

Aprovisionamento de Lightpath Inter-domínio baseado em PCE

Alisson S. L. Pontes¹, Nelson L. S. da Fonseca¹, André C. Drummond²

¹Instituto de Computação - Universidade Estadual de Campinas
Campinas, SP, Brasil

² Departamento de Ciência da Computação - Universidade de Brasília
Brasília, DF, Brasil

alissonslp@lrc.ic.unicamp.br, nfonseca@ic.unicamp.br, andred@cic.unb.br

Abstract. *Despite the research advances in intra-domain lightpath provisioning in WDM networks, efficient and practical schemes for path computation and resource advertisement in multi-domain mesh networks still need to be developed. Most of the proposed solutions in the literature do not support Traffic Engineering and are based on periodic message flooding techniques. The proposed solution provides a novel and economical way to disseminate information while performing the domain chain computation. It also provides a policy-based wavelength selection scheme that allows a load balanced provisioning of end-to-end lightpaths.*

Resumo. *Apesar dos avanços em provisionamento de caminhos ópticos intra-domínio em redes WDM, esquemas eficientes para cálculo de rota e divulgação de recursos ópticos em redes multi-domínio em malha ainda não foram estabelecidos. A maioria das soluções apresentadas na literatura não suportam Engenharia de Tráfego e são baseadas em técnicas de inundação periódica de mensagens de controle. Este artigo propõe uma maneira inovadora, econômica e simples de disseminar informações sobre o estado da rede combinada a um processo de cálculo de rota. A proposta também apresenta uma política de atribuição de comprimento de onda que provê balanceamento na distribuição dos caminhos ópticos fim-a-fim.*

1. Introdução

Apesar dos avanços em provisionamento de caminhos ópticos intra-domínio em redes ópticas com multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), esquemas eficientes para cálculo de rota e divulgação de disponibilidade de recursos em redes multi-domínio em malha ainda estão em fase inicial de estudo. Algumas propostas existentes tratam de questões específicas tais como escalabilidade na divulgação de informações de estado da rede para realização do cálculo de caminhos ópticos fim-a-fim [Casellas et al. 2009, Yannuzzi et al. 2008, Yannuzzi et al. 2009, Francisco et al. 2002]. Duas são as principais abordagens para solução de questões multi-domínio: as baseadas no protocolo *Border Gateway Protocol* (BGP) e as baseadas na arquitetura PCE (*Path Computation Element*).

O BGP, protocolo padrão *de facto* da Internet, provê meios para obtenção de informações de alcançabilidade a partir dos domínios vizinhos, bem como meios

de propagar essas informações. Na divulgação de informações de alcançabilidade, roteadores de borda disseminam os endereços de todos os roteadores inter-domínio que eles alcançam (*external BGP* - eBGP). Quando um roteador de borda recebe essas informações, ele as repassa para todos os roteadores dentro do seu domínio (*internal BGP* - iBGP). Assim, cada roteador pode definir rotas para seus pares em outros domínios da rede. Apesar da comprovada eficácia do BGP como protocolo de roteamento inter-domínio nas redes IP, os esquemas baseados em BGP também herdam suas deficiências: falta de suporte a divulgação de informação de Engenharia de Tráfego (TE), convergência lenta e alta sobrecarga de sinalização [Yannuzzi et al. 2008], o que dificulta sua utilização em redes ópticas WDM.

A necessidade crescente de utilização de TE em redes de transporte levou à criação da arquitetura PCE, padronizada pela *Internet Engineering Task Force* (IETF [IETF]). A arquitetura PCE descreve o conjunto de componentes abstratos e protocolos de comunicação entre esses componentes [Farrel et al. 2006], sem fornecer uma descrição detalhada de todos seus componentes. Trabalhos recentes detalharam alguns componentes da arquitetura PCE necessários para o desenvolvimento de aplicações sobre esta plataforma [Chamania et al. 2012]. A arquitetura PCE pode ser vista como o primeiro passo para a implementação de cálculo de rotas baseado em restrições (engenharia de tráfego) e novas soluções devem ser desenvolvidas sobre essa arquitetura para o desenvolvimento do plano de controle das redes ópticas do futuro.

Assim sendo, é necessária a definição de soluções para o provisionamento de caminhos ópticos inter-domínio. No BRPC (*A Backward-Recursive PCE-Based Computation*), o PCE do nó fonte precisa definir a cadeia de domínios entre o domínio do nó fonte e o domínio do nó destino, porém a especificação da arquitetura PCE não define um protocolo de divulgação de estado da rede, a cadeia de domínios deve ser pré-determinada administrativamente ou descoberta através de algum mecanismo ainda não especificado. A especificação do padrão PCE também não aborda restrições de continuidade de comprimento de onda [Casellas et al. 2009], apesar de algumas propostas lidarem com restrições específicas [Lee et al. 2011]. Ademais, apesar de existirem propostas para a redução da sobrecarga de sinalização em redes multi-domínio baseadas em PCE [Chamania et al. 2009], essa questão não foi suficientemente analisada, em especial a sobrecarga de sinalização de controle e mensagens de atualização de estado da rede multi-domínio.

Em resposta aos desafios atuais, este artigo propõe uma solução para o provisionamento de caminhos ópticos inter-domínio em redes WDM em malha baseada no uso de agentes de controle especializados tais como os da arquitetura PCE. Introduce-se uma forma inovadora de cálculo da cadeia de domínios entre o domínio do nó fonte e o domínio do nó destino, questão esta até então em aberto na arquitetura PCE. Um conjunto de políticas é introduzido para lidar com restrições de continuidade de comprimento de onda (WCC - *Wavelength Continuity Constraint*), o que propicia uma solução completa de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*). Define-se, também, um esquema de divulgação de recursos ópticos sob-demanda que opera em conjunto com o cálculo de rota e mantém confidencialidade de informações intra-domínio.

