

Novo Algoritmo RMLSA com Roteamento *Multihop* em Redes Ópticas Elásticas

Lucas R. Costa, André C. Drummond

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília (UnB),
70910-900, Brasília, Brasil

{lucasrc, andred}@unb.br

Abstract. *Elastic Optical Networks (EON) emerges as a promising solution for the future of high-speed optical transmission. Its features provide flexibility and superior scalability in spectrum allocation for the various emerging services following the increasing demand of Internet traffic. In EON traffic demands are supported by a spectrum allocation, using an arbitrary number of OFDM sub-carriers, and a suitable modulation level, taking into account the transmission distance. The purpose of this work is to address the Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation problem, called RMLSA, through the use of electric and optical traffic grooming associated with the control of spectral modulation in dynamics traffic scenario. To this end, we propose an algorithm that seeks to hold the largest possible amount of optical grooming using higher levels of modulation by using multihop in virtual topology. The results show the reduction in blocking ratio without compromising the use of network resources.*

Resumo. *A tecnologia de redes ópticas elásticas surge como uma solução promissora para o futuro da transmissão óptica de alta velocidade. Suas características proporcionam uma flexibilidade e escalabilidade superior na alocação de espectro para os diversos serviços emergentes acompanhando a crescente demanda do tráfego da Internet. Em redes ópticas elásticas as demandas de tráfego são suportadas por uma atribuição de espectro, usando um número arbitrário de subportadoras OFDM, e um nível de modulação adequado, tendo em conta a distância de transmissão. A proposta deste trabalho, procura resolver o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa, chamado RMLSA (Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation), através do uso da agregação de tráfego associado ao controle da modulação espectral no cenário de tráfego dinâmico. Para este fim, propõe-se um algoritmo que procura realizar a maior quantidade de agregação óptica possível usando os níveis de modulação mais altos através de múltiplos saltos na topologia virtual. Os resultados mostram a redução na taxa de bloqueio sem comprometer a utilização dos recursos na rede.*

1. Introdução

O tráfego na Internet tem crescido exponencialmente nos últimos anos e as previsões indicam que este crescimento continuará devido as aplicações emergentes, tais como, aplicações multimídia, TV de alta definição, computação em nuvem e aplicações de rede em tempo real. A tecnologia de transmissão óptica convencional é insuficiente para atender

as crescentes demandas de tráfego da Internet, uma vez que a mesma sofre com limitações físicas que impõem a transmissão de taxas fixas em cada comprimento de onda, reduzindo a eficiência na utilização dos seus recursos [Saradhi and Subramaniam 2009]. A adaptação da tecnologia de transmissão óptica convencional para as novas demandas de tráfego é um dos desafios para a Internet do Futuro. Para tratar adequadamente esse desafio são necessárias redes flexíveis equipadas com elementos que possam se adaptar às demandas heterogêneas do tráfego.

O paradigma de redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networking* - EON) surgiu com esse objetivo. Uma rede EON tem a capacidade de ajustar dinamicamente seus recursos, tais como, a largura de banda óptica e o formato de modulação de acordo com os requisitos de cada demanda. Para alocação de recursos de espectro em uma rede EON é necessário encontrar uma rota e atribuir à mesma uma quantidade contígua de *slots* espectrais [Tomkos et al. 2014], este problema é chamado RSA (*Routing and Spectrum Assignment*). Recentemente esse problema evoluiu para o chamado RMLSA (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation*) [Christodoulopoulos et al. 2011] que adiciona a atribuição do formato de modulação ao espectro na fibra. Diversos algoritmos para a alocação de recursos em redes EON têm sido propostos na literatura. Tais estudos demonstram a eficácia do novo paradigma e sua viabilidade.

Este trabalho propõe uma técnica que resolve o problema RMLSA através do uso da agregação elétrica e óptica associado ao controle da modulação espectral no cenário de tráfego dinâmico. O objetivo de associar essas técnicas visa aproveitar melhor os recursos da rede óptica atendendo maiores taxas de dados. Para este fim, propõe-se um algoritmo que procura realizar a maior agregação óptica possível usando os níveis de modulação mais altos através de múltiplos saltos na topologia virtual. Os resultados mostram uma redução na taxa de bloqueio de até 50%, proporcionando ganhos significativos sem comprometer a utilização dos recursos na rede.

