffic Engineering) baseadas no modelo de restrição de banda RDM (Russian Dolls Model). A operação dos algoritmos propostos é integrada. O algoritmo MinPreptDSTE busca minimizar a quantidade de preempções com uma seleção de caminhos que considera as configurações das classes de tráfego (CTs) e o modelo RDM. O ADAPT-RDM visa a preservação das prioridades das classes de tráfego (CTs) mais hierárquicas (com maior valor numérico) e o uso mais eficiente dos recursos no modelo RDM, através da implementação de uma estratégia de gerência de banda compartilhada entre CTs. O artigo descreve os algoritmos e avalia os seus resultados para diferentes cenários de implantação.*

1. Introdução

Existe nas redes de computadores uma tendência em se pesquisar, desenvolver e prover uma infra-estrutura de rede multiserviço (dados, voz e vídeo) capaz de suportar aplicações multimídia com requisitos distintos de qualidade de serviço (QoS) [Martins 2003]. Uma rede multimídia multiserviço, dentre outras vantagens, pode reduzir o custo operacional e facilitar a gerência da rede como um todo. Estas redes requerem serviços com garantias de QoS fim-a-fim [Zhang 2007], e nesse contexto, aplicações de Engenharia de Tráfego são propostas na tentativa de lidar com a complexidade resultante dos variados requisitos e conflitos existentes quando os recursos de rede (largura de banda dos enlaces) são um fator limitante [Awduche 1999].

O IETF propôs em [Le Faucheur e Lai 2003] os requisitos para o suporte de uma rede DS-TE (*DiffServ aware Traffic Engineering*), que em geral, foi proposta para que os benefícios inerentes às tecnologias *MPLS-TE* [Awduche 1999] e *DiffServ* [Blake 1998] possam ser obtidos e explorados conjuntamente. A arquitetura DS-TE [Le Faucheur e Lai 2003] é flexível e eficiente onde a engenharia de tráfego é aplicada por classe de tráfego (CT). A alocação ou não de recursos para requisições de LSPs que chegam à rede DS-TE é feita com base na capacidade de banda disponível na classe de tráfego (CT) ao qual a LSP pertence. De acordo com [Le Faucheur e Lai 2003] não existe um mapeamento mandatório e as CTs podem agregar uma ou mais classes de serviço *DiffServ*. Geralmente, o tráfego de cada CT está associado a um mesmo PHB *DiffServ* [Blake 1998] e que efetivamente compartilham um mesmo comportamento em termos de escalonamento na fila de saída de um roteador. O DS-TE [Le Faucheur e Lai 2003] suporta até 8 CTs distintas (CT0 até CT7), onde por procedimento padrão o tráfego melhor esforço geralmente é mapeado para o CT0.

No DS-TE é necessário a adoção de um modelo de restrição de banda (*BC Model – Bandwidth Constraint Model*) [Lai 2005] para a definição dos limites e regras adotadas para a utilização dos enlaces por parte das diferentes CTs existentes. Evita-se assim que os fluxos de tráfego associados à determinada CT monopolize a utilização dos enlaces da rede prejudicando os fluxos de tráfego de outras CTs. Um dos modelos de restrição de banda existentes é o RDM (*Russian Doll Model*) [Le Faucheur 2005], que não só define a máxima utilização de banda nos enlaces por parte de diferentes CTs, como também permite uma maior eficiência na utilização dessa banda disponível nos enlaces, através da possibilidade de compartilhamento de banda não utilizada entre diferentes CTs [Lai 2005].

Dois aspectos são de fundamental interesse em uma rede habilitada com DS-TE [Le Faucheur 2005(a)] [Le Faucheur 2005(b)]: a escolha de caminhos para as novas requisições de LSPs que chegam à rede e o gerenciamento da banda compartilhada entre CTs, ambos em estando em conformidade com o uso do modelo de restrição de banda RDM nos enlaces da rede.

Para a escolha do caminho de uma nova requisição de LSP, deve-se buscar um caminho no qual em todos os enlaces haja recurso (banda) disponível para a classe de tráfego (CT) ao qual a nova LSP está associada, de acordo com as regras definidas pelo modelo de restrição de banda RDM adotado. O gerenciamento da banda compartilhada entre CTs é importante para assegurar simultaneamente que uma maior eficiência na utilização dos recursos seja atingida através da utilização da capacidade não utilizada

(residual) de uma determinada CT por parte das LSPs associados à outra CT, bem como para garantir o limite máximo de utilização de banda para cada um das CTs configuradas na rede (pelo modelo de restrição de banda) em situações de disputa por recursos (congestionamento) nos enlaces, entre LSPs associadas a diferentes CTs.

Esse artigo propõe dois algoritmos que operam de forma integrada: O primeiro algoritmo é para a seleção de caminhos, o qual considera as configurações máximas de utilização de banda dos enlaces para cada CT configurada na rede em consonância com o modelo de restrição de banda RDM. Além deste atributo básico mencionado, o algoritmo busca por um caminho disponível para o estabelecimento de uma nova requisição de LSP de forma a minimizar a ocorrência de preempções na rede e melhorar a eficiência na utilização dos enlaces. O segundo algoritmo apresenta uma estratégia de gerência de banda compartilhada entre CTs que verifica a necessidade ou não de preempção de banda entre LSPs de diferentes CTs em situações de disputa por recursos da rede.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 é apresentado o modelo de restrição de banda RDM adotado na implementação realizada. Na seção 3 é apresentada uma formulação do problema de escolha de caminhos e gerência de banda compartilhada entre CTs dentro do contexto DS-TE/RDM. Na seção 4 os algoritmos de escolha de caminho e de gerência de banda compartilhada proposto são apresentados. Na seção 5 é feita uma avaliação dos algoritmos no intuito de validar a implementação realizada. Por fim, as considerações finais são apresentadas na seção 6.