Simulações realizadas para avaliar a efetividade da solução proposta demons-

tram que há redução significativa da sobrecarga de mensagens trocadas e da percentagem de chamadas bloqueadas, quando comparado com uma solução baseada no BGP [Blanchet et al. 2001, Francisco et al. 2002]. Além disso, os resultados evidenciam o potencial de plataformas baseada em PCE para o aprovisionamento de caminhos ópticos numa rede óptica multi-domínio com múltiplas restrições de roteamento.

2. Trabalhos Relacionados

Planos de Controle distribuídos como o GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) [Farrel and Bryskin 2006] visam facilitar o aprovisionamento dinâmico de caminhos ópticos com restrições de TE. O IETF especificou duas abordagens para o cálculo de caminhos multi-domínio: BRPC e o *per-domain* [Vasseur et al. 2008]. Ambos usam algoritmos do tipo *Constrained Shortest Path First* (CSPF), que usam um grafo auxiliar para representar a rede. Nesses algoritmos, os enlaces que não satisfazem as restrições definidas por uma chamada são retirados do grafo para que se faça a execução do algoritmo de menor caminho de Dijkstra no grafo resultante [Dasgupta et al. 2007].

No BRPC, o PCE fonte especifica a sequência de domínios entre a fonte e o destino, tal informação é transportada na mensagem de requisição de cálculo de rota do protocolo de comunicação PCE (PCEP) [Vasseur and Roux 2009]. O BRPC calcula, então, o melhor caminho fim-a-fim que atravessa essa sequência. A sequência é pré-definida administrativamente ou descoberta de alguma maneira não explicada no padrão [Vasseur et al. 2009], o que motivou o algoritmo introduzido no presente artigo.

Na abordagem *per-domain*, os métodos de cálculo de rota são baseados em mecanismos de divulgação de alcançabilidade como o do BGP. O caminho completo é obtido concatenando-se segmentos de rota calculados em cada domínio. Contudo, a rota resultante é obtida a partir de informações desatualizadas nas bases de dados de roteamento de cada comutador. Para que se possa garantir um bom nível de confiança no cálculo de rotas, são necessários mecanismos bem projetados de divulgação de informação de alcançabilidade e sobre o estado de enlace da rede.

No entanto, ambos esquemas de cálculo de rota não tratam da restrição WCC, principalmente pela falta de informações sobre disponibilidade de recursos ópticos na rede. Por conseguinte, tanto o BRPC quanto o esquema *per domain* não possuem as informações necessárias para o estabelecimento de caminhos ópticos multi-domínio.

Alguns trabalhos anteriores tentaram tratar essas questões. Casellas e colaboradores [Casellas et al. 2009] estenderam o algoritmo BRPC para tratar WCC fim-a-fim. Francisco e colaboradores [Francisco et al. 2002] disponibilizaram a primeira implementação do BGP para redes ópticas (OBGP), que contém a especificação de requisitos e as extensões necessárias ao BGP para criar o OBGP. Yannuzzi e colaboradores [Yannuzzi et al. 2008, Yannuzzi et al. 2009] enfatizaram a necessidade de se divulgar recursos ópticos de maneira agregada para o aprovisionamento de caminhos ópticos em redes WDM, e definiram um processo de agregação de informações de disponibilidade de comprimento de onda. Greco e colaboradores [Polito et al. 2011] desenvolveram um modelo de segurança para PCE para ser utilizado em redes multi-domínio.

No entanto, um ponto falho em todos esses trabalhos é o processo de divulgação de atualização do estado dos recursos na rede, fator crítico na geração de sobrecarga

de sinalização da rede. A fim de reduzir essa sobrecarga e a taxa de chamadas bloqueadas, Chamania e colaboradores [Chamania et al. 2009] propuseram um mecanismo de pré-reserva de recursos e envio de atualizações quando a quantidade de recursos pré-reservados e a disponível atingem um limiar específico. Contudo, como a proposta não foi avaliada em conjunto com um protocolo de roteamento, o aumento da sobrecarga de sinalização em decorrência da política de disparo de mensagens de atualização não pode ser aferida adequadamente.

Em relação ao estado atual do conhecimento, pode-se afirmar que as principais contribuições do presente artigo são uma estratégia para a divulgação sob-demanda de recursos ópticos da rede e uma estratégia para cálculo da cadeia de domínios entre o nó fonte e o nó destino. O esquema proposto provê uma solução simples e eficiente ao combinar o cálculo da cadeia de domínios com a divulgação de recursos.

3. Proposta para Aprovisionamento de Caminhos Ópticos

O esquema proposto para provisionamento de caminhos ópticos multi-domínio segue uma arquitetura de cálculo de rota com múltiplos PCEs e comunicação inter-PCE (*Multiple PCE Path Computation with Inter-PCE Communication Architecture* [Farrel et al. 2006]). Nessa arquitetura, há pelo menos um PCE por domínio que realiza roteamento utilizando informações contidas em sua TED (*Traffic Engineering Database*) e obtidas por meio de troca de mensagens entre os PCEs de domínios vizinhos.

A solução proposta introduz um novo algoritmo para disseminação de informações e cálculo das cadeias de domínios entre o nó fonte e o destino, e implementa uma política de seleção de rotas que resulta numa melhor distribuição dos caminhos ópticos na rede, balanceando a utilização de recursos. As mensagens trocadas incluem informações de alcançabilidade e disponibilidade de recursos suficientes para que se possa escolher o melhor comprimento de onda para se criar um caminho de luz fim-a-fim. Utiliza-se a técnica de *backtracking* para lidar com TEDs desatualizadas, o que aumenta as chances de sucesso do cálculo das cadeias de domínio. *Backtracking* é um esquema similar ao *crank-back* do RSVP [Farrel et al. 2007] e é realizado para tratar falhas no cálculo de rota, para que se possa reencaminhar a chamada por caminhos alternativos, evitando, assim, o bloqueio da mesma.