O restante do artigo está organizado como segue. A Seção 2 apresenta brevemente a arquitetura das redes ópticas elásticas, bem com os elementos necessários para seu funcionamento. A Seção 3 apresenta o estado da arte das redes ópticas elásticas, algoritmos e técnicas propostas na literatura. A Seção 4 apresenta a técnica proposta neste trabalho para resolver o problema RMLSA. A Seção 5 mostra os resultados numéricos com o uso da técnica proposta. Por fim a Seção 6 apresenta as considerações finais.

2. Redes Ópticas Elásticas

As redes EON possuem a característica de dividir os recursos espectrais em *slots* de frequência na forma de subportadoras, permitindo múltiplos formatos de modulação e taxas de dados e espectro de tamanhos variados. Nesse contexto, o objetivo de uma EON é alocar uma demanda a um determinado caminho óptico que possua uma largura de banda óptica com um tamanho apropriado à mesma. A Figura 1(a) apresenta as diferenças entre os caminhos ópticos com grade fixa e flexível. Na grade fixa a faixa de frequência do espectro utilizado é única independentemente da demanda requisitada pelo cliente. Na grade flexível essa faixa de frequência é adaptável de acordo com a demanda requisitada. Assim, um caminho óptico elástico pode transmitir múltiplas taxas de dados, pois seu tamanho é alocado de acordo com a demanda requisitada pelo cliente. A arquitetura da rede EON é composta por transmissores de largura de banda variável (*bandwidth-variable*

transponder - BVT) e por comutadores ópticos de banda variável (*bandwidth-variable Wavelength Cross-Connects* - BV-WXC) que permitem o estabelecimento de caminhos ópticos com grade flexível. A Figura 1(b) mostra a arquitetura de uma rede EON.

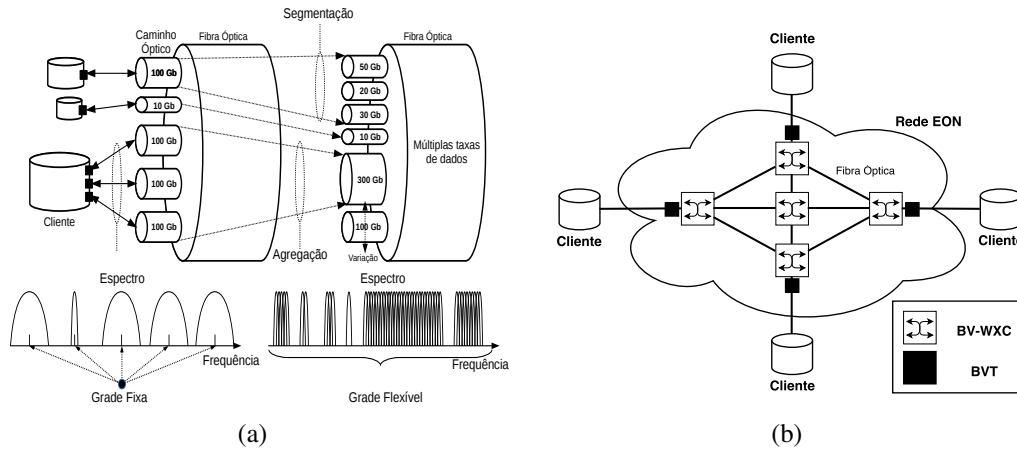


Figura 1. (a) Comparação entre os caminhos ópticos de redes com grade fixa e flexível. (b) Arquitetura das redes EON.

Os BVTs são responsáveis por alocar espectro suficiente para acomodar cada demanda. Várias subportadoras OFDM podem ser fundidas para formar um supercanal transportando os dados sem bandas de guarda no espectro. Dessa forma, os BVTs criam caminhos ópticos com largura de banda flexível permitindo o ajuste dos recursos ópticos de acordo com a demanda necessária [Zhang et al. 2013]. Os BV-WXC são os elementos responsáveis por estabelecer um caminho óptico fim-a-fim com a largura de banda necessária para acomodar os recursos espectrais estabelecidos pelos BVTs. Quando os BVTs aumentam a taxa do tráfego, cada BV-WXC na rota deve expandir sua janela de comutação, permitindo assim uma taxa de dados variável em cada caminho óptico [Zhang et al. 2013].