2. O Modelo de Restrição de Banda RDM

Uma definição fundamental para operação dentro do contexto do DS-TE é a adoção de um modelo de restrição de banda (modelo BC – *Bandwidth Constraints*) para cada uma das CTs configuradas na rede. O modelo BC define a utilização máxima de banda em cada enlace da rede para uma ou mais tipos de classes (CTs). Dois modelos de restrições de banda são propostos na literatura, o modelo MAM (*Maximum Allocation Model*) proposto na RFC 4125 [Le Faucheur e Lai 2005], e o modelo RDM (*Russian Dolls Model*) proposto pela RFC 4127 [Le Faucheur 2005].

O modelo MAM é o mais intuitivo dos dois, onde é definida uma utilização máxima da largura de banda do enlace para cada CT individualmente. A soma total da banda ocupada pelas LSPs associadas a uma determinada CT não pode exceder o valor máximo de um enlace. Esse modelo não é o mais eficiente em termos de utilização da largura de banda disponível por enlace, já que não permite o compartilhamento de banda não-utilizada (residual) entre CTs distintos [Le Faucheur e Lai 2005]. Apesar de promover a total isolamento de tráfego entre as CTs configuradas em rede, esta menor eficiência na utilização dos recursos é um aspecto a ser trabalhado do ponto de vista da Engenharia de Tráfego.

O modelo RDM foi avaliado em [Lai 2005], sendo considerado uma estratégia mais eficiente em termos de utilização da largura de banda nos enlaces de uma rede DS-TE, pois permite o compartilhamento de recursos entre CTs distintas configuradas na rede. O princípio básico de funcionamento do modelo RDM é permitir que a banda não utilizada alocada para CTs hierarquicamente mais altas (com maior valor numérico) possa ser utilizada por CTs hierarquicamente mais baixos (com menor valor numérico).

A figura 1 ilustra um exemplo do modelo RDM configurado com três CTs, onde os valores dos limites de restrição da largura de banda são configurados para um ou mais CTs.

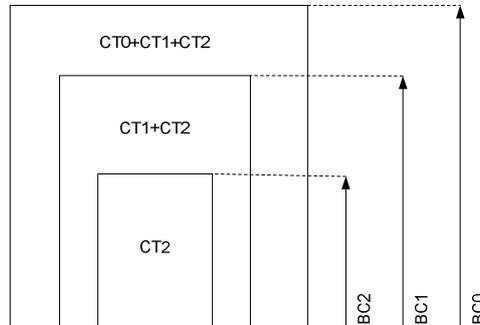


Figura 1. Modelo RDM e as restrições de banda dos CTs (BCs)

De acordo com a configuração estabelecida, as restrições de banda do modelo RDM (Figura 1) seguem as seguintes regras:

- Todos os LSPs associados ao CT2 não podem utilizar uma largura de banda maior do que BC2;
- Todos os LSPs associados aos CTs 1 e 2 não podem utilizar uma largura de banda maior do que BC1;
- Todos os LSPs associados aos CTs 0, 1 e 2 não podem utilizar uma largura de banda maior do que BC0;

A recomendação do DS-TE suporta até 8 BCs configurados na rede ($BC_i; i=0, \dots, 7$) [Le Faucheur e Lai 2003]. Considerando uma rede específica configurada com a seguinte definição de BCs como exemplo: $BC_2=50\%$, $BC_1=80\%$ e $BC_0=100\%$. Se fosse considerado ainda neste cenário, que todos os CTs estivessem utilizando as suas máximas configurações de banda permitida pelo modelo RDM, significaria dizer que: LSPs associados à CT2 poderiam utilizar 50% da capacidade dos enlaces, LSPs associados à CT1 não poderiam utilizar mais do que 30% ($80\%-50\%$) da capacidade dos enlaces, e LSPs associados à CT0 não poderiam utilizar mais do que 20% ($100\%-80\%$) da capacidade dos enlaces. O efeito resultante com a adoção do modelo RDM é que uma maior eficiência na utilização da largura de banda dos enlaces é geralmente atingida, devido à possibilidade de compartilhamento de banda entre CTs previsto no modelo RDM, já que, ocasionalmente, todas as CTs configuradas em rede não operam com suas máximas configurações de utilização de largura de banda simultaneamente.

Portanto, é possível que LSPs associados ao CT0 usem a banda não utilizada em BC1 e BC2, como também é possível que LSPs associados ao CT1 usem a banda não utilizada do BC0, devido à possibilidade de compartilhamento de recursos prevista no modelo RDM. Entretanto, caso haja disputa de recursos entre CTs em determinado enlace, a preempção de banda deve ser utilizada para garantir as configurações e a hierarquia do modelo RDM [Le Faucheur 2005]. Na RFC 4127 são apresentadas duas características de operação desejadas para uma implementação do modelo RDM, cujos pontos principais são descritos a seguir:

- O modelo RDM prevê uma utilização eficiente da largura de banda disponível no enlace com a simultânea proteção contra a degradação dos requisitos de QoS entre CTs.
- O recurso de preempção de banda tem que ser utilizado para garantir a isolamento ou preservação de largura de banda entre CTs independentemente do nível de disputa de banda entre CTs devido a requisições de banda de LSPs associadas que ocorrem em qualquer seqüência aleatória no tempo. De modo que para cada CT esteja garantindo a sua quota de largura de banda, não importando o nível de contenção por outras classes.

3. Formulação do Problema da Seleção de Caminhos e Gerenciamento da Banda Compartilhada no Contexto DS-TE/RDM e Trabalhos Relacionados

No DS-TE as capacidades de banda disponível nos enlaces devem ser divulgadas [Le Faucheur e Lai 2003] baseadas na informação das CTs, que na realidade correspondem a um conjunto de LSPs (*traffic trunks*) agrupados segundo um mesmo critério e regidas por um modelo de restrição de banda [Lai 2005] [Le Faucheur e Lai 2005] [Le Faucheur 2005(a)].

