

Proteção em Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação Espacial

1st Helder M. N. S. Oliveira
Institute of Computing
University of Campinas
Campinas, Brazil
helder@lrc.ic.unicamp.br

2nd Nelson L. S. da Fonseca
Institute of Computing
University of Campinas
Campinas, Brazil
nfonseca@ic.unicamp.br

Abstract—In this paper, we summarize the contributions of the Doctoral Thesis entitled “Protection in Elastic Optical Networks with Spatial Multiplexing”. This thesis proposes solutions for protection of elastic optical networks with spatial multiplexing, aiming at reducing the blocking of requests and the improvement of resource utilization. For this, we take into account the use of different schemes of paths protection, adaptive modulation, traffic grooming, spectrum overlap in protection paths, minimum interference routing and multipath routing. The algorithms proposed will allow the provisioning of protection in optical networks that will transport much greater volumes of traffic than the current networks.

Index Terms—proteção, redes ópticas elásticas com multiplexação espacial

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o tráfego de rede tem crescido a uma taxa exponencial, e não existe nenhuma indicação de que esta tendência cessará tão cedo. O grande problema dessa conjuntura é que uma fibra de único núcleo, fibra amplamente utilizada nas redes ópticas existentes, possui capacidade limitada e sua capacidade não será suficiente para transportar essa crescente demanda em um futuro próximo. Estima-se que, nos próximos dez anos, a taxa de transmissão dos usuários nas redes de acesso crescerá de 100 Mb/s para 1 Gb/s, motivado pelas inovações tecnológicas de fibras de alta capacidade. Inevitavelmente, o núcleo da rede deverá comutar a uma taxa de 1 Tb/s, o que exigirá uma maior demanda por recursos, induzindo à adoção de fibras com múltiplos núcleos.

A rede óptica elástica (EON) com multiplexação espacial (SDM) sobre fibra multi-núcleo (MCF) são uma solução promissora para lidar com as crescentes demandas de banda passante. A capacidade de se alocar o espectro flexivelmente permitirá que estas redes lidem com demandas de tráfego com requisitos de banda variável. A adoção de SDM proporcionará às redes maior capacidade. No entanto, apesar de tais vantagens, existem, ainda, poucos estudos relacionados aos algoritmos de roteamento em EON SDM. Nesse cenário com um maior volume de tráfego nos enlaces de rede, aumenta ainda mais a quantidade de dados perdidos em caso de falha. Assim sendo, maior a importância de se dotar as redes de

capacidade de sobrevivência em caso de falha, já que um corte de fibra implicará em perdas de dados massivas.

Um dos problemas fundamentais em EON é o problema de roteamento e atribuição de espectro (RSA), que deve considerar a alocação contígua e contínua do espectro para todos os enlaces de um caminho óptico. O uso de multiplexação espacial torna mais complexo o problema tradicional de RSA, que inclui, também, a alocação de núcleo (RSCA). Vários algoritmos de RSCA para redes ópticas elásticas com multiplexação espacial têm sido propostos, recentemente, na literatura [1], [2], [3] e [4]. Entretanto, apenas o algoritmo em [5] aborda a proteção de caminhos.

A Tese [6] avançou o estado da arte em provisão de roteamento e proteção nas redes ópticas elásticas com multiplexação espacial, considerando questões tais como, fragmentação de espectro, eficiência energética, melhor utilização de recursos e diminuição de recursos reservados para proteção. Este artigo resume os resultados numéricos disponíveis em [6].

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Trabalhos recentes abordam o estudo de roteamento e alocação de núcleo e espectro. Os autores de [2] investigaram modelos de otimização de alocação de espectro cientes de *crossstalk*. Foram propostas em [1] uma formulação baseada em programação linear inteira e uma heurística para maximizar a utilização do espectro. Além da utilização de RSCA, o trabalho em [3] considera a utilização de roteamento e alocação de modo e espectro (RSMA). Foi proposto em [4] uma arquitetura de nós AoD para tornar as redes EON SDM energeticamente mais eficiente.

Na literatura, diversos trabalhos estudam proteção em redes ópticas, no entanto, dentre todos os trabalhos encontrados, apenas [5] trata de proteção de redes ópticas elásticas utilizando multiplexação espacial, e propõe o algoritmo Cap-DPP, que utiliza caminhos dedicados para realizar proteção, e utiliza uma técnica de k-caminhos para encontrar o caminho primário e o caminho de backup em redes ópticas elásticas com multiplexação espacial. No entanto o algoritmo Cap-DPP

produz resultados ineficientes na alocação quando comparado aos algoritmos propostos em [6].

III. ALGORITMOS PROPOSTOS

Esta seção realiza uma breve apresentação dos algoritmos propostos em [6]. Esses algoritmos introduzem soluções de proteção em redes ópticas elásticas com multiplexação espacial, visando a redução do bloqueio de requisições para o estabelecimento de conexão e o melhoramento da utilização dos recursos em redes EON-SDM. Os dezesseis algoritmos propostos avaliam a utilização de diferentes técnicas de proteção em conjunto com as técnicas de modulação adaptativa, agregação de tráfego, sobreposição de espectro e roteamento híbrido. Essas técnicas foram utilizadas para endereçar problemas de consumo energético, fragmentação de espectro e alto consumo de recursos para se prover proteção. Todos os algoritmos apresentados garantem 100% de proteção para todas as requisições em caso de uma falha. Adicionalmente, o algoritmo SSSPF garante 100% de proteção contra duas falhas.

A técnicas de proteção utilizadas em [6] são caminho de backup compartilhado (SBPP), ciclos pré configurados independente de falhas (p-cycle FIPP) e p-cycle FIPP com roteamento com interferência mínima. A proteção de caminho de backup compartilhado (SBPP) é uma técnica de proteção que tem sido intensamente investigada na última década devido ao compartilhamento eficiente de capacidade disponível e flexibilidade no provisionamento de serviços. Em redes ópticas elásticas que empregam multiplexação espacial, o SBPP emprega um esquema de proteção 1: N em que os caminhos de backup podem usar o mesmo conjunto de espectro (slots), desde que seus caminhos primários correspondentes sejam enlaces disjuntos.

A maioria das técnicas de proteção reserva, mas não pré-configura os recursos de backup, o que pode resultar em longos procedimentos de sinalização durante a restauração. O p-cycle é uma técnica de proteção com recursos de backup pré-configurados. O p-cycle é um esquema de proteção em que a capacidade reservada é pre-conectada e forma estruturas em anel para proteção de redes em malha. Os p-cycles fornecem proteção semelhante a proteção fornecida por *Bidirectional Line Switched Ring*, que é considerado uma generalização do esquema de proteção 1:1, ou seja, um anel protegendo um ciclo. O p-cycle pode proteger tanto os caminhos primários que utilizam os mesmos enlace dele, quanto os que possuem os nós finais dentro do p-cycle. Um caso especial de p-cycle é o p-cycle FIPP (caminho de proteção independente de falhas). O p-cycle FIPP é uma extensão do conceito de p-cycle que permite que falhas não sejam necessariamente limitadas a um enlace ou segmento de caminho imediatamente adjacente aos nós finais. Um p-cycle FIPP é capaz de fornecer a velocidade de restauração rápida mantendo a eficiência de espectro.