Nas redes EON, o formato de modulação é outro aspecto que permite o ajuste flexível da largura de banda. Em particular, cada caminho óptico, pode ser modulado individualmente utilizando um modulador diferente para cada transmissão. O número de subportadoras e o formato de modulação utilizado é ajustável de acordo com a quantidade de tráfego e o alcance óptico requisitado [Zhang et al. 2013]. A escolha do nível de modulação deve levar em consideração a qualidade necessária de transmissão (QoT) e, conseqüentemente, a tolerância de relação sinal-ruído óptico [Zhang et al. 2013, Christodoulopoulos et al. 2011]. Uma abordagem comumente utilizada pela literatura EON define a distância de transmissão do caminho óptico como o fator mais relevante na QoT [Jinno et al. 2010]. Portanto, a escolha do formato de modulação a ser utilizado é estabelecida de acordo com a distância do caminho percorrido na fibra. Dessa maneira, transmissões através de caminhos ópticos mais curtos são capazes de utilizar níveis de modulação mais altos.

A banda passante de cada subportadora está, portanto, intimamente relacionada à largura do espectro de cada subportadora e sua modulação adotada. A Equação 1 apresenta essa relação [Xiong 2006]:

$$B = \frac{C}{\log_2 M} \quad (1)$$

onde B é a largura de banda do espectro da subportadora em GHz, C é a taxa de dados em Gbps e M é o nível de modulação M-QAM ou M-PSK adotado. Em outras palavras, M é o número de fases usadas para codificar um determinado número de *bits* por símbolo. Portanto, quanto maior o nível de modulação, maior será a banda passante da subportadora e menor será seu alcance de acordo com o requisito de QoT.

Para estabelecer um caminho óptico com largura de espectro flexível é necessário resolver o problema RSA. O problema RSA exige que as subportadoras, pertencentes ao mesmo caminho óptico, sejam roteadas de forma contígua utilizando a mesma faixa de espectro durante toda a rota. Caminhos ópticos distintos devem ser separados por uma banda de guarda para atender as restrições da tecnologia OFDM. Semelhante à tecnologia de agregação elétrica das redes convencionais, em redes EON também é possível agregar fluxos a um caminho óptico já estabelecido [Zhang et al. 2011]. A tecnologia OFDM também permite outro tipo de agregação do tráfego, a agregação através do meio óptico. A agregação óptica permite aproveitar a flexibilidade proporcionada pelos comutadores EON agregando múltiplos caminhos ópticos em um único transmissor e comutá-los opticamente em conjunto [Zhang et al. 2012]. Esse agrupamento é realizado para suportar agregação de modo transparente, sem conversão do sinal do domínio óptico para elétrico. Esse grupo de caminhos ópticos é chamado de túnel óptico.

3. Trabalhos Relacionados

Em [Wan et al. 2011], os autores propuseram três heurísticas para solucionar o problema RSA em um cenário dinâmico. A primeira heurística (KSP) é um algoritmo dividido em dois passos, em que é utilizado o algoritmo Yen's KSP para encontrar as k -menores rotas da origem ao destino da demanda e em seguida o algoritmo tenta alocar a demanda em uma dessas k -rotas. A segunda heurística apresentada foi o algoritmo MSP (*Modified Dijkstra Shortest Path*), que procura a menor rota possível para alocar a demanda de tráfego baseado no algoritmo de *Dijkstra*. A terceira heurística foi o algoritmo SPV (*Spectrum-Constraint Path Vector Searching*), que consiste em um algoritmo de busca e construção de uma árvore para encontrar o menor caminho com espectro disponível para atender à demanda. Os resultados apresentados demonstram uma redução significativa na taxa de bloqueio em relação a algoritmos de RWA tradicionais em redes WDM.