Quando uma nova requisição de LSP chega a uma rede habilitada com DS-TE é necessário procurar um caminho na rede (*path*) através de um algoritmo de seleção de caminho baseado em restrições. Uma possibilidade é a utilização do algoritmo CSPF (*Constrained Shortest Path First*) para o cálculo da trajetória (*path*) de novas requisições que cheguem a uma rede DS-TE. Para tal é necessário a extensão do CSPF sugerida na RFC 4124 [Le Faucheur 2005(b)], de forma que a largura de banda disponível não seja calculada apenas por enlace, e sim que seja calculada por CT. A métrica mais intuitiva utilizada pelo CSPF para o cálculo do caminho para uma nova requisição é o que tenha menor quantidade de saltos (*hops*) e que exista banda disponível na CT de acordo com as restrições de banda impostas pelo modelo RDM. Cada caminho é testado por ordem crescente de número de saltos, e se existir banda correspondente para ser utilizada em todos os enlaces do caminho na CT associada à nova requisição, o mesmo é selecionado. Se em nenhum dos caminhos existentes houver banda disponível para a CT ao qual a nova requisição está associada, a mesma é bloqueada.

Essa abordagem para a escolha de caminhos em uma rede DS-TE pode vir a ter baixa eficiência já que ela não leva em consideração a utilização atual da banda por parte dos CTs hierarquicamente inferiores ao CT correspondente à nova requisição, ou seja, não leva em consideração as propriedades de compartilhamento do modelo RDM. Isso pode levar a um elevado número de preempções na rede para acomodar uma nova requisição de determinada CT, pois pode vir a ser que o menor caminho escolhido tendo como métrica apenas o número de saltos esteja compartilhando uma maior quantidade de banda com outros CTs do que um outro caminho (maior em termos de número de *hops*). Neste artigo é proposto um algoritmo de seleção de caminho denominado MinPreptDSTE que minimiza o número de preempções em relação ao CSPF convencional, levando em conta a quantidade de banda compartilhada entre CTs nos enlaces para a escolha do melhor caminho.

O algoritmo MinPreptDSTE, após a escolha do caminho, apresenta também de forma integrada uma estratégia para a verificação e gerência da banda compartilhada, implantado por outro algoritmo denominado ADAPT-RDM. O ADAPT-RDM visa respeitar as máximas configurações de restrições de banda (BCs) impostas pelo modelo RDM. Após a escolha do novo caminho é necessário verificar nos enlaces a necessidade ou não de preempção de banda em CTs hierarquicamente inferiores, que possam vir a estar utilizando a banda não-utilizada momentânea da CT hierarquicamente superior (CT ao qual a nova requisição está associada). As CTs com maior valor numérico possuem maior prioridade ou proteção de tráfego do que as CTs com menor valor numérico em situações de disputa por recursos na rede.

A seguir é mostrado um exemplo numérico visando ilustrar a necessidade da gerência da banda compartilhada em conformidade com o modelo RDM. A Tabela 1 mostra a largura de banda e a CT correspondente para um conjunto de LSPs estabelecidos em dado momento para um determinado enlace hipotético de 300 Mbps. O enlace está configurado com três CTs (CT0, CT1 e CT2). Os valores de restrições de banda (BCs) são os seguintes: BC2 (CT2)=40% (120 Mbps), BC1 (CT1 + CT2)=70% (210 Mbps) e BC0 (CT0 + CT1 + CT2)=100% (300 Mbps).

Tabela 1. Configuração das LSPs estabelecidas¹

LSP	0	1	2	3	4	5	6	7
CT	2	1	1	1	0	0	0	0
Bandwidth	80	40	50	30	30	30	20	20

Supondo que uma nova requisição de LSP (LSP8 com largura de banda = 30Mbps) chegue associada à CT2 (CT de mais alta hierarquia para o modelo RDM configurado). A Tabela 2 ilustra qual seria configuração resultante dos BCs antes e depois do possível estabelecimento da nova requisição.

Tabela 2. Configuração dos BCs antes e depois da nova requisição

BC	Antes da LSP8	Máximo valor aceitável pelo modelo RDM	Depois da "LSP8"
2	26,67%	40,00%	36,67%
1	66,67%	70,00%	76,67%
0	100,00%	100,00%	110,00%

Como pode ser visto na Tabela 2 a LSP8 pode ser estabelecida pois existe capacidade disponível para a CT2 (Capacidade disponível para a CT2 = 40 Mbps → 120 Mbps relativo à máxima configuração de banda RDM menos os 80 Mbps já alocados para a LSP0). Entretanto, BC1 e BC0 teriam seus valores máximos especificados ultrapassados com o estabelecimento da nova requisição. Portanto, faz-se necessário a preempção de banda de LSPs associados aos CTs 1 e 0, no intuito de garantir o estabelecimento da nova requisição de maior prioridade (maior hierarquia em termos de CT) e consequentemente preservar as configurações do modelo RDM.

Detalhes e especificações de implementação a respeito de como a preempção de banda deve ser feita para que o modelo RDM seja respeitado não estão efetivamente

¹ No exemplo, a utilização de BC0 antes da "LSP8" foi configurada para ser igual à máxima capacidade do enlace no intuito de forçar a necessidade de preempção de banda entre CTs.

definidos na recomendação [Le Faucheur 2005]. Nos requisitos do DS-TE [F. Le Faucheur 2003] apenas é sugerido que a preempção pode ocorrer de acordo com as prioridades de estabelecimento (*setup*) e manutenção (*hold*), onde uma LSP a ser estabelecida pode causar a preempção de outra desde que sua prioridade de estabelecimento seja maior do que a prioridade de manutenção de uma outra LSP já estabelecida. Nenhuma consideração a respeito das CTs aos quais as LSPs estão associadas bem como a utilização de um modelo de restrição de banda em conjunto com as prioridades de estabelecimento e manutenção são realizadas. Recentemente [Oliveira 2007] [Scoglio 2002] [Oliveira 2004] abordaram uma política de preempção de LSPs mais flexível que leva em consideração as prioridades das LSPs como também busca minimizar a quantidade total de banda preemptada na rede, através da escolha para preempção de LSPs de baixa prioridade em conjunto com LSPs de baixa largura de banda. Entretanto, também não foram consideradas as propriedades de compartilhamento de banda considerando o modelo RDM, o que não permite a aplicação direta dessa política em uma rede conforme ao DS-TE com o modelo de restrição de banda RDM configurado.