Os algoritmos de roteamento com interferência mínima induzem ao estabelecimento de conexões ao longo dos caminhos que menos interferem nas solicitações de entrada para o estabelecimento da conexão. O p-cycle que protege uma

requisição pode sobrecarregar os enlaces da rede, já que o p-cycle pode usar os mesmos enlaces dos caminhos primários. A combinação de p-cycle FIPP com roteamento com interferência mínima com evita que p-cycles e caminhos usem os mesmos enlaces, minimizando, assim, o índice de rejeição de solicitações futuras.

O algoritmo 1 é um método heurístico para resolver de forma genérica o problema de proteção de redes ópticas elásticas com multiplexação espacial. Todos os algoritmos apresentados em [6] correspondem à variações deste algoritmo genérico. Para toda nova requisição aceita, o algoritmo escolhe um caminho primário e um caminho de proteção, que satisfaçam os requisitos da requisição para estabelecimento de conexão. Para toda requisição deverá ser escolhido ambos os caminhos. No entanto, um caminho de proteção estabelecido para uma requisição pode ser reutilizado por outra requisição, desde que, obedeçam as restrições imposta pelo tipo de proteção de caminho utilizado. Um caminho de proteção somente será buscado ou escolhido se um caminho primário já tiver sido escolhido. Os caminhos correspondem a um conjunto de enlaces, um núcleo e uma faixa de espectro a serem utilizados. Se um caminho primário e/ou caminho de proteção não puderem ser encontrado para a requisição, a requisição é bloqueada.

Algoritmo 1 Algoritmo genérico

Saída: Caminho primário e Caminho de *backup*

- 1: Encontra o menor caminho para estabelecer como caminho primário
 - 2: **Se** Não é possível encontrar caminho primário **então**
 - 3: bloqueia requisição
 - 4: **Senão**
 - 5: Tenta compartilhar um caminho de proteção já estabelecido
 - 6: **Se** Encontrou caminho de proteção para compartilhar **então**
 - 7: Estabelece os caminhos
 - 8: **Senão**
 - 9: **Se** Encontrou caminho para estabelecer como caminho de proteção **então**
 - 10: Estabelece os caminhos
 - 11: **Senão**
 - 12: Bloqueia a requisição
 - 13: **Fim Se**
 - 14: **Fim Se**
 - 15: **Fim Se**
-

Na primeira linha, o algoritmo procura o menor caminho primário. Se não for possível encontrar um caminho primário para a requisição; a requisição é bloqueada (linha 2). Caso contrário, um caminho de proteção é buscado, dentre os caminhos de *backup* que já estão estabelecidos (linha 5). Se um caminho de *backup* já estabelecido puder ser compartilhado (linha 6), os caminhos primário e de *backup* são estabelecidos (linha 7). Caso contrário, um novo caminho de proteção deve ser criado (linha 9). Se não for possível criar o caminho de proteção, então a requisição é bloqueada (linha 12).

A Figura 1 apresenta uma classificação dos algoritmos desenvolvidos de acordo com suas características. Na primeira linha da figura, tem-se os algoritmos SBPPMC, FIPPMC

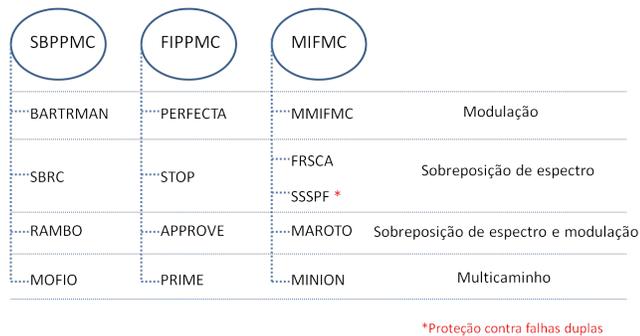


Fig. 1. Visão geral das características dos algoritmos desenvolvidos

e MIFMC, que são os algoritmos fundamentais (base) no desenvolvimento desta Tese. Suas extensões são especificadas na coluna da direita. Os algoritmos bases diferem pelos tipos de caminhos de proteção utilizados. Estes algoritmos foram desenvolvidos para avaliar o impacto das diferentes técnicas de proteção fim-a-fim em uma EON SDM. Os algoritmos bases utilizam o formato de modulação fixo BPSK que realiza a transmissão de 1 bit por símbolo. No algoritmo SBPPMC um caminho de backup compartilhado (SBPP) é empregado para proteger um caminho óptico enquanto que os algoritmos FIPPMC e MIFMC utilizam p-cycle FIPP (caminho de proteção independente de falhas). O algoritmo MIFMC difere do algoritmo FIPPMC pela utilização de interferência mínima na alocação do caminho de backup, reduzindo a rejeição de requisições futuras, porém, aumentando o número de saltos dos caminhos de backup. Através do estudo apresentado em [6], é possível analisar o impacto da utilização de cada técnica de proteção e qual a influência das características da topologia na técnica utilizada.

Visando a melhor utilização dos recursos, os algoritmos bases foram estendidos para os algoritmos BARTRMAN, PERFECTA e MMIFMC. Nestes novos algoritmos, o formato de modulação mais eficiente, do ponto de vista espectral, é utilizado de forma que o comprimento do caminho não exceda o alcance da transmissão. Nestes algoritmos, a modulação é escolhida como uma função do comprimento dos caminhos para que menos espectro seja utilizado e, ainda assim, o sinal recebido seja decodificado com sucesso pelo destino. Os formatos de modulação 64QAM, 32QAM, 16QAM, 8QAM, QPSK e BPSK são empregados para distâncias de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 km, respectivamente, com capacidades de slots de 75, 62,5, 50, 37,5, 25 e 12,5 Gb/s. Este estudo tornou possível avaliar o impacto na redução da utilização de recursos através da introdução de modulação adaptativa em cenário de EON SDM protegida. Além disso, avaliou-se o comportamento da modulação adaptativa em conjunto com as diferentes técnicas de proteção.

Oferecer 100% de proteção em uma rede óptica exige uma grande quantidade de recursos reservados muitas vezes não utilizados, causando desperdício de recursos e impossibilitando a alocação de caminhos ópticos para requisições futuras.

Com o intuito de reduzir os recursos utilizados na provisão de proteção, os algoritmos bases foram estendidos resultando nos algoritmos SBRC, STOP e FRSCA. Nestes novos algoritmos, os caminhos de proteção podem sobrepor o espectro reservado, reduzindo o número de recursos reservados para proteção. O espectro sobreposto é compartilhado entre caminhos ópticos adjacentes no domínio do tempo, ou seja, ele é ocupado por no máximo um dos caminhos ópticos adjacentes por vez. Em EON SDM, os transpônderes elásticos podem ajustar a posição do *slot* de banda de guarda utilizado, permitindo aumentar a largura do espectro utilizado por um caminho de backup enquanto diminui a largura do espectro de outro caminho de backup adjacente, satisfazendo a proteção da requisição. Avaliou-se o impacto da utilização de sobreposição de espectro considerando cenários com diferentes tipos de proteção. O algoritmo SSSPF utiliza p-cycle FIPP e sobreposição de espectro para prover proteção contra duas falhas simultâneas de enlace. A redução na utilização de recursos de backup através da sobreposição de espectro possibilitou um maior número de requisições aceitas uma vez que um maior número de recursos estão disponíveis.