O problema RMLSA foi inicialmente apresentado em [Christodouloupoulos et al. 2011], onde os autores adicionam o formato de modulação ao problema RSA. Posteriormente, o problema RMLSA foi investigado em [Wan et al. 2012], onde os autores avaliam os efeitos da modulação adaptativa nos mesmos algoritmos de [Wan et al. 2011]. Os autores propõe um esquema de modulação adaptativa para o problema RSA denominado *mAdap*. O esquema pode ser visto na Figura 2. A cada chegada de fluxo o algoritmo escolhe a maior modulação disponível na rede, em seguida calcula o número de *slots* necessários, dada esta modulação e o tamanho em *Hz* dos *slots*, para atender à demanda. Em seguida calcula-se a rota, de acordo com algum algoritmo de RSA e verifica se existe uma rota disponível que atenda os requisitos de continuidade e contiguidade do problema RSA. Caso não exista rota

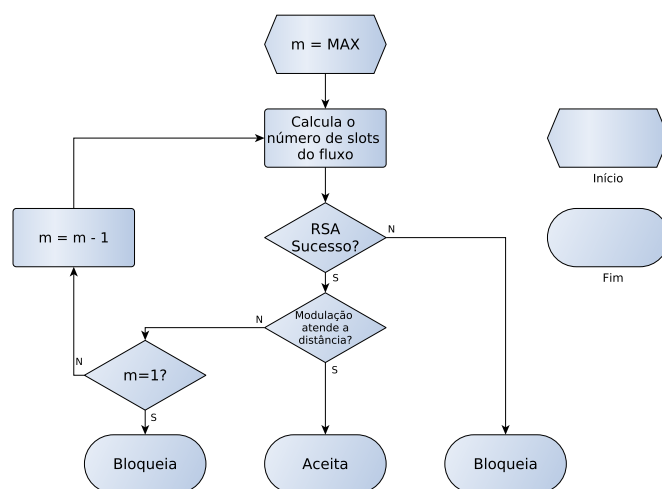


Figura 2. Esquema de modulação adaptativa para o problema RSA *mAdap*.

disponível, bloqueia-se a requisição, caso contrário, verifica se a distância percorrida nesta rota atende os requisitos mínimos de QoT da modulação. Caso a rota atenda os requisitos mínimos de QoT da modulação escolhida, a requisição é alocada na rede e aceita, caso não atenda, o nível de modulação é diminuído e recalcula-se o número de *slots* necessários para atender à demanda neste novo nível de modulação. Esse laço é executado até o menor nível de modulação possível da rede. Se mesmo no menor nível de modulação possível, o algoritmo RSA fornecer uma rota que não atende os requisitos de QoT da modulação então a requisição também é bloqueada. Os resultados apresentados dessa nova abordagem são comparados com uma PLI (Programação Linear Inteira) proposta e apresentam uma redução significativa na taxa de bloqueio e no uso do espectro [Wan et al. 2012].

Nas redes ópticas convencionais o uso de agregação de tráfego é comumente utilizado para elevar a usabilidade da rede óptica. Nas redes EON essa usabilidade pode ser ainda maior devido à tecnologia de agregação óptica. Os autores em [Khodashenas et al. 2013] propõem o algoritmo FPA (*First-Possible Aggregating*) que realiza agregação óptica no cenário de rede dinâmico. O algoritmo FPA maximiza a utilização da capacidade do BVT agregando múltiplos caminhos ópticos no mesmo transmissor. Além disso, o algoritmo FPA melhora a utilização do espectro através da redução do número de bandas de guarda entre os caminhos ópticos que compartilham a mesma rota. Esses recursos podem ser facilmente transformados para mais conexões estabelecidas através da rede e um menor número de transmissores exigidos por nó. Os resultados demonstraram que o uso da agregação óptica traz benefícios significativos na taxa de bloqueio de requisições em relação a algoritmos que não utilizam a técnica.

Recentemente em [Zhang et al. 2015], os autores propõem o uso de um grafo auxiliar com a implementação de técnicas de agregação elétrica e óptica para a resolução do problema RSA. Os autores também propõem dois esquemas de reserva de espectro para a agregação de futuras demandas de tráfego. São comparadas diferentes políticas de agregação em termos da quantidade de banda bloqueada, número de transmissores, número de saltos na topologia virtual e física. Os resultados da simulação mostraram que há

uma compensação entre as políticas e ambas devem ser implementadas de acordo com os objetivos do operador de rede.