4. Algoritmos MinPreptDSTE e ADAPT-RDM

Os algoritmos propostos têm as suas operações baseadas em uma gerência centralizada, no estilo *bandwidth broker* [Nichols 1999], no qual uma entidade gerenciadora (Figura 2) tem o conhecimento da topologia da rede, das LSPs que estão estabelecidas e dos parâmetros do modelo RDM configurados em rede.

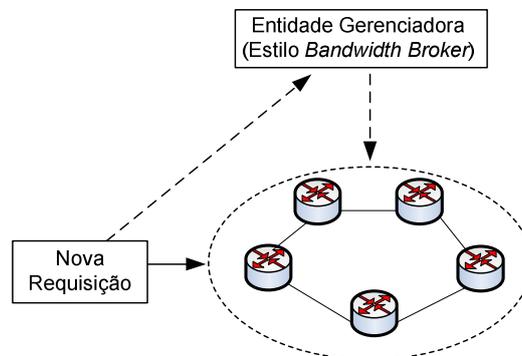


Figura 2. Gerência centralizada em um domínio DS-TE

A entidade gerenciadora de banda possui armazenada em sua base de dados os LSPs estabelecidos agrupados por CT, em cada enlace aos quais os mesmos estão associados, conforme ilustrado na Figura 3.

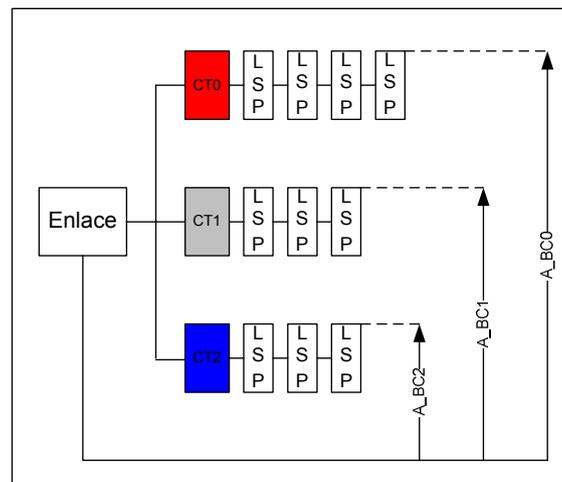


Figura 3. Base de dados da entidade gerenciadora com as LSPs agrupadas por CT

Além disso, a base de dados possui também algumas variáveis de controle armazenadas, mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis de controle da entidade gerenciadora

Variável	Descrição
A_BC[n]	Valor atual de banda ocupado pela restrição BC[n], existente para cada enlace da rede
MAX_BC[n]	Valor máximo da restrição BC[n], existente para cada enlace da rede
New_LSP_Band	Banda exigida pela nova requisição de LSP
Max_Caminhos_Disponíveis	Número máximo de caminhos disponíveis entre a origem e o destino para a nova requisição de LSP

4.2. O Algoritmo de Seleção de Caminhos MinPreptDSTE

O algoritmo de seleção de caminhos MinPreptDSTE proposto procura o caminho que apresenta banda disponível para acomodar a nova requisição de LSP associada a determinado CT que chega a rede, e que possui a menor banda compartilhada com outras CTs hierarquicamente inferiores referentes às LSPs já estabelecidas. A premissa de buscar o caminho com menor banda compartilhada tem por objetivo minimizar o número de preempções ocorridas na rede para acomodar a nova requisição, quando comparada com o algoritmo CSPF quando a escolha é baseada no caminho com menor número de saltos. Um pseudo-código do algoritmo MinPreptDSTE é mostrado na Figura 4.

O algoritmo recebe como parâmetros a CT (CT), a largura de banda (New_LSP_Band), e os caminhos disponíveis (Max_Caminhos_Disponíveis) para o estabelecimento da nova requisição de LSP. O conhecimento prévio dos caminhos disponíveis entre um par origem-destino (OD) é um pré-requisito para a aplicação do algoritmo de seleção de caminho proposto em um domínio DS-TE. Na linha 1 são inicializados o *flag* (**establish**) que indicará se é possível ou não o estabelecimento da nova LSP, e um conjunto de variáveis auxiliares para o cálculo do caminho escolhido para a mesma. Entre as linhas 2-17, para todos os caminhos disponíveis, é calculada a banda total compartilhada (**TotalSharedBand**) (linhas 6-9) entre a CT da nova

requisição e as CTs hierarquicamente inferiores, e também o limite de restrição de banda atual (**MenorValorBC**) (linhas 10-11) para cada um dos enlaces.