O esquema de disseminação de mensagens de atualização dispara a troca de mensagens apenas na ocorrência de eventos de *backtracking*. Quando um domínio recebe uma requisição de chamada e não consegue repassá-la adiante, uma mensagem de *backtrack* é retornada ao PCE que lhe fez a requisição. O PCE que recebe o *backtracking* atualiza informações referentes ao domínio que gerou o *backtracking* e escolhe um domínio alternativo para repassar a requisição. A política de seleção de rota utilizada baseia-se na disponibilidade dos recursos disponíveis na rede, resultando numa solução de roteamento balanceada.

Os PCEs rodam um protocolo de vetor caminho com múltiplos caminhos (*path vector with path caching protocol* [Medhi and Ramasamy 2007]), o que quer dizer que cada PCE pode conter em sua TED vários caminhos (cadeias de domínios) para os demais domínios da rede. O número máximo de caminhos para um dado destino que um PCE pode conter em sua TED é igual ao número de nós de borda do domínio. Cada registro de uma TED possui, além da cadeia de domínios entre a fonte e o destino, uma lista de com-

primentos de onda disponíveis e o nó de borda de saída para o próximo domínio da cadeia. Quando um PCE recebe uma PCEP request (PCEPreq) de um nó intra-domínio, ele deve escolher uma rota dentre as disponíveis para o destino. O primeiro critério para escolha do melhor caminho determina que deve ser escolhido o caminho com maior número de comprimentos de onda disponíveis. Se houver mais de uma opção, o caminho com a menor cadeia de domínios deve ser escolhido. Por último, se houver mais de uma opção, segue-se as regras de desempate do BGP. Esses critérios produzem uma distribuição de recursos balanceada e, conseqüentemente, aumentam a disponibilidade de recursos, evitando a formação de gargalos.

Depois de definir a cadeia de domínios e o comprimento de onda, o PCE fonte sinaliza para os nós intra-domínio alocarem recursos necessários para receber a chamada do nó fonte ao nó de borda escolhido e reencaminha o PCEPreq para o próximo PCE da cadeia de domínios. O PCE que recebe o PCEPreq executa o mesmo procedimento considerando o comprimento de onda escolhido pelo PCE fonte e o nó de borda de saída do PCE que lhe encaminhou a requisição. O procedimento continua até que o domínio destino seja alcançado e um caminho de luz possa ser estabelecido. Por fim, procedimentos de estabelecimento de caminho fim-a-fim e de reserva de recursos como o BRPC e o RSVP são executados [Awduche et al. 2001].

Por meio de um exemplo pode-se entender melhor a solução proposta. Considere a rede representada pela Figura 1, composta por cinco domínios, cada um com um PCE. O *PCE2* tem conhecimento do estado dos enlaces intra e inter-domínio do domínio *D2*, e por isso sabe da disponibilidade de recursos ópticos para alcançar *D1*. As mensagens de atualização recebidas por *PCE3* vindas do *PCE2* são analisadas e armazenadas na TED do *PCE3*, que atualiza-se sobre a alcançabilidade e disponibilidade de recursos para alcançar *D1*. Essas mensagens contêm informações sobre o domínio destino (*D1*), sobre o nó de borda de entrada de *D2* e sobre os comprimentos de onda disponíveis entre o nó de borda de entrada de *D2* e o nó de borda de entrada do domínio destino (*D1*). Da mesma maneira, *PCE3* pode enviar atualizações para a TED do *PCE4* estendendo o caminho para *D1* e definindo os comprimentos de onda disponíveis como a intersecção dos comprimentos de onda nos caminhos *D1-D3* e *D3-D4*. A TED do *PCE5* pode ser finalmente atualizada da mesma forma pelo *PCE3* e pelo *PCE4*.

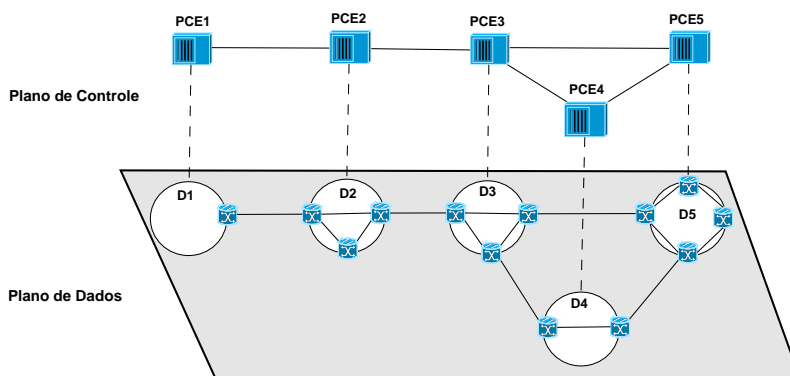


Figura 1. Cenário de rede multi-domínio com arquitetura PCE.

Ao fim desse processo, *PCE5* deve ter uma visão geral da topologia como representada na Figura 2, que inclui dois possíveis caminhos para alcançar *D1*, um via *D3*

(linha pontilhada) e outra via $D4$ (linha cheia). Ademais, $PCE5$ não tem nenhuma informação sobre as topologias internas de qualquer domínio, que é uma característica importante para assegurar o diferencial competitivo dos provedores de serviços da Internet.