Com o intuito de reduzir o espectro utilizado nos caminhos ópticos bem como diminuir o bloqueio de requisições, os algoritmos bases foram estendidos para os algoritmos RAMBO, APPROVE e MAROTO. Estes novos algoritmos utilizam modulação adaptativa e sobreposição de espectro conjuntamente. O uso de modulação adaptativa em conjunto com a sobreposição de espectro diminui utilização do espectro nos caminhos ópticos. Enquanto a modulação adaptativa possibilita o envio de uma maior quantidade de bits por símbolos, a sobreposição de espectro reduz a utilização de recursos nos caminhos de proteção. Avaliou-se o impacto na diminuição da utilização do espectro através da introdução da conjunto de modulação adaptativa e sobreposição de espectro em diversos cenários dessas redes.

As redes ópticas elásticas alocam o espectro em uma granularidade fina que corresponde aos requisitos de espectro de cada solicitação. No entanto, como o tráfego de rede varia ao longo do tempo, o espectro tende a ficar fragmentado devido à alocação e à liberação de caminhos, levando a uma diminuição na utilização de recursos e a um declínio no desempenho. A fim de mitigar o impacto da fragmentação do espectro, os algoritmos bases foram estendidos levando aos algoritmos MOFIO, PRIME e MINION através da utilização de roteamento híbrido, ou seja, utilização de roteamento multicaminho sempre que a utilização de caminho único não for possível. Este estudo avaliou o impacto na redução da fragmentação de espectro através da introdução de roteamento híbrido em cenário de EON SDM protegida. Além disso, avaliou-se o comportamento do roteamento multicaminho em conjunto com as diferentes técnicas de proteção.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Para avaliar o desempenho dos algoritmos proposto na Tese [6], experimentos de simulação foram realizados utilizando

o simulador FlexGridSim [7]. Em cada simulação, 100.000 requisições foram geradas. Utilizou-se o método de replicação independente e adotou-se nível de confiança de 95% para os intervalos de confiança. Diferentes topologias com diferentes conectividades foram empregadas nas simulações: a Pan-European com 28 nós e 39 enlaces bidirecionais; a USA com 24 nós e 43 enlaces bidirecionais; e a NSF com 14 nós e 18 enlaces bidirecionais. O espectro foi dividido em 320 slots de largura de banda de 12.5 GHz cada e as fibras simuladas possuem 7 núcleos. Variou-se a carga entre 25 e 500 erlangs em intervalos de 25 erlangs. Sete tipos de requisições foram utilizadas, as demandas de banda de 25 Gbps, 50 Gbps, 125 Gbps, 200 Gbps, 500 Gbps, 750 Gbps e 1 Tbps. Todos os algoritmos propostos em [6] consideram o *crosstalk* entre núcleos na alocação de caminhos, uma conexão só é aceita se respeitar o limiar de crosstalk aceitável.

As métricas consideradas para avaliação dos algoritmos são a probabilidade de bloqueio de banda, o valor de *crosstalk* por slot, a relação de fragmentação, a eficiência energética, o número de saltos para o caminho primário e o número de saltos para o caminho de proteção. A probabilidade de bloqueio de banda é definida pela porcentagem de banda (tráfego) bloqueada sobre o total de banda solicitada durante todo o período de simulação. O valor de *crosstalk* por slot é definido como a relação média entre os pares de slots de frequência usados que têm a mesma frequência e estão localizados em núcleos adjacentes e o total de slots usados. A relação de fragmentação é gerada a partir do estabelecimento e a desconexão de caminhos. A razão de fragmentação compara o número máximo de slots contíguos disponíveis ao número de slots disponíveis no enlace. A medida de eficiência energética é obtida dividindo-se a demanda de tráfego total atendida com sucesso na rede pelo consumo total de energia da rede. O número de saltos do caminho primário apresenta a média do número de saltos de todos caminhos primário estabelecidos por conexão. O número de saltos do caminho de backup apresenta a média do número de saltos de todos caminhos de backup estabelecidos por conexão.

As Figuras 2(a), 2(b) e 2(c) mostram a probabilidade de bloqueio de banda (BBR) para as topologias Pan-European, USA e NSF, respectivamente. A Figura 2 apresenta de forma sucinta a BBR dos algoritmos propostos na Tese [6]. Os algoritmos FIPPMC e MIFMC, que utilizam p-cycle, mostrou-se mais indicado para redes com maior conectividade dos nós, uma vez que em geral os algoritmos que usam o p-cycle FIPP produzem BBR mais baixa em redes com essas características. Por sua vez, o algoritmo SBPPMC, que utiliza caminho de backup compartilhado, mostrou-se mais indicado para redes com menor conectividade dos nós. Contudo, quando utilizado a técnica de sobreposição de espectro em conjunto com modulação adaptativa (algoritmos RAMBO, APPROVE e MAROTO) há uma melhor alocação dos recursos de backup. Os algoritmos BARTMAN, PERFECTA, MMIFMC, RAMBO, APPROVE e MAROTO, que utilizam modulação adaptativa, produzem os menores valores de BBR

para todas as cargas simuladas em todas as topologias apresentadas. Isto ocorre pois estes algoritmos podem ajustar o formato de modulação de acordo com os requisitos de cada demanda, possibilitando uma alocação de recursos mais distribuída. Os algoritmos SBRC, STOP, FRSCA, RAMBO, APPROVE e MAROTO, que utilizam sobreposição de espectro nas conexões, reduzem a sobrecarga do espectro causada por reserva de recursos não utilizados e, assim, melhoram a eficiência espectral das redes. A sobreposição de espectro em conjunto com a modulação adaptativa é uma solução promissora, pois aloca eficientemente os recursos da rede. Os algoritmos PRIME, MOFIO e MINION, que utilizam roteamento híbrido, aumentam a possibilidade de utilização e estabelecimento de caminhos ópticos através de múltiplas rotas e, conseqüentemente, aumentam as chances de encontrar recursos disponíveis para suprir a banda passante demandada pelas requisições de conexão quando comparado aos algoritmos SBPPMC, FIPPMC e MIFMC, produzindo, portanto, valores menores de BBR do que os valores quando se utiliza caminhos simples.