Portanto, duas condições são exigidas para a escolha de fato ou não de caminho para a nova requisição (linhas 18-28): Ter banda disponível dentro das restrições do modelo RDM (BCs) e ter a menor banda compartilhada com a CT da nova requisição de LSP para todos os enlaces do caminho. Se a primeira condição for atingida, o caminho que tiver o enlace com o menor valor de banda compartilhada entre a CT da nova requisição e as CTs hierarquicamente inferiores será o escolhido, visando à minimização do número de preempções necessárias na rede para o estabelecimento da nova requisição. Se nenhum dos caminhos possíveis obedecerem à primeira condição a nova requisição de LSP é bloqueada (linhas 30 e 31).

```

Alg. MinPreptDSTE (CT, New_LSP_Band, Max_Caminhos_Disponíveis)
1.  establish=0, MenorBandaCompart=0, MenorValorBC=0, BandaCompart=0,
    Vetor_MenorValorBC [Max_Caminhos_Disponíveis ];
2.  For (i=0; i< Max_Caminhos_Disponíveis;i++)
3.  {
4.    For (nEnl=0; nEnl< Max_Enlaces_do_Caminho; nEnl++)
5.    {
6.      For(k=0;k<LSP->item.CT;k++)
7.        TotalSharedBand = (A_BC[k]- A_BC [k+1]) + TotalSharedBand;
8.      if(BandaCompart <= TotalSharedBand)
9.        BandaCompart = TotalSharedBand;
10.     if(MenorValorBC <= MAX_BC[CT] - A_BC[CT])
11.       MenorValorBC = (MAX_BC[CT] - A_BC[CT]);
12.     TotalSharedBand=0;
13.   }
14.   Vetor_BandaCompart [i] = BandaCompart;
15.   Vetor_MenorValorBC [i] = MenorValorBC;
16.   BandaCompart = MenorValorBC= 0;
17. }
18. For (i=0; i< Max_Caminhos_Disponíveis;i++)
19. {
20.   if(New_LSP_Band <= Vetor_MenorValorBC [i])
21.   {
22.     establish=1;
23.     if(MenorBandaCompart <= Vetor_BandaCompart [i])
24.     {
25.       MenorBandaCompart = Vetor_BandaCompart [i];
26.       Indice_Melhor_Caminho = i;
27.     }
28.   }
29. }
30. if(establish ==0)
31.   Total_LSPs_Blocked++;
32. else
33. {
34.   prept=ADAPT-RDM (CT, New_LSP_Band, Indice_Melhor_Caminho);
35.   Establish_New_LSP_Request;
36.   Update_A_BC (nEnl, BR or BP)
37.   Update_link_values;
38. }
39. return(establish)

```

Figura 4. Pseudo-código do algoritmo MinPreptDSTE

No caso de existir pelo menos um caminho no qual a nova requisição de LSP possa ser estabelecida, o algoritmo que trata a estratégia gerenciamento de banda entre CTs deve ser acionado (linha 34), com o intuito de verificar se será ou não necessário preempitar banda de CTs hierarquicamente inferiores nos enlaces do caminho escolhido, visando atender à nova requisição. A execução da estratégia de gerência de banda é fundamental quando o modelo RDM é utilizado e assim é possível assegurar simultaneamente a isolação de tráfego e uma melhor eficiência da utilização de banda pelas diferentes CTs configuradas em rede. O algoritmo que implementa a estratégia de gerência de banda proposto, ADAPT-RDM, é descrito na seção 4.2.

Após essa verificação, a nova requisição de LSP é estabelecida e a estatísticas das cargas atuais dos enlaces e dos BCs (A_BC) são atualizadas (linhas 35- 37). Ao final, um *flag* é retornado informado se o estabelecimento foi possível ou não (linha 39).

4.2. ADAPT-RDM - Algoritmo de Gerenciamento de Banda Compartilhada para o Modelo RDM

O algoritmo ADAPT-RDM é responsável por verificar se será necessária ou não a preempção de LSPs em CTs hierarquicamente inferiores visando acomodar uma nova requisição de LSP associada a uma CT hierarquicamente superior, em conformidade com o modelo de restrição de banda RDM. Em outras palavras, ele é o responsável por garantir que os valores de restrições de banda BCs do modelo RDM estejam sempre sendo respeitados, independente do nível de disputa por recursos (largura de banda) entre as LSPs das CTs configuradas em rede.

Após o caminho (*path*) ser escolhido pelo algoritmo de seleção de caminhos, o algoritmo ADAPT-RDM deve ser acionado para verificar se algum dos limites de restrições de banda (BCs) configurados será extrapolado após a nova requisição ser estabelecida. Em caso afirmativo, a preempção de LSPs é acionada para que os limites sejam respeitados, seguindo a seguinte estratégia: O algoritmo checa a necessidade de preempção de banda nos BCs de acordo com a ordem decrescente de tamanho (de BC[n-1], BC[n-2], ..., até BC[0]). Dessa forma, tenta-se prevenir/evitar a preempção de mais largura de banda do que a necessária devido às configurações do modelo RDM, onde um BC de maior tamanho contém um BC de menor tamanho. A Figura 5 mostra um pseudo-código descrevendo a estratégia do ADAPT-RDM.

```

Alg. ADAPT-RDM (CT, New_LSP_Band, New_LSP_Path)
1.  Band_Preempted[nEnl]=0, BandUP=0; Prept=0;
2.  Calc_w(LSP)_Factor (A,B);
3.  For all Links in New_LSP_Path
4.  {
5.    For(n= New_LSP_CT 1;n≥0;n--)
6.    {
7.      BandUP = A_BC[n]- MAX_BC[n];
8.      If(BandUP>0)
9.      {
10.     Prept=1;
11.     LSP_Preemption (BandUP, nEnl, n);
12.    }
13.  }
14. }
15. return (prept);

```

Figura 5. Pseudo-código do algoritmo ADAPT-RDM

O algoritmo recebe como parâmetro o tipo de classe (**CT**), a largura de banda (**New_LSP_Band**), e o caminho escolhido pelo algoritmo de seleção de caminho (**New_LSP_Path**) no qual a nova LSP será estabelecida. Na linha 1 são inicializadas três variáveis. A primeira é um vetor que armazena temporariamente a quantidade de banda preemptada em cada enlace do caminho (**Band_Preempted[nEnl]**) durante a execução do algoritmo. A segunda variável armazena a quantidade de banda acima de cada restrição de banda (BC) do modelo RDM (**BandUP**). A última variável é um *flag* (**prept**) que é utilizado para indicar se foi necessário ou não a ocorrência de preempção para atender a nova requisição de LSP.