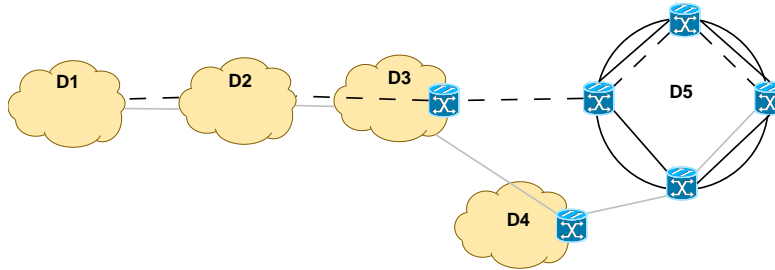


Figura 2. Visão da topologia da rede pelo PCE5.

O protocolo é descrito no Algoritmo 1 e no Algoritmo 2.

As principais contribuições do esquema proposto são o procedimento de disseminação de recursos disponíveis usado para atualizar as TEDs dos PCEs, combinado ao processo de cálculo da cadeia de domínios entre a fonte e o destino. Ao contrário das soluções baseadas em BGP, que usa inundação controlada por temporizadores, a solução proposta emprega notificações sob-demanda, cujas mensagens de atualização são disparadas pelos eventos de *backtracking* [Dasgupta et al. 2007].

Se uma mensagem *PCEPreq* chegar a um PCE e o comprimento de onda escolhido pelo PCE fonte não estiver mais disponível, um evento de *backtracking* é disparado e a requisição retorna ao PCE anterior, que deve escolher um domínio alternativo para continuar o procedimento de cálculo de rota. Quando uma mensagem de *backtracking* for enviada, uma mensagem de atualização também será enviada para disseminar as mudanças ocorridas. Na verdade, a mensagem *backtrack* pega carona na mensagem de atualização. Dessa maneira, a sobrecarga de mensagens de atualização do estado da rede é significativamente reduzida. A Figura 3 ilustra o fluxo de *PCEPreq* e mensagens de atualização na ocorrência de *backtracking* durante uma requisição de cálculo de rota numa rede composta por cinco domínios (Figura 1). Um limite no número de mensagens de *backtracking* que podem ser disparadas deve ser definido, ao se exceder esse limite, a chamada é bloqueada.

A abordagem proposta provê numa solução simples e eficiente ao combinar cálculo de rota com divulgação de disponibilidade de recursos. Como resultado, a solução aborda algumas das principais limitações das soluções baseadas em BGP: (i) o esquema proposto, centrado principalmente na divulgação da disponibilidade de recursos ópticos, provê as informações fundamentais para realização de TE em redes WDM; (ii) o esquema de cálculo de rota foi projetado utilizando-se o protocolo de vetor distância que admite múltiplos caminhos; (iii) ao atualizar as tabelas de roteamento apenas na ocorrência de *backtracks*, a proposta apresentada leva a tabelas de roteamento mais estáveis; (iv) a divulgação sob demanda das informações de estado da rede evita o processo de convergência dos protocolos vetor distância.

Algoritmo 1 Cálculo de Caminho Óptico Inter-domínio

Entrada: Cada PCE executa um algoritmo de vetor caminho com múltiplos caminhos.

Entrada: Cada entrada da TED tem uma lista de comprimentos de onda disponíveis.

Saída: Um caminho óptico fim-a-fim multi-domínio.

- 1: O PCE fonte recebe uma requisição para estabelecimento de um caminho óptico fim-a-fim (PCEPreq). Ele consulta sua TED para selecionar para qual vizinho irá repassar a mensagem de PCEPreq;
 - 2: Use a política de seleção de caminho (Algoritmo 2);
 - 3: Escolha um comprimento de onda aleatoriamente da lista de comprimentos de onda disponíveis para a rota escolhida;
 - 4: Sinalize para os nós intra-domínio alocarem recursos necessários para receber a chamada do nó fonte ao nó de borda escolhido;
 - 5: **Repita**
 - 6: PCE recebe uma mensagem;
 - 7: **Se** for uma mensagem de backtracking **Então**
 - 8: Atualize sua TED;
 - 9: **Se** for uma PCEPreq **Então**
 - 10: O PCE consulta sua TED para selecionar para qual vizinho ele rapassa a mensagem PCEPreq;
 - 11: Use a política de seleção de caminho (Algoritmo 2);
 - 12: **Se** Não houver caminho para o destino **Então**
 - 13: Envie de volta uma mensagem backtrack juntamente com informações de atualização dos recursos disponíveis;
 - 14: **Senão**
 - 15: Sinalize para os nós intra-domínio alocarem recursos necessários para receber a chamada do nó de borda de entrada ao nó de borda de saída escolhido;
 - 16: **Até** A PCEPreq alcançar o domínio destino **OR** n backtracks tiverem sido disparados;
 - 17: **Se** A PCEPreq alcançou o destino **Então**
 - 18: execute o cálculo do caminho fim-a-fim e com a reserva de recursos;
 - 19: **Senão**
 - 20: A chamada é bloqueada;
 - 21: desaloque recursos não utilizados;
-

Algoritmo 2 Política de Seleção de Caminho

Entrada: Um domínio destino e todos os possíveis caminhos (cadeia de domínios) para alcançá-lo.

Saída: Retorne um único caminho para o destino.