As Figuras 3(a), 3(b) e 3(c) mostram a relação de crosstalk por slot (CpS) para as topologias Pan-European, USA e NSF, respectivamente. A Figura 3 apresenta de forma sucinta a CpS dos algoritmos propostos na Tese [6]. Os algoritmos SBPPMC, FIPPMC e MIFMC, que não utilizam modulação adaptativa, apresentam um maior CpS do que os algoritmos BARTMAN, PERFECTA e MMIFMC, que utilizam modulação adaptativa. Isto acontece pois o uso de diferentes formatos de modulação melhora a utilização dos recursos disponíveis, assim sendo caminhos menores suportam maior transferência de dados e a utilização de menores caminhos gera menores valores de CpS. Apesar de utilizar agregação de tráfego e sobreposição de espectro, os valores de CpS produzidos pelos algoritmos SBRC, STOP e FRSCA são altos, devido à alta utilização dos recursos da rede. Isto ocorre pois estes algoritmos aceitam maior número de conexões do que os outros algoritmos, sendo estas conexões responsáveis pelo maior crosstalk gerado. Apesar da utilização de modulação adaptativa os valores de CpS gerados pelos algoritmos MAROTO, RAMBO e APPROVE aumentam rapidamente com o aumento da carga, uma vez que o número de saltos usados leva a uma maior utilização de recursos e conseqüentemente a um maior CpS. Apesar dos algoritmos APPROVE e MAROTO que utilizam p-cycle, reservarem mais recursos para os caminhos de backup, o que reduz os recursos para a criação de novos caminhos primários, o alto compartilhamento dos caminhos de backup e a sobreposição de espectro utilizados permitiram que os valores de crosstalk gerados fossem próximos ao gerados pelo algoritmo RAMBO. Em geral os valores de CpS gerados pelos algoritmos que utilizam p-cycle são mais altos do que o CpS gerado pelos outros algoritmos, pois p-cycles FIPP utilizam mais recursos para proteção, o que pode implicar em caminhos primários com maior número médio de saltos e conseqüentemente mais slots são afetados pelo crosstalk. Os algoritmos que utilizam roteamento híbrido (MINION, PRIME

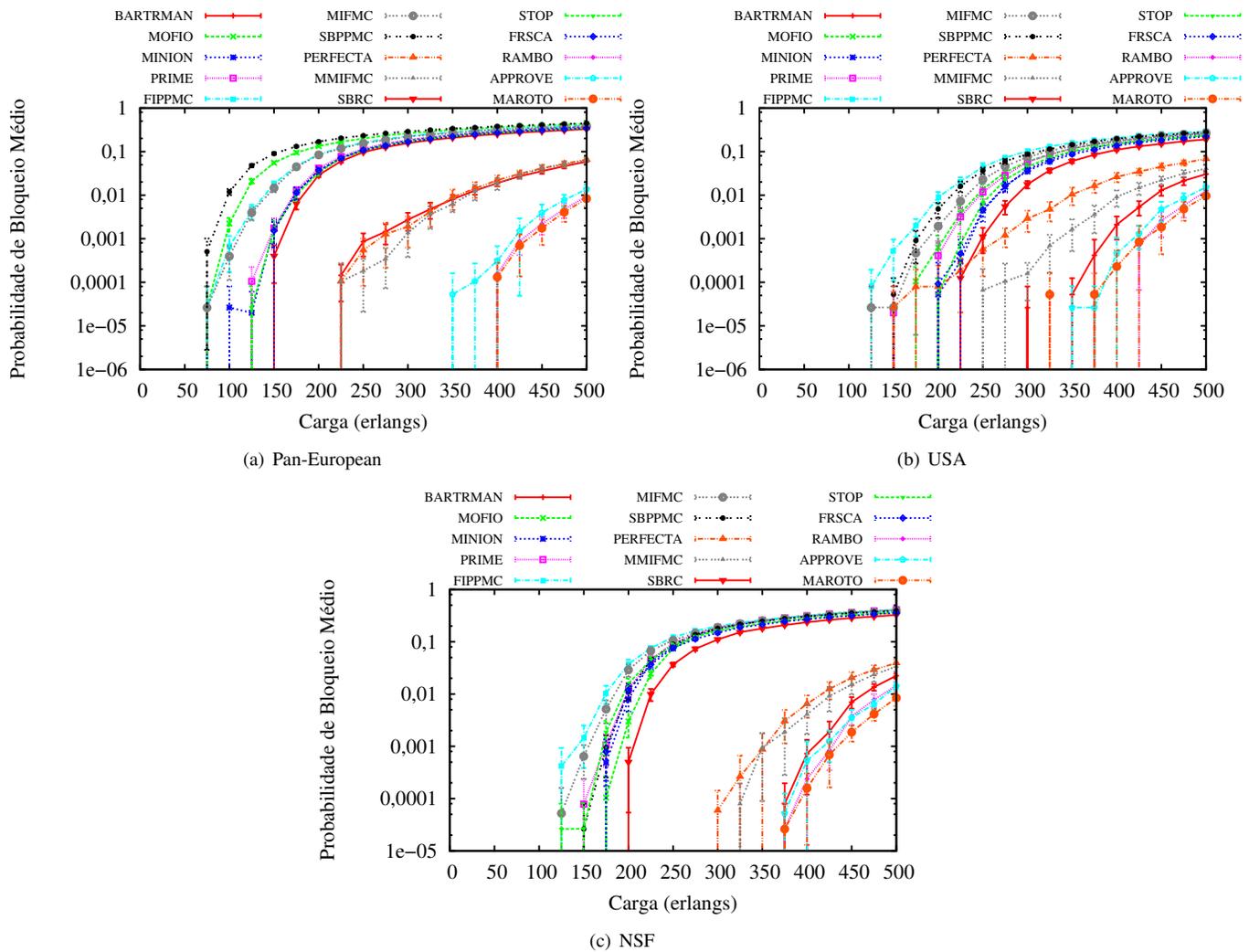


Fig. 2. Bloqueio de banda em função da carga da rede

e RAMBO) aceitam um maior número de requisições do que os algoritmos que utilizam roteamento simples (SBPPMC, FIPPMC e MIFMC), contudo os valores de CpS gerado por eles são próximos.

As Figuras 4(a), 4(b) e 4(c) mostram a relação de fragmentação (RF) para as topologias Pan-European, USA e NSF, respectivamente. A Figura 4 apresenta de forma sucinta a RF dos algoritmos propostos na Tese [6]. Apesar dos algoritmos que utilizam roteamento híbrido (algoritmos MINION, MOFIO e PRIME) produzirem menores valores de BBR que os algoritmos que utilizam roteamento simples (algoritmos SBPPMC, FIPPMC e MIFMC), eles produzem razão de fragmentação semelhante. A utilização de sobreposição de espectro juntamente com modulação adaptativa pelos algoritmos RAMBO, APPROVE e MAROTO permite que seja realizado uma melhor alocação dos recursos gerando menor fragmentação que os outros algoritmos que não utilizam sobreposição de espectro e modulação adaptativa de forma conjunta. Os algoritmos SBRC, STOP e FRSCA produzem

a maior relação de fragmentação. Isto ocorre pois estes algoritmos não utilizam modulação adaptativa e produzem baixa BBR quando comparado aos outros algoritmos que não utilizam modulação adaptativa, utilizando, assim, maior quantidade de recursos da rede.