Na linha 2 o fator “ $w(lsp)$ ” é calculado para a nova requisição de LSP, com o intuito de definir a ordem na qual a nova LSP a ser estabelecida será armazenada na sua CT correspondente na base de dados da entidade gerenciadora (*Estab_List*). Esse fator é utilizado para selecionar quais LSPs têm preferência para serem preemptadas quando ocorre a disputa por recursos entre LSPs de diferentes CTs. O fator é calculado baseado em dois parâmetros: a prioridade e a largura de banda reservada da LSP, como mostrado na Equação 1.

$$w(lsp) = A.p(lsp) + B.b(lsp) \quad (1)$$

Na equação (1), “ $p(lsp)$ ” é a prioridade da LSP, e está associada com a necessidade de preemptar preferencialmente as LSPs de baixa prioridade de determinada CT (o intuito é permitir a utilização de diferentes níveis de prioridade para diferenciar classes de serviço dentro de um mesmo CT). “ $b(lsp)$ ” é a largura de banda reservada por cada LSP estabelecida na rede. As LSPs selecionadas para preempção em determinado CT são aquelas com o menor fator “ $w(lsp)$ ” para acomodar uma nova requisição associada a um CT hierarquicamente superior de acordo com o modelo RDM. “A” e “B” são pesos que podem ser configurados, a depender da necessidade do gerente da rede. Por exemplo, para A=1 e B=0, apenas a prioridade das LSPs é importante quando há necessidade de ocorrência de preempção.

Nas linhas 3-14 é verificada a necessidade de ajustar os BCs do modelo RDM para acomodar a nova requisição de LSP, se algum dos BCs tiverem seus valores máximos excedidos. Na linha 7 é calculada a quantidade de banda que está acima do valor limite de cada BC. Na linha 11 a preempção de LSPs de acordo com o fator $w(lsp)$ é executada nas CTs para adequar os valores das restrições de banda (BCs) que teriam seus valores ultrapassados pós-estabelecimento da nova requisição. A função que executa a preempção recebe como parâmetros o total de banda a ser preemptada (**BandUP**), o número atual do enlace que está sendo testado/avaliado (**nEnl**), e a CT correspondente aos quais as LSPs a serem preemptadas estão associadas (**n**). As LSPs preemptadas são retiradas da lista de LSP estabelecidas mantidas na entidade gerenciadora (**Estab_List**). Ao final, na linha 15, um *flag* (**prept**) é retornado informando se foi necessária a preempção de alguma LSP para acomodar a nova requisição.

5. Avaliação dos Algoritmos

Para a avaliação dos algoritmos propostos, simulações foram feitas com uma implementação do modelo de restrição de banda RDM feita em linguagem C. Primeiramente o algoritmo de gerência de banda compartilhada (ADAPT-RDM) entre CTs foi avaliado. Como cenário de avaliação, foi considerando a topologia de rede DS-TE mostrada na Figura 5. Nesta topologia que visa criar situações de conflito para o compartilhamento de banda, S1, S2 e S3 são as possíveis origens de LSPs na rede, tendo D1, D2 e D3 como seus respectivos destinos.

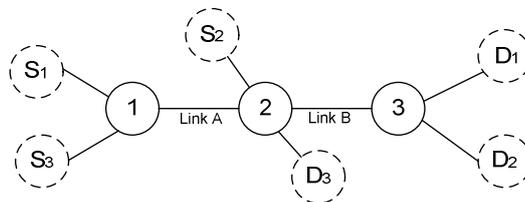


Figura 5. Topologia simulada para avaliação do algoritmo ADAPT-RDM

Os enlaces A e B foram configurados com 622 Mbps (STM-4) cada. Três CTs foram configuradas na rede (CT0, CT1 e CT2). A máxima porcentagem de banda alocada para os BCs (MAX_BC[n]) foi configurada de acordo com o modelo RDM para os enlaces A e B da seguinte forma: BC2 = 40%, BC1 = 70% e BC0 = 100% do enlace. As três fontes de tráfego (S1, S2 e S3) geram aleatoriamente requisições de estabelecimentos de LSPs por CT. A quantidade de banda de cada LSP gerada varia uniformemente entre 5 Mbps e 20 Mbps. O peso do fator de preempção em cada CT “ $w(lsp)$ ” foi configurado como A = 1 e B = 1. A carga de chegada de LSPs foi simulada da seguinte maneira: Um número entre 1 e 100 foi gerado segundo uma distribuição uniforme. Com 70% de probabilidade, uma LSP associada a CT0 é gerada em cada fonte, e com 50% de probabilidade uma LSP associada a CT1 é gerada em cada fonte. A carga das LSPs associadas com a CT2 (mais alta hierarquia entre as três CTs) foi aumentada de 20% até 70% de probabilidade, com o intuito de verificar a evolução BCs e a necessidade ou não de ocorrência de preempção de LSPs em situações de não-disputa e disputa por recursos (largura de banda) entre diferentes CTs. Os resultados da simulação do algoritmo ADAPT-RDM são mostrados na Figura 6.