- 1: **Se** Há mais de uma opção de caminho para alcançar o destino **Então**
 - 2: Escolha a que tiver mais comprimentos de onda disponíveis para alcançá-lo;
 - 3: **Se** Há mais de uma opção **Então**
 - 4: Escolha a que tiver o menor caminho (número de domínios na cadeia);
 - 5: **Se** Há mais de uma opção **Então**
 - 6: siga as regras de desempate do BGP.
-

4. Resultados de Simulações

Nesta seção, a efetividade do esquema proposto foi comparada com a de uma implementação do protocolo OBGP [Blanchet et al. 2001, Francisco et al. 2002]. A fer-

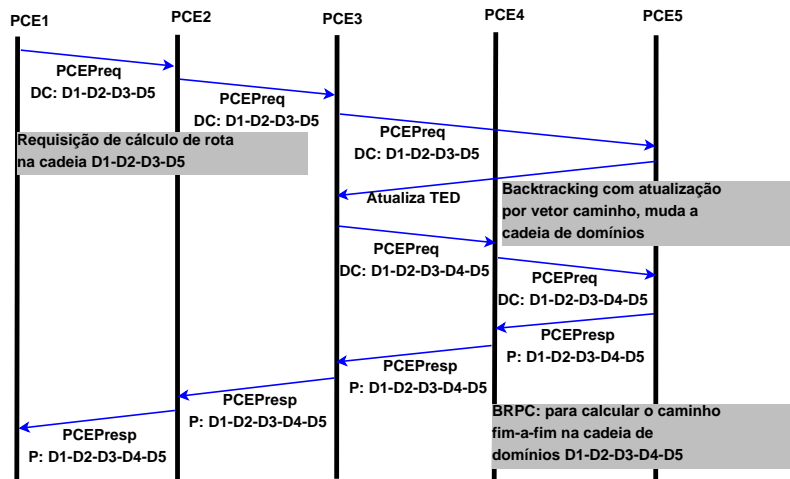


Figura 3. Fluxo de requisições PCEPreq e mensagens de atualização.

ramenta de simulação utilizada foi uma extensão multi-domínio do simulador WDMSim [WDMSim 2012, Drummond and da Silva 2008].

As topologias de rede utilizadas nas simulações foram a NOBEL-EU (Figura 4.) e a NEWYORK (Figura 5.), que podem ser encontradas na biblioteca de casos de teste para projeto de redes de telecomunicações (*library of test instances for Survivable fixed telecommunication Network Design - SNDLib*) [SNDLib 2012]. A topologia NOBEL-EU foi definida no projeto europeu COST 266 [COST266 2012], e tem sido usada para avaliação de protocolos. Ela é composta por 28 domínios e 41 enlaces inter-domínio, resultando numa conectividade média de 2,93. Os nós foram escolhidos incluindo alguns dos principais pontos de troca da Internet. A topologia NEWYORK representa uma rede de telecomunicações da Grande Nova York, mas sua origem exata não é conhecida devido a acordos de confidencialidade. Ela é composta por 16 domínios e 49 enlaces inter-domínio, resultando numa conectividade média de 6,12. As duas topologias tem diferentes números de nós e de conectividade.



Figura 4. Figura representando a rede da topologia NOBEL-EU.

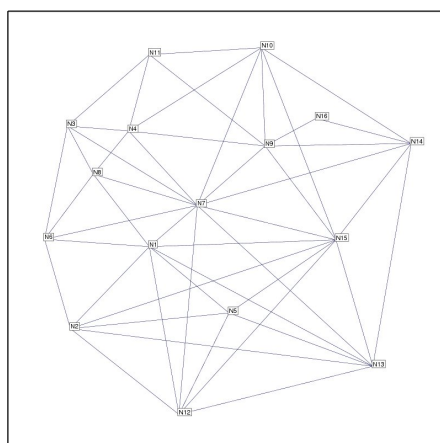


Figura 5. Grafo representando a rede da topologia NEWYORK.

Os nós em cada domínio são completamente conectados e o número de nós de borda é igual ao número de enlaces inter-domínio, sendo que cada nó de borda possui apenas um enlace inter-domínio. Dessa forma, bloqueios devido à falta de recursos intra-domínio são evitados. O algoritmo de menor caminho de Dijkstra é usado para definir os caminhos intra-domínio.

As requisições de chamadas são uniformemente distribuídas entre todos os pares de nós da rede. A carga na rede varia entre 20 e 200 erlangs e cada simulação realiza 100.000 requisições de chamadas. Os intervalos de confiança com nível de confiança de 95% foram obtidos pelo método de replicação independente. Foram geradas 10 replicações para cada ponto. A probabilidade de bloqueio, a sobrecarga de sinalização e a relação entre chamadas bloqueadas e mensagens de *backtrack* foram avaliadas nas simulações.

A sobrecarga de sinalização considera toda sinalização de controle gerada pelo protocolo de roteamento inter-domínio para descobrir e manter rotas e recursos disponíveis na rede. No esquema proposto, essas mensagens são disparadas por eventos de *backtrack* enquanto que no OBGP são disparadas a cada 30 segundos para o eOBGP [Francisco et al. 2002] e para cada mudança intra-domínio detectada para o iOBGP.

As Figuras 6 e 7 mostram a probabilidade de bloqueio para as topologias NOBEL-EU e NEWYORK, respectivamente. A probabilidade de bloqueio gerada pelo OBGP aumenta rapidamente a medida que a carga aumenta, o que não acontece com o probabilidade de bloqueio gerada pela solução proposta. A diferença entre as curvas aumenta significativamente com o aumento da carga nas duas topologias. Para a topologia NOBEL-EU, a diferença chega a 13% enquanto para a NEWYORK chega a 4%. Para a topologia NEWYORK, que tem maior grau de conectividade, o aumento na probabilidade de bloqueio produzido pela nossa proposta é pequena mesmo para os valores mais altos de carga, ficando em torno de 0,1%, enquanto que para o OBGP chega a 3,5%.