As Figuras 5(a), 5(b) e 5(c) mostram a eficiência energética (EE) dos algoritmos para as topologias Pan-European, USA e NSF, respectivamente. A Figura 5 apresenta de forma sucinta a EE dos algoritmos propostos na Tese [6]. Os algoritmos BARTRMAN, PERFECTA, MMIFMC, APPROVE, MAROTO e RAMBO que utilizam modulação adaptativa produziram a maior eficiência energética, pois a modulação adaptativa possibilita a utilização de caminhos menores e consequentemente a utilização de um menor número de recursos da rede. O algoritmo RAMBO produz menor eficiência energética que os algoritmos APPROVE e MAROTO que utilizam p-cycle FIPP. Por outro lado, o algoritmo BARTRMAN produz maior eficiência energética que os algoritmos PERFECTA e MMIFMC que utilizam p-cycle FIPP. Isto acontece, pois a

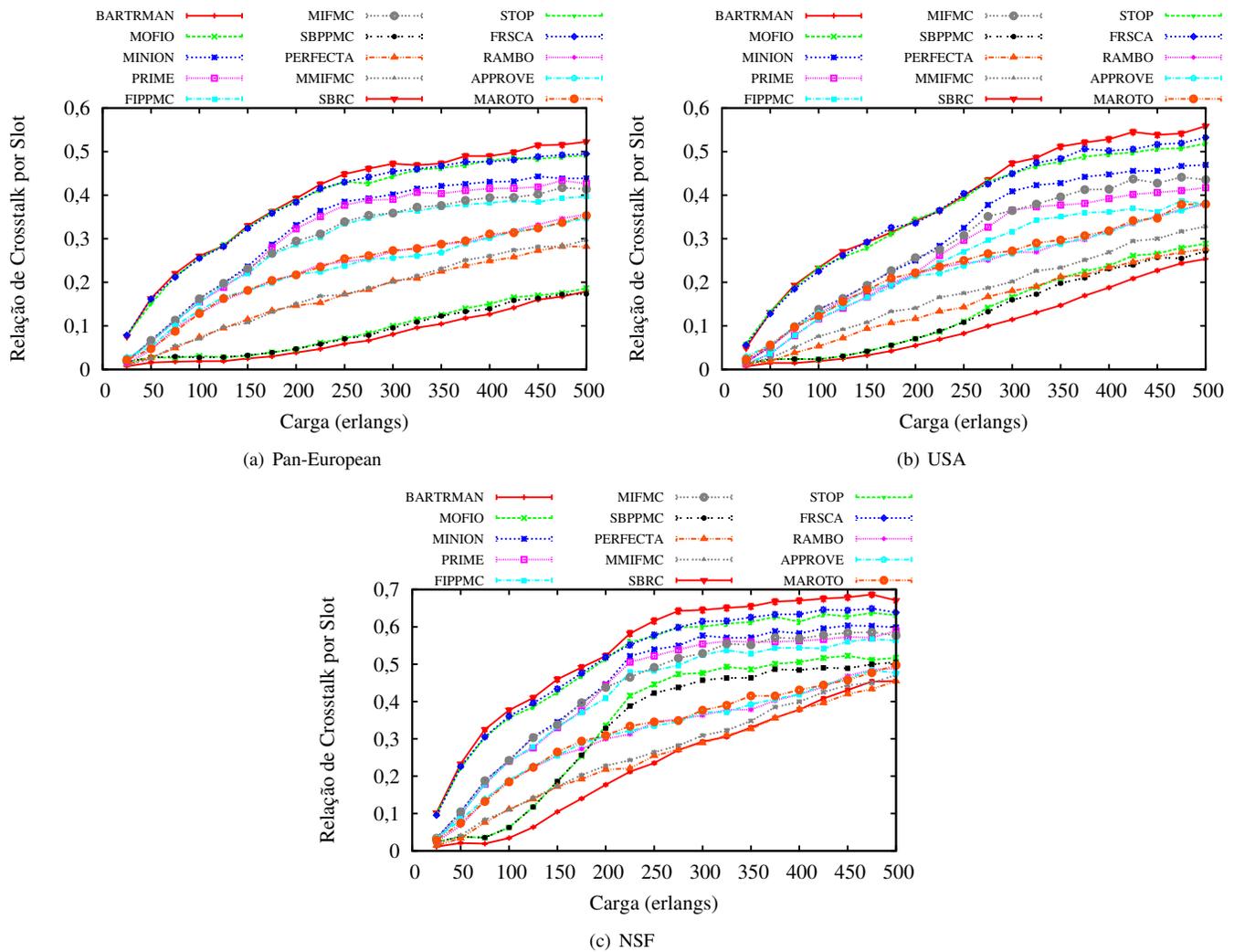


Fig. 3. Relação de crosstalk por slot em função da carga da rede

utilização de agregação de tráfego e sobreposição de espectro facilita o compartilhamento e criação de p-cycles FIPP nos algoritmos APPROVE e MAROTO. Em geral, os algoritmos que produzem maior BBR tendem a produzir maior eficiência energética do que outros algoritmos avaliados, uma vez que apenas caminhos menores são estabelecidos.

As Figuras 6(a), 6(b) e 6(c) mostram o número médio de saltos dos caminhos primários dos algoritmos para as topologias Pan-European, USA e NSF, respectivamente. A Figura 6 apresenta de forma sucinta o número médio de saltos dos caminhos primários dos algoritmos propostos na Tese [6]. Sob baixas cargas, os algoritmos PRIME, MINION e MOFIO, que utilizam roteamento híbrido, produzem caminhos primários com número médio de saltos similares àqueles que utilizam roteamento monocaminho. Sob altas cargas os algoritmos que utilizam roteamento híbrido produzem um alto número médio de saltos, como consequência da utilização de mais de um caminho para atender uma requisição. A utilização de roteamento multicaminho não necessariamente implica em um

maior uso de recursos, um vez que cada caminho necessita de aproximadamente a metade dos recursos.

As Figuras 7(a), 7(b) e 7(c) mostram o número médio de saltos dos caminhos de backup dos algoritmos para as topologias Pan-European, USA e NSF, respectivamente. A Figura 7 apresenta de forma sucinta o número médio de saltos dos caminhos de backup dos algoritmos propostos na Tese [6]. Os algoritmos que empregam p-cycle produzem caminhos com maior número médio de saltos do que os caminhos de backup normais. Sob altas cargas, os algoritmos que utilizam roteamento híbrido dividem a banda requerida por 2 caminhos, aumentando o número de saltos total quando comparado com os respectivos algoritmos que utilizam roteamento monocaminho. Os algoritmos que utilizam p-cycle, utilizam caminhos de backup com maior número médio de saltos, no entanto este número não muda significativamente quando utilizado roteamento multicaminho, evidenciando um maior compartilhamento para proteção.