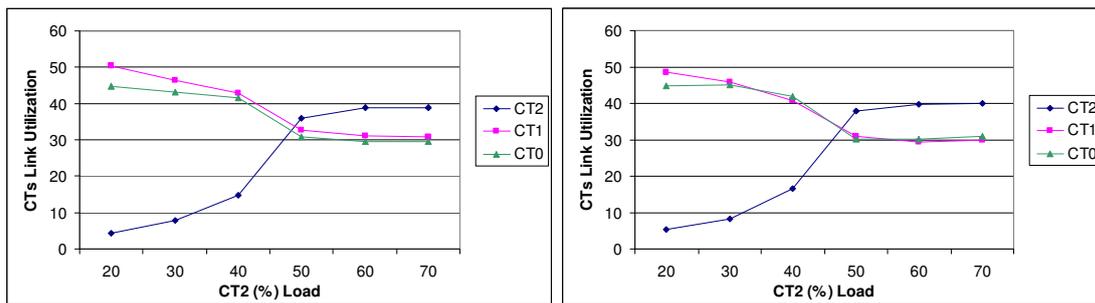


Figura 6. Disputa de Banda nos Enlaces A e B respectivamente

Como mostrado na Figura 6, quando existe largura de banda não-utilizada disponível na CT2 para nos enlaces A e B, este recurso pode ser utilizado por CTs hierarquicamente inferiores (CT0 e CT1 no caso), em função da capacidade de compartilhamento de banda prevista no modelo RDM e assegurada pela implementação do algoritmo ADAPT-RDM. Entretanto, em cenários de disputa por recursos, quando a carga associada à CT2 aumenta, as cargas associadas às CTs 0 e 1 começam a decair (a preempção de LSPs associadas às CTs 0 e 1 começa a ocorrer no algoritmo ADAPT-RDM) com a intenção de preservar a isolamento de tráfego entre diferentes CTs. Quando a carga associada a CT2 chega ao máximo valor BC2 ($MAX_BC[2] = 40\%$ da largura de banda do enlace), a preempção de banda não é mais necessária.

A Figura 7 mostra a evolução da “utilização” dos enlaces pelos BCs com o aumento da carga associada à CT2.

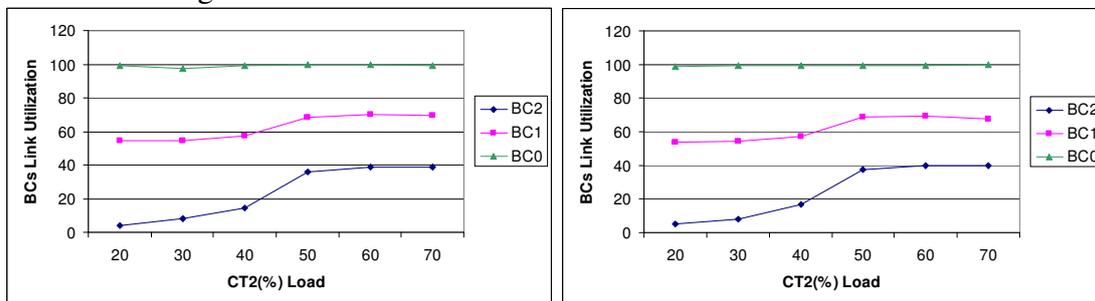


Figura 7. Evolução da “utilização” dos BCs nos enlaces A e B

Desde a carga inicial da CT2 (20%) o BC0 está utilizando seu valor máximo, devido à saturação dos enlaces causada pela alta carga de LSPs associadas à CT0. Inicialmente BC1 e BC2 não estão utilizando seus valores máximos, mas quando a carga associada a CT2 começa a aumentar, BC1 e BC2 aumentam até seus limites máximos, mostrando que as configurações do modelo RDM são preservadas. Após isso, as novas requisições de LSP não podem mais serem estabelecidas e começam a ser bloqueadas (Isso porque uma condição desta simulação é que as LSPs estabelecidas são mantidas).

Para a avaliação do algoritmo de seleção de caminhos que minimiza preempções (MinPreptDSTE) em uma rede DT-TE configurada com modelo RDM, a seguinte topologia de rede foi adotada (Figura 8):

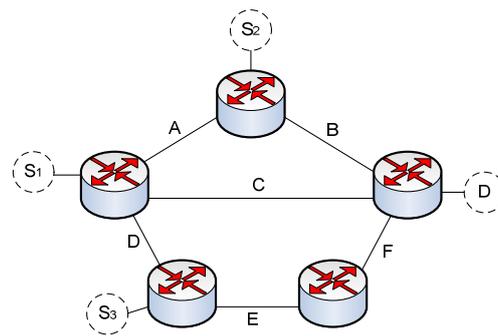


Figura 8. Topologia de rede utilizada para avaliação do algoritmo MinPreptDSTE

O desempenho do algoritmo MinPreptDSTE proposto foi comparado com o algoritmo CSPF convencional, que utiliza como métrica o menor número de saltos para a escolha do caminho. Três fontes geradoras de LSPs foram admitidas na simulação (S1, S2 e S3), todas com o mesmo destino (D). “S1” tem três opções de caminho, onde cada caminho tem uma quantidade distinta de saltos até o destino. “S2” e “S3” são tráfegos de interferência e apresentam cada um deles apenas uma opção de caminho até o destino (D). O intervalo entre chegadas de LSPs foi modelado exponencialmente tendo como média os seguintes valores: 2 seg. para LSPs associadas ao CT0, 4 seg. para LSPs associadas ao CT1 e 8 seg. para LSPs associadas ao CT2. A duração do estabelecimento de cada LSP na rede foi modelada exponencialmente com média de 100s. A largura de banda de cada LSP foi distribuída uniformemente entre 5Mbps e 20 Mbps. O intuito desta configuração é simular situações onde o compartilhamento de banda esteja ocorrendo, i.e., LSPs associadas ao CT0 utilizam a banda momentaneamente disponível nas CTs 1 e 2. Da mesma forma, as LSPs associadas ao CT1 utilizam a banda momentaneamente disponível na CT2. Dessa forma, em uma situação de disputa por recursos entre CTs, a necessidade de preempção na rede para o comprimento das restrições de banda (BCs) do modelo RDM pode ser avaliada. Na Figura 9 são mostrados os resultados comparativos entre os dois algoritmos avaliados, com número de preempções ocorridas na rede.