O esquema proposto é centrado principalmente na divulgação de disponibilidade de recursos ópticos. Além da maior disponibilidade de informações sobre recursos ópticos, a política de seleção de caminho balanceia a distribuição de carga na rede escolhendo os enlaces que possuem o maior número de comprimentos de onda disponíveis.

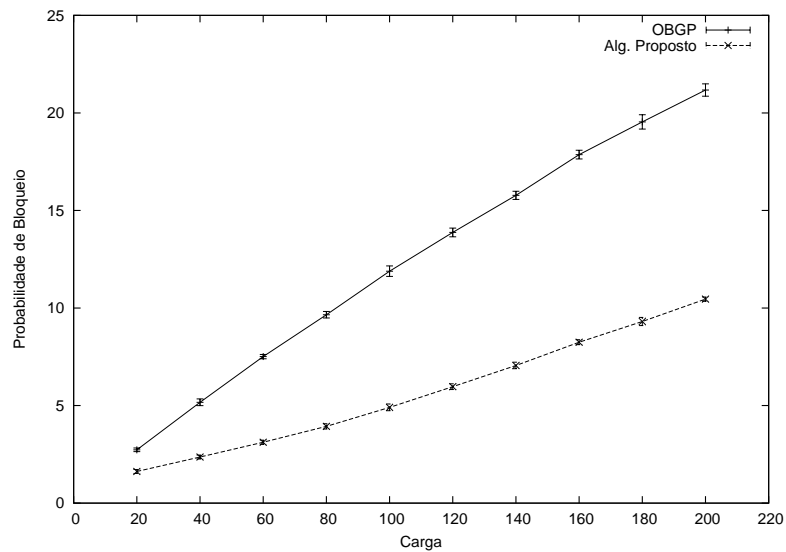


Figura 6. Probabilidade de bloqueio em função da carga na topologia NOBEL-EU.

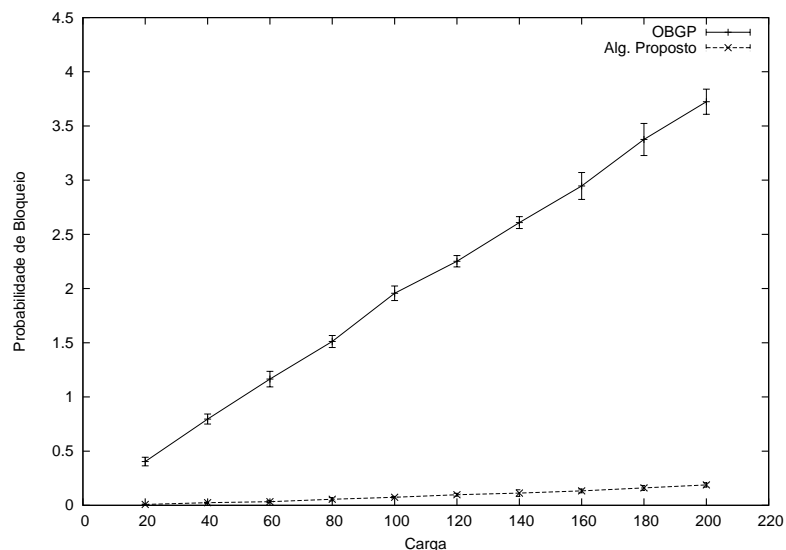


Figura 7. Probabilidade de bloqueio em função da carga na topologia NEW YORK.

Ademais, a flutuação das rotas OBGP causa degradação no desempenho da rede, aumento da carga de processamento nos roteadores e mudanças na distribuição de carga na rede. Ao atualizar as tabelas de roteamento apenas na ocorrência de *backtracks*, a proposta apresentada leva a tabelas de roteamento mais estáveis, com atualização sob-demanda. Essas características resultam na menor taxa de bloqueio observada nos gráficos.

As Figuras 8 e 9 mostram a sobrecarga de sinalização para as topologia NOBEL-EU e NEWYORK. A diferença entre os resultados do OBGP e os da proposta é bastante significativa. Enquanto o OBGP gera 7 a 8 vezes mais mensagens na topologia NOBEL-EU, o número de mensagens enviadas pelo OBGP na topologia NEWYORK é 5 ordens de magnitude maior do que a gerada pela solução proposta. Essa diferença marcante deve-se principalmente ao esquema de atualização sob demanda da solução proposta, em clara

oposição ao esquema de atualização por inundação do OBGP.

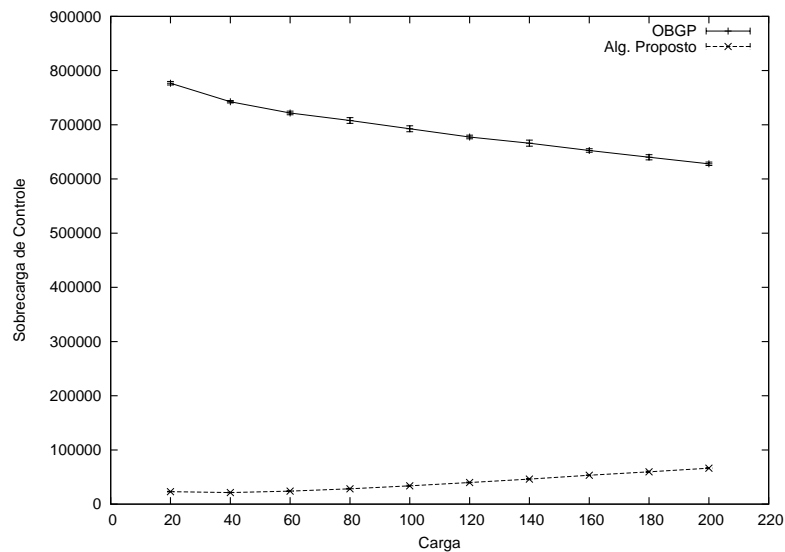


Figura 8. Sobrecarga de controle em função da carga na topologia NOBEL-EU.