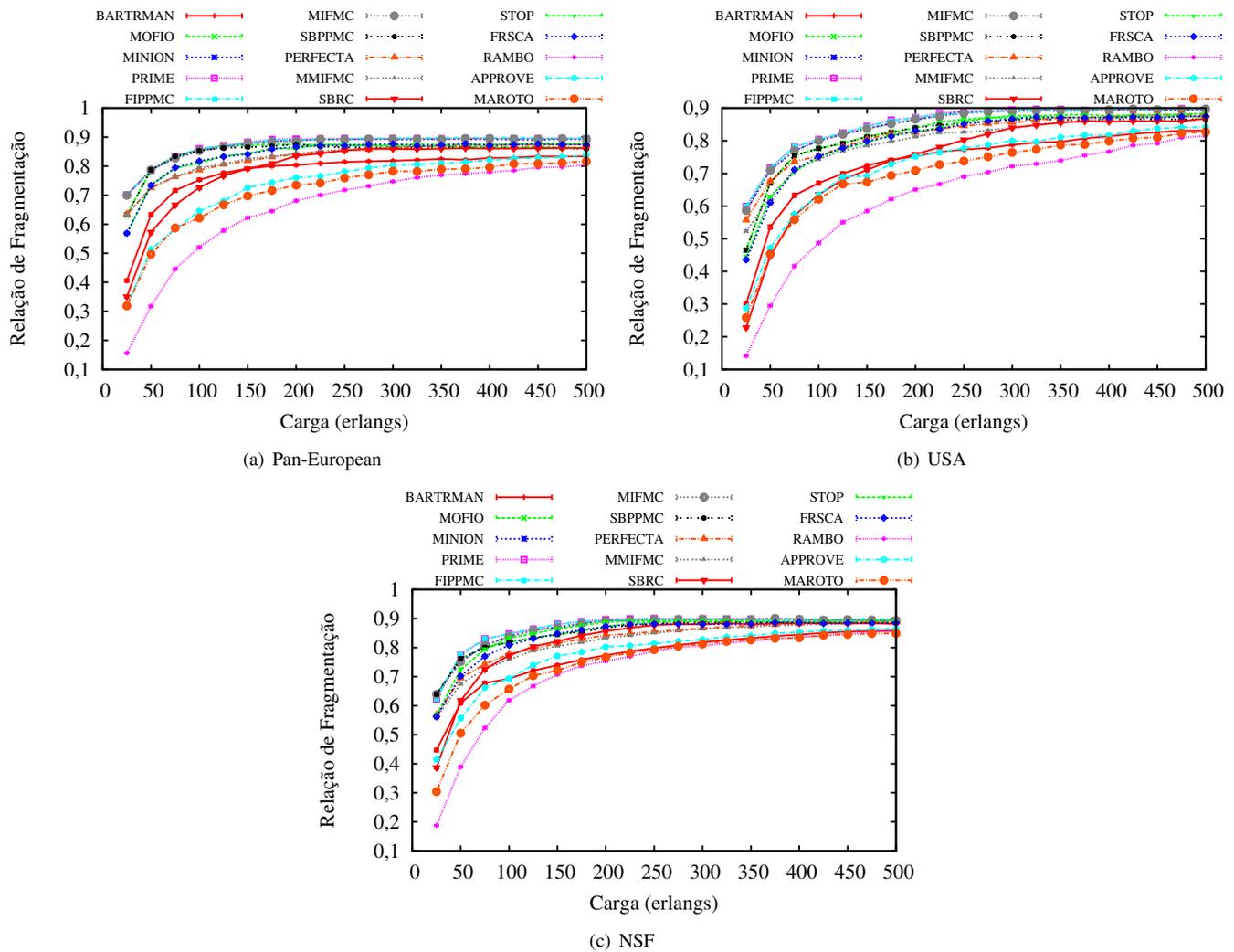


Fig. 4. Relação de fragmentação em função da carga da rede

V. TRABALHOS PUBLICADOS

Diversos artigos foram publicados durante o doutorado em conferências e periódicos de grande importância. A ampla variedade de conferências e periódicos de qualidade que aceitaram os trabalhos demonstram a importância da tese e seus trabalhos derivados.

A seguir, a lista de todos os artigos publicados durante o desenvolvimento da tese de doutorado.

- 1) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Multipath Routing, Spectrum and Core Allocation in Protected SDM Elastic Optical Networks. In Proc. of IEEE Global Communications Conference, 2019. (Submetido)
- 2) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. P-cycle protected multipath routing, spectrum and core allocation in sdm elastic optical networks. In IEEE International Conference on Communications, pages 1-6, 2019. (Aceito para publicação).
- 3) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Protection, routing, spectrum and core allocation in ens-

sdm for efficient spectrum utilization. In IEEE International Conference on Communications, pages 1-6, 2019. (Aceito para publicação).

- 4) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Protection in elastic optical networks using failure-independent path protecting p-cycles. Optical Switching and Networking, 2019. (Submetido).
- 5) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Proteção e roteamento multicaminho em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, volume 37, 2019.(Aceito para publicação).
- 6) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Routing, spectrum and core assignment algorithms for protection of space division multiplexing elastic optical networks. in Journal of Network and Computer Applications, vol. 128, p. 78-89, 2019.
- 7) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Protection, Routing, Modulation, Core and Spectrum Al-