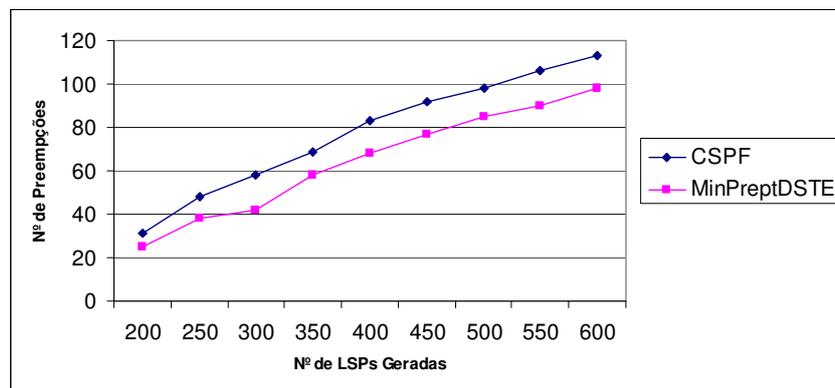


Figura 9. Comparação do número de preempções entre os dois algoritmos de seleção de caminhos

Inicialmente para um nível mais baixo de utilização dos enlaces os dois algoritmos têm um desempenho mais próximo. Entretanto, com o aumento do nível de

saturação dos enlaces (aumento do número de LSPs geradas) o algoritmo MinPreptDSTE proposto apresentou um desempenho superior quando comparado ao algoritmo CSPF baseado apenas no menor número de saltos, quando o objetivo a ser atingido é a minimização do número de preempções ocorridas na rede.

6. Considerações Finais

A utilização do DS-TE em redes (*backbones*) é uma alternativa que visa prover uma infra-estrutura de rede multiserviço capaz de suportar aplicações multimídia com requisitos distintos de qualidade de serviço (QoS). A partir da implementação do modelo de restrição de banda RDM nos enlaces de uma rede DS-TE é possível uma melhor eficiência na utilização dos recursos, simultaneamente com o isolamento do tráfego entre diferentes tipos de classes (CTs) configurados na rede. Este artigo propõe, num cenário de implantação conforme ao DS-TE com modelo de restrição de banda RDM, um algoritmo de seleção de caminho de LSPs (MinPreptDSTE) que minimiza o número de preempções e, integradamente a este, um algoritmo para o gerenciamento da banda compartilhada (ADAPT-RDM) entre CTs. A minimização do número de preempções de LSPs é um aspecto importante implantado pelos algoritmos de forma articulada, pois, dentre outras vantagens, reduz a interrupção do serviço, diminui a necessidade do tráfego de sinalização na rede bem como a necessidade de re-roteamento (quando esta funcionalidade está habilitada) das LSPs preemptadas. Na avaliação dos algoritmos realizada, o algoritmo de seleção de caminho proposto MinPreptDSTE mostrou desempenho superior ao algoritmo CSPF convencional, o qual é baseado apenas no critério de menor número de saltos (*hops*). A estratégia de gerência de banda compartilhada entre CTs suportada pelo algoritmo proposto ADAPT-RDM, por sua vez, é de fundamental importância para a manutenção dos parâmetros e da compatibilidade com o modelo RDM. Os resultados de simulação obtidos na avaliação dos algoritmos mostraram que a estratégia (algoritmo) ADAPT-RDM proposta é capaz de realizar o compartilhamento de banda esperado, bem como realizar a preservação das restrições máximas de banda estabelecidas pelo modelo RDM, em cenários de não-disputa e disputa pelos recursos em redes DS-TE. Com esta validação inicial positiva é possível em trabalhos futuros partir para a análise do desempenho dos algoritmos propostos em topologias de rede mais complexas.

Agradecimento

Este trabalho foi parcialmente suportado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), vinculada ao Ministério da Educação.

Referências

- F. Le Faucheur and W. Lai, "Requirements for support of differentiated services-aware MPLS traffic engineering", IETF, RFC 3564, July 2003.
- W. Lai, "Bandwidth constraints models for Diffserv-aware MPLS traffic engineering: performance evaluation", IETF, RFC 4128, June 2005.
- F. Le Faucheur and W. Lai, "Maximum allocation bandwidth constraints model for Diffserv-aware MPLS traffic engineering", IETF, RFC 4125, June 2005.

- F. Le Faucheur (a), "Russian dolls bandwidth constraints model for Diffserv-aware MPLS traffic engineering", IETF, RFC 4127, June 2005.
- D. Awduche, J. Malcolm, J. Agogbua., M. O'Dell, and J. McManus, "Requirements for traffic engineering over MPLS", IETF, RFC 2702, September 1999.
- J. de Oliveira, JP. Vasseur, L. Chen, and C. Scoglio, "Label switched path (LSP) preemption policies for MPLS traffic engineering", IETF, RFC 4829, April 2007.
- C. Scoglio, J. de Oliveira, I. F. Akyildiz, and G. Uhl, "A new preemption policy for DiffServ-aware traffic engineering to minimize rerouting", Proceedings of IEEE INFOCOM 2002.
- J. de Oliveira, C. Scoglio, I. Akyildiz, and G. Uhl, "New Preemption Policies for DiffServ-Aware Traffic Engineering to Minimize Rerouting in MPLS Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 12, No. 4, pp. 733-745, 2004.
- J. Martins, S. Aidarous, T. Plevyak et al, "Managing IP networks: challenges and opportunities", Willey -IEEE Press, September 2003.
- F. Le Faucheur (b), "Protocol Extensions for Support of Diffserv-aware MPLS Traffic Engineering", IETF, RFC 4124, June 2005.
- K. Nichols, V. Jacobson, L. Zhang, "A Two-bit Differentiated Services Architecture for the Internet", IETF, RFC 2638, July 1999.
- D. Zhang and D. Ionescu, "QoS Performance Analysis in Deployment of DiffServ-aware MPLS Traffic Engineering", IEEE/Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, July 2007.
- Blake, S., Black, D., Carlson, M., Davies, E., Wang, Z. and W. Weiss, "An Architecture for Differentiated Services", RFC 2475, December 1998.