Embora os algoritmos propostos em [Wan et al. 2012] levem em consideração a modulação adaptativa, recursos como agregação elétrica e óptica são ignorados pelos algoritmos. Os algoritmos propostos em [Khodashenas et al. 2013] e [Zhang et al. 2015] embora levem em consideração técnicas de agregação de tráfego, não abordam o contexto de modulação adaptativa nas suas propostas. Os autores em [Ye et al. 2014] propõem o primeiro algoritmo de distância adaptativa com técnicas de agregação de tráfego. No algoritmo DFG (*Distance-adaptive and Fragmentation-aware optical Grooming algorithm*) proposto, as demandas de tráfego com mesma origem que compartilham o mesmo enlace são agregadas opticamente e comutadas pelo meio óptico sem a utilização de bandas de guarda. O algoritmo ainda leva em consideração a modulação utilizada pelo túnel óptico e mostra que nem sempre a utilização da agregação óptica é eficiente, pois a distância de um determinado caminho óptico dentro do túnel pode ser muito longa e prejudicar a modulação do túnel óptico como um todo, como pode ser visto na Figura 3. Na Figura 3(a) o algoritmo FPA atende as quatro demandas com uso de 14 *slots* mais 2 bandas de guarda, um total de 16 *slots*, na Figura 3(b) (algoritmo DFG) as mesmas demandas são atendidas com um total de 14 *slots*, pois foi utilizado outro nível de modulação nos nós *d1*, *d2* e *d3*.

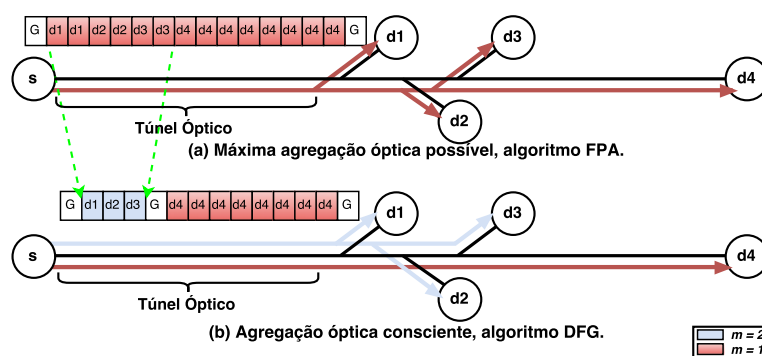


Figura 3. Problema de distância adaptativa com agregação óptica.

Embora o algoritmo em [Ye et al. 2014] leve em consideração o uso de técnicas de agregação e modulação adaptativa, o trabalho não leva em consideração o ambiente de tráfego de rede dinâmico, somente a abordagem estática. Outro fator importante não investigado é o uso de múltiplos saltos na topologia virtual (roteamento *multihop*). A Tabela 1 sumariza as propostas da literatura e apresenta suas características.

Tabela 1. Sumário de pesquisas sobre abordagens RSA.

Proposta	Tráfego	Agregação de Dados	Agregação de Espectro	Roteamento	Modulação
KSP, MSP, SPV [Wan et al. 2011]	Dinâmico	Não	Não	Single-Hop	Estática
RMLSA [Christodoulopoulos et al. 2011]	Estático	Não	Não	Single-Hop	Dinâmica
FPA [Khodashenas et al. 2013]	Dinâmico	Não	Sim	Single-Hop	Estática
MPH-SRNP [Zhang et al. 2015]	Dinâmico	Sim	Sim	Multi-Hop	Estática
DFG [Ye et al. 2014]	Estático	Sim	Sim	Single-Hop	Dinâmica
MBM (nossa proposta)	Dinâmico	Sim	Sim	Multi-Hop	Dinâmica

4. Proposta de Trabalho

Este artigo propõe um algoritmo que promove o uso do maior nível de modulação suportado pela rede. O algoritmo MBM (*Maximize the use of Best Modulation format*) proposto procura realizar o maior uso da agregação óptica possível associado ao uso do nível de modulação mais alto. Dessa forma, para que uma transmissão óptica entre dois nós distantes seja realizada com o uso de um nível de modulação alto é necessário que essa transmissão óptica seja composta por vários caminhos ópticos mais curtos que possam atender os requisitos de QoT dos níveis de modulação mais altos. A Figura 4 mostra um exemplo da sua lógica de funcionamento. Seguindo o mesmo exemplo da Figura 3, o nó $d4$ está muito distante do nó de origem s e por sua vez é alcançado com QoT aceitável somente com o nível de modulação $m = 1$. Por outro lado, os nós de destino $d1$, $d2$ e $d3$ podem ser alcançados pelo nível de modulação $m = 2$. A proposta de [Ye et al. 2014], Figura 3(b), observa essa situação e divide o túnel óptico em dois túneis ganhando recursos de espectro. No entanto, a demanda que contém a maior distância continua com o mesmo nível de modulação. No caso do algoritmo MBM, o uso do *multihop* traz a vantagem de usar caminhos ópticos menores e, por sua vez, utilizar níveis de modulação maiores.