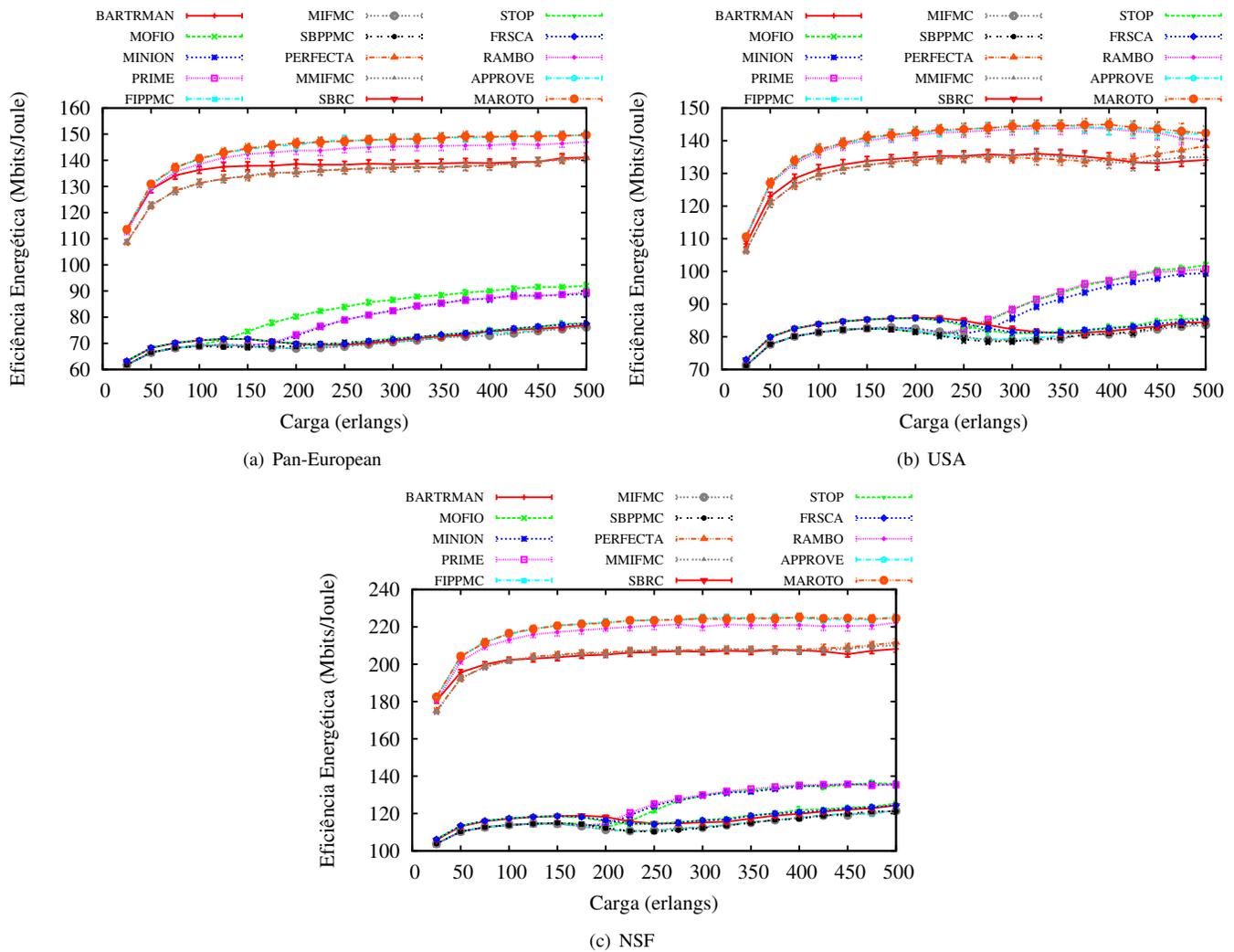


Fig. 5. Relação de eficiência energética em função da carga da rede

- location in SDM Elastic Optical Networks. in IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 9, p. 1806-1809, 2018.
- 8) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Proteção de Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação Espacial Baseada em Agregação de Tráfego, Sobreposição de Espectro e Compartilhamento de Caminho de Backup. In Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, volume 36, 2018.
 - 9) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Spectrum Overlap and Traffic Grooming in P-cycle Algorithm Protected SDM Optical Networks. In Proc. of IEEE International Conference on Communications, p 1-6, 2018.
 - 10) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. The Minimum Interference p-Cycle Algorithm for Protection of Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks. in IEEE Latin America Transactions, vol. 15, no. 7, p. 1342-1348, 2017.
 - 11) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Routing, Spectrum, Core and Modulation Level Assignment Algorithm for Protected SDM Optical Networks. In Proc. of IEEE Global Communications Conference, p 1-6, 2017.
 - 12) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Sharing Spectrum and Straddling p-Cycle FIPP for Protection Against Two Simultaneous Failures in SDM Elastic Optical Networks. In Proc. of IEEE Latin-American Conference on Communications, p 1-6, 2017.
 - 13) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Algorithm for Shared Path for Protection of Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks. In Proc. of in IEEE International Conference on Communications, p 1-6, 2017.
 - 14) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Proteção de Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação Espacial Baseada em Modulação, p-Cycle FIPP e Interferência Mínima. In Proc. of XXXV Brazilian Symposium on

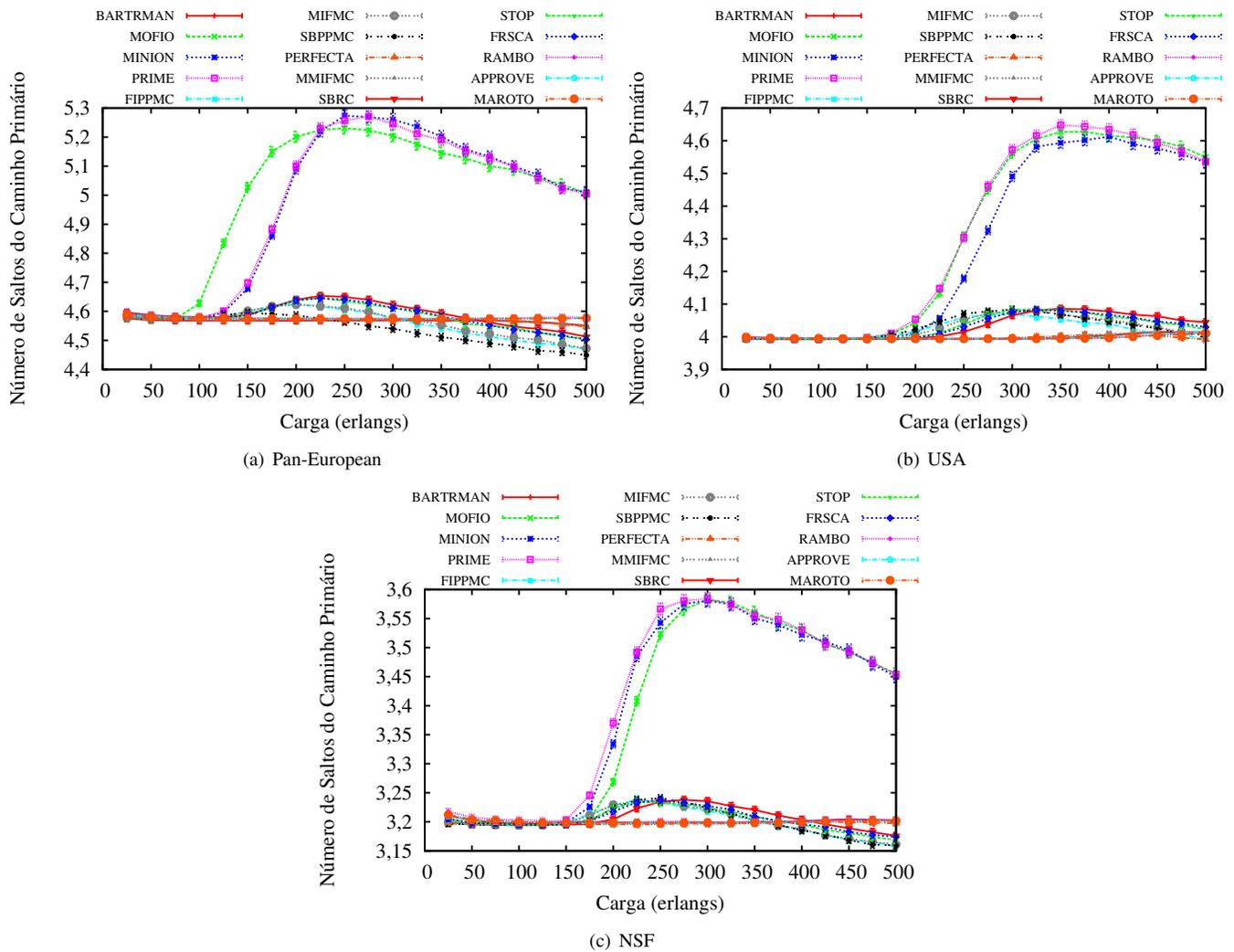


Fig. 6. Número médio de saltos dos caminhos primários em função da carga da rede

Computer Networks and Distributed Systems, p 1-14, 2017.