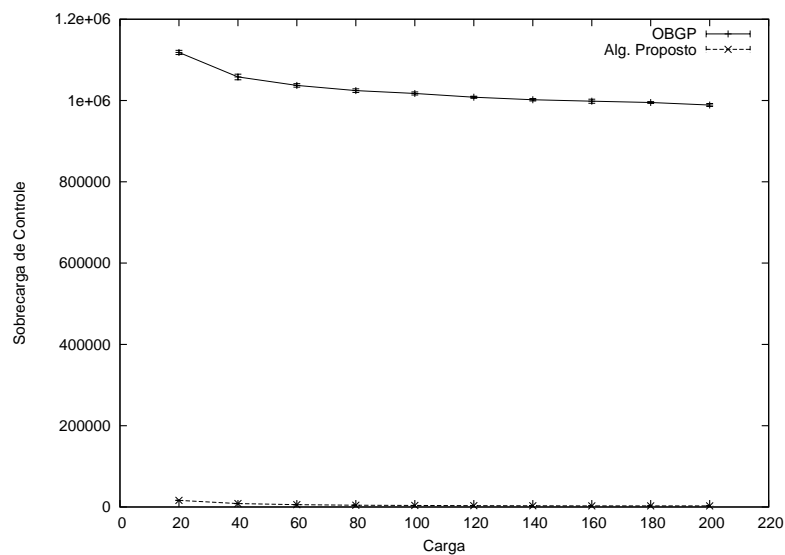


Figura 9. Sobrecarga de controle em função da carga na topologia NEW YORK.

As Figuras 10 e 11 mostram a probabilidade de *backtracking* e a probabilidade de bloqueio para as topologias NOBEL-EU E NEWYORK. A probabilidade de *backtracking* é a fração das chamadas que demandaram *backtracking* para serem estabelecidas e a probabilidade de bloqueio a fração das chamadas que não puderam ser estabelecidas. Na topologia NOBEL-EU, pode-se constatar que o uso de *backtracking* levou a uma redução de 50% no bloqueio. As requisições que demandaram *backtracking* e foram estabelecidas geraram, em média, 2,39 mensagens de *backtrack*. Para a topologia NEWYORK, como a taxa de bloqueio é muito baixa, houve uma redução de no máximo 25% no bloqueio devido ao uso de *backtracking*. As requisições que demandaram *backtracking* e foram estabelecidas geraram, em média, 3,37 mensagens de *backtrack*.

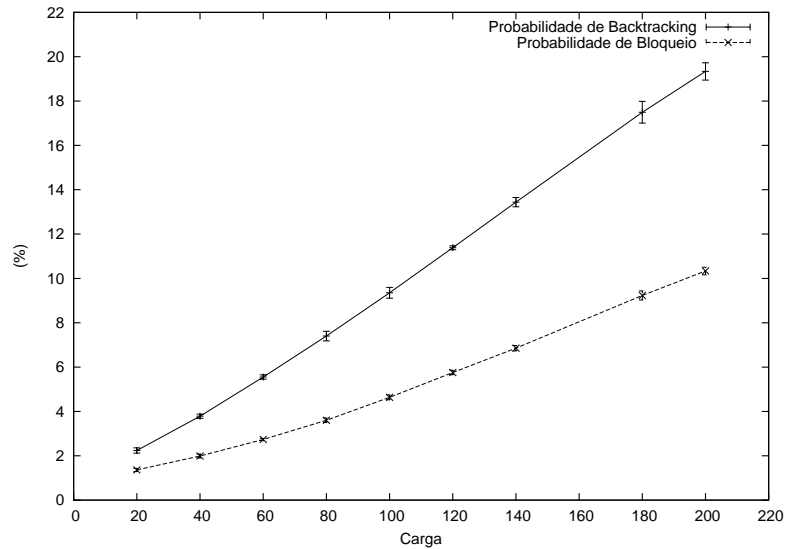


Figura 10. *Backtracking* e probabilidade de bloqueio em função da carga na topologia NOBEL-EU.

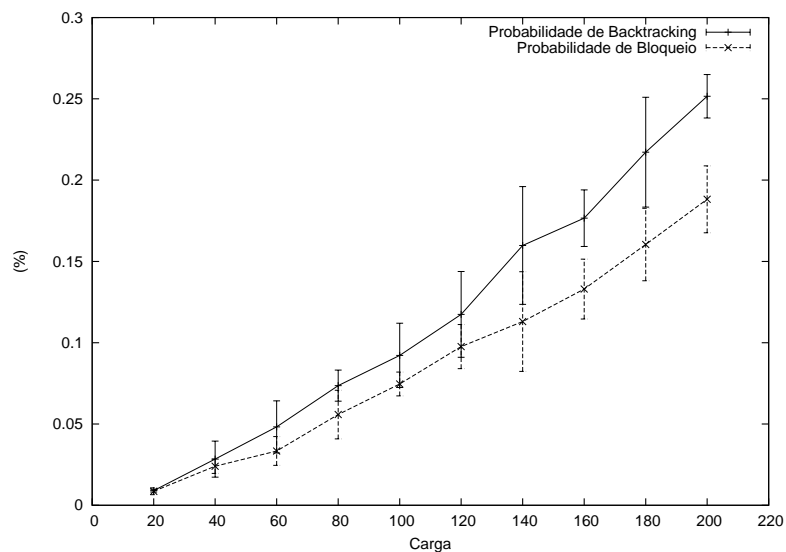


Figura 11. *Backtracking* e probabilidade de bloqueio em função da carga na topologia NEWYORK.

5. Conclusão

Esse artigo introduziu um esquema inovador baseado em PCE para provisão de caminhos ópticos em redes ópticas multi-domínio WDM em malha. A proposta para cálculo da cadeia de domínios preserva informações confidenciais intra-domínio. Disseminação sob-demanda de informações sobre alcançabilidade e disponibilidade de recursos enviados em mensagens de *backtracking* possibilitam o estabelecimento de caminhos ópticos através do uso de rotas alternativas nos casos de falha durante o processo de cálculo. Introduziu-se, também, um conjunto de políticas para lidar com restrições de continuidade comprimento de onda. A solução do problema de RWA balanceia a distribuição de carga na rede dado que se escolhem os enlaces que possuem o maior

número de comprimentos de onda disponíveis, o que evita a formação de gargalos e reduz o bloqueio. Bloqueio e sobrecarga de sinalização gerados pela proposta são significativamente menores do que as produzidas pelo OBGp.

Trabalhos futuros devem investigar a operação do protocolo em casos de falha na rede, uma vez que as atualizações são trocadas apenas na ocorrência de *backtracking*.

Referências

- Awduche, D., Berger, L., Li, T., Srinivasan, V., and Swallow, G. (2001). RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels. RFC 3209 (Standards Track).
- Blanchet, M., Viagenie, F., and Canarie, B. (2001). Optical BGP (OBGP): InterAS lighthouse provisioning. Internet-Draft draft-parent-obgp-01, Internet Engineering Task Force. Work in progress.
- Casellas, R., Martínez, R., Muñoz, R., and Gunreben, S. (2009). Enhanced backwards recursive path computation for multi-area wavelength switched optical networks under wavelength continuity constraint. *J. Opt. Commun. Netw.*, 1(2):A180–A193.
- Chamania, M., Chen, X., Jukan, A., Rambach, F., and Hoffman, M. (2009). An adaptive inter-domain PCE framework to improve resource utilization and reduce inter-domain signaling. *Optical Switching and Networking*, 6(4):259–267.
- Chamania, M., Drogon, M., and Jukan, A. (2012). An open-source path computation element (pce) emulator: Design, implementation, and performance. *Lightwave Technology, Journal of*, 30(4):414–426.
- COST266 (2012). Project cost 266. <http://www.ikr.uni-stuttgart.de/content/researchprojects/view/full.html?cost266>.
- Dasgupta, S., de Oliveira, J., and Vasseur, J.-P. (2007). Path-computation-element-based architecture for interdomain mpls/gmpls traffic engineering: Overview and performance. *IEEE Network*, 21(4):38–45.
- Drummond, A. and da Silva, R. (2008). Ip over wdm module for the ns-2 simulator. In *Communications Workshops, 2008. ICC Workshops '08. IEEE International Conference on*, pages 207–211.
- Farrel, A. and Bryskin, I. (2006). *GMPLS: Architecture and Applications*. Morgan Kaufmann Publishers, an imprint of Elsevier.
- Farrel, A., Satyanarayana, A., Iwata, A., Fujita, N., and Ash, G. (2007). Crankback Signaling Extensions for MPLS and GMPLS RSVP-TE. RFC 4920 (Standards Track).
- Farrel, A., Vasseur, J.-P., and Ash, J. (2006). A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture. RFC 4655 (Informational).
- Francisco, M., Pezoulas, L., Huang, C., and Larnbadaris, I. (2002). End-to-end signaling and routing for optical ip networks. In *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*, volume 5, pages 2870–2875 vol.5.
- IETF. The internet engineering task force. <http://www.ietf.org/>.
- Lee, Y., Bernstein, G., Martensson, J., Takeda, T., and Otani, T. (2011). PCEP Requirements for WSON Routing and Wavelength Assignment. draft-ietf-pce-wson-routing-wavelength-05.txt.

- Medhi, D. and Ramasamy, K. (2007). *Network Routing: Algorithms, Protocols and Architectures*. Morgan Kaufmann Publishers, an imprint of Elsevier.
- Polito, S., Zaghloul, S., Chamania, M., and Jukan, A. (2011). Inter-domain path provisioning with security features: Architecture and signaling performance. *Network and Service Management, IEEE Transactions on*, 8(3):219–233.
- SNDLib (2012). Survivable fixed telecommunication network design library. <http://sndlib.zib.de>.
- Vasseur, J., Ayyangar, A., and Zhang, R. (2008). A Per-Domain Path Computation Method for Establishing Inter-Domain Traffic Engineering (TE) Label Switched Paths (LSPs). RFC 5152 (Standards Track).
- Vasseur, J. and Roux, J. L. (2009). Path Computation Element (PCE) Communication Protocol (PCEP). RFC 5440.
- Vasseur, J., Zhang, R., Bitar, N., and Roux, J. L. (2009). A Backward-Recursive PCE-Based Computation (BRPC) Procedure to Compute Shortest Constrained Inter-Domain Traffic Engineering Label Switched Paths. RFC 5441 (Standards Track).
- WDMSim (2012). Wdmsim simulator. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/wdmsim/>.
- Yannuzzi, M., Masip-Bruin, X., Fabrego, G., Sanchez-Lopez, S., Sprintson, A., and Orda, A. (2008). Toward a new route control model for multidomain optical networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(6):104–111.
- Yannuzzi, M., Masip-Bruin, X., Sánchez-López, S., and Marín-Tordera, E. (2009). Obgp+: An improved path-vector protocol for multi-domain optical networks. *Optical Switching and Networking*, 6(2):111–119. Recent trends on optical network design and modeling – selected topics from ONDM 2008.