- 15) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Proteção de Redes Ópticas Elásticas Baseada em Agregação de Tráfego, Sobreposição de Espectro e p-Cycle FIPP. In Proc. of XXXIV Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems, p 1-14, 2016.
- 16) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Algorithm for Protection of Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks. In Proc. of IEEE Global Communications Conference, p 1-6, 2016.
- 17) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. The Minimum Interference p-Cycle Algorithm for Protection of Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks. In Proc. of IEEE Latin-American Conference on Communications, p 1-6, 2016.
- 18) OLIVEIRA, H. M. N. S.; Fonseca, N. L. S. da. Traffic Grooming and Spectrum Overlap in FIPP p-cycle for Protection of Elastic Optical networks. In Proc. of IEEE

Latin-American Conference on Communications, p 1-6, 2016.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram apresentadas as contribuições da tese de doutorado [6]. Um amplo estudo sobre proteção em redes ópticas elásticas com multiplexação espacial foi realizado. Os algoritmos desenvolvidos foram avaliados quanto a proteção e estabelecimento de conexões em diferentes topologias e métricas. Os algoritmos propostos utilizam técnicas como agregação de tráfego, sobreposição de espectro, modulação adaptativa. Os algoritmos desenvolvidos levam em consideração o *crossstalk* gerado, a fragmentação dos enlaces da rede, o consumo energético, e o número de saltos do caminho primário e de *backup*, aprimorando, assim, o uso da tecnologia de redes ópticas elásticas com multiplexação espacial. Os resultados obtidos mostraram-se promissores quando comparados aos da literatura. A utilização de diferentes formatos de modulação melhora a utilização dos

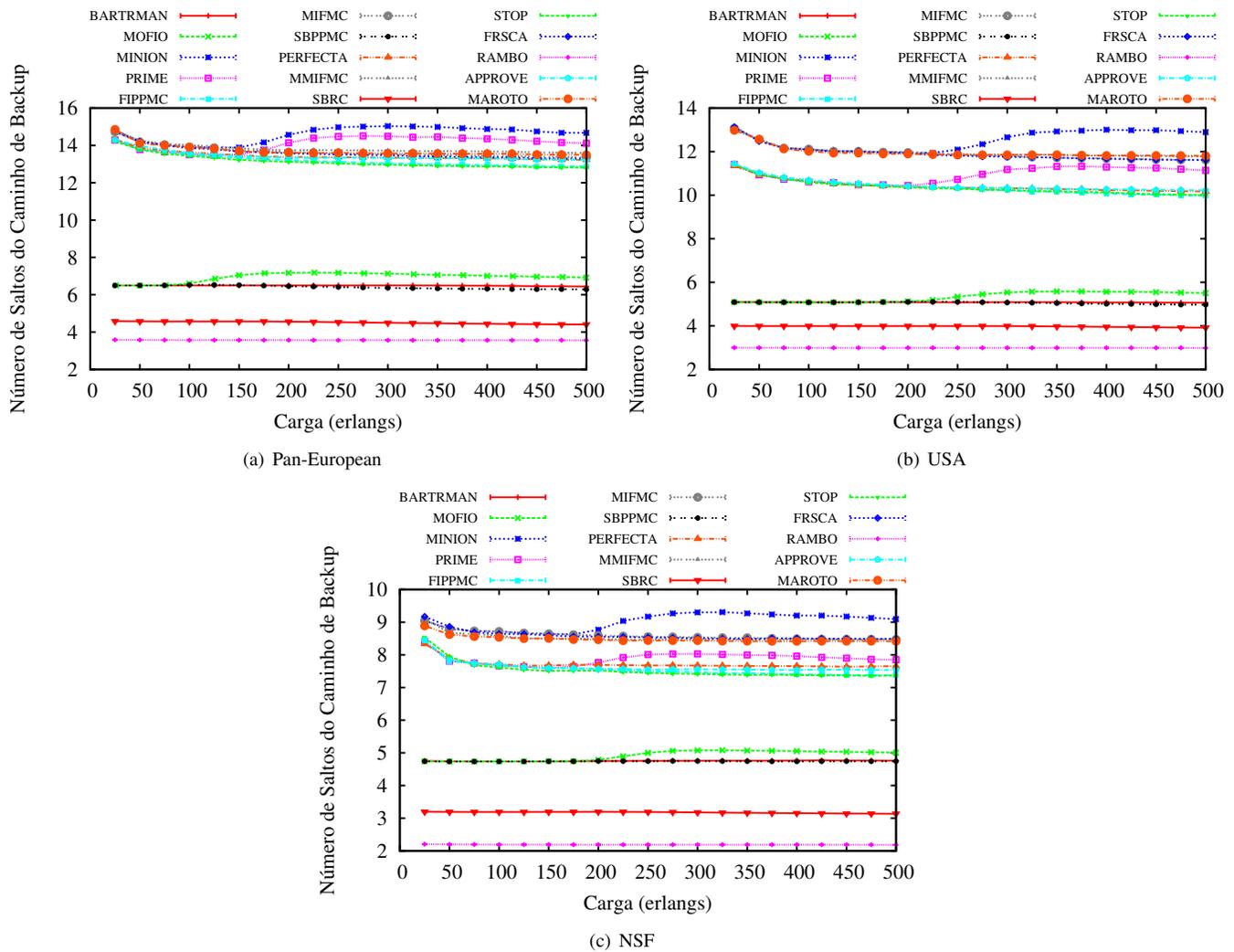


Fig. 7. Número médio de saltos dos caminhos de backup em função da carga da rede

recursos disponíveis, de forma que caminhos menores suportam maior transferência de dados. A utilização de agregação de tráfego e sobreposição de espectro reduziu significativamente o bloqueio, uma vez que, uma menor quantidade de recursos foi reservada para proteção. A utilização conjunta das técnicas de modulação adaptativa, agregação de tráfego e sobreposição de espectro diminuiu o bloqueio das requisições, aumentando, por sua vez, a complexidade na alocação dos recursos. A utilização de roteamento multicaminho melhora o balanceamento na utilização de recursos, consequentemente diminuindo o bloqueio de requisições. A técnica de proteção utilizada sofre grande influência da topologia da rede e das características suportadas na rede. Contudo, de modo geral a utilização de p-cycle FIPP aumenta a velocidade de restauração em caso de falhas e necessita de uma maior quantidade de recursos reservados para proteção.

REFERENCES

[1] M. Yang, Y. Zhang, and Q. Wu, "Routing, spectrum, and core assignment in sdm-eons with mcf: node-arc ilp/milp methods and an efficient xt-aware

heuristic algorithm," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 195–208, March 2018.
 [2] S. Yin, S. Huang, B. Guo, X. Li, C. Wang, and H. Huang, "Inter-core crosstalk aware routing, spectrum and core allocation in multi-dimensional optical networks," in *2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC)*, July 2017, pp. 1–4.
 [3] H. Tode and Y. Hirota, "Routing, spectrum, and core and/or mode assignment in space-division multiplexing optical networks [invited]," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 1, pp. A99–A113, Jan 2017.
 [4] S. Fujii, Y. Hirota, H. Tode, and T. Watanabe, "On-demand routing and spectrum allocation for energy-efficient aod nodes in sdm-eons," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 11, pp. 960–973, Nov 2017.
 [5] Y. Tan, R. Zhu, H. Yang, Y. Zhao, J. Zhang, Z. Liu, Q. Qu, and Z. Zhou, "Crosstalk-aware provisioning strategy with dedicated path protection for elastic multi-core fiber networks," in *International Conference on Optical Communications and Networks*, 2016, pp. 1–3.
 [6] H. M. N. S. Oliveira, "Proteção em redes Ópticas elásticas com multiplexação espacial," Ph.D. dissertation, Universidade Estadual de Campinas, 2018.
 [7] P. M. Moura and A. C. Drummond, "FlexGridSim: Flexible Grid Optical Network Simulator," <http://www.lrc.ic.unicamp.br/FlexGridSim/>.