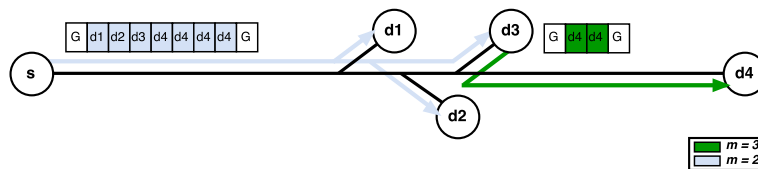


Figura 4. Exemplificação do algoritmo MBM.

O exemplo da Figura 4 mostra a vantagem do uso do algoritmo MBM. Como no algoritmo DFG, as demandas com destino aos nós $d1$, $d2$ e $d3$ continuam sendo enviadas pelo nível de modulação $m = 2$, entretanto a demanda com destino ao nó $d4$, que requeria 8 slots no nível de modulação $m = 1$, é enviada até o nó $d3$ com o nível de modulação $m = 2$, através do uso da agregação óptica. Quando a demanda com destino $d4$ chega ao nó $d3$ ocorre uma conversão OEO e outro transmissor é utilizado com um nível de modulação maior possível, que neste caso é $m = 3$. Dessa forma, o algoritmo MBM utiliza ao todo 13 slots para enviar as quatro demandas enquanto o algoritmo DFG utiliza 14 slots. O algoritmo MBM foi projetado para potencializar o esquema de modulação adaptativa *mAdap* proposto em [Wan et al. 2012]. Todavia, o MBM não requer a aplicação do esquema *mAdap* para resolver o problema RMLSA.

A abordagem utilizada pelo algoritmo MBM é descrita no Algoritmo 1, onde *AE* representa a agregação elétrica e *AO* representa a agregação óptica. Inicialmente cria-se duas estruturas compostas por k -menores caminhos disjuntos e não disjuntos através de uma execução *off-line* (linhas 1-2). Em seguida, para cada requisição, o algoritmo MBM procura um caminho óptico alocado na rede para realizar uma *AE* através da política *least loaded* (linha 4). Caso não seja possível realizar *AE* o algoritmo obtém os k menores caminhos disjuntos de s até d (linha 7) e tenta realizar uma *AO* procurando por caminhos ópticos com origem s que compartilham o máximo de enlaces possíveis com $Paths[i]$ (linhas 8-10). Caso não encontre um caminho que atenda esses requisitos, parte-se para a estratégia *multihop*. O algoritmo obtém os k -menores caminhos (linha 15) e procura dentre os mesmos se é possível realizar *AE* ou *AO* sobre os caminhos ópticos que compõem o

Algoritmo 1 *Maximize the use of Best Modulation format* – MBM

```
1:  $kDPaths \leftarrow$  todos os  $k$ -menores caminhos disjuntos (off-line)
2:  $kSPaths \leftarrow$  todos os  $k$ -menores caminhos (off-line)
3: para cada requisição de conexão  $r(s, d, b)$  faça
4:   se possível fazer AE com  $r$  de  $s$  até  $d$  então ▷ (Estratégia singlehop)
5:     aceita a requisição  $r$ 
6:   senão
7:      $Paths \leftarrow kDPaths(s, d)$ 
8:     para  $i \leftarrow 1$  até  $k$  faça
9:       Procura um caminho óptico com origem em  $s$  que compartilha o máximo de enlaces com  $Paths[i]$ 
10:      se encontrou um caminho óptico e for possível fazer AO com  $r$  de  $s$  até  $d$  então
11:        aceita a requisição  $r$ 
12:      fim se
13:    fim para
14:  fim se
15:   $Paths \leftarrow kSPaths(s, d)$  ▷ (Estratégia multihop)
16:  para  $i \leftarrow 1$  até  $k$  faça
17:     $s' \leftarrow s$ 
18:     $d' \leftarrow s$ 
19:    enquanto  $d' \neq d$  faça
20:      Procura um caminho óptico com origem em  $s'$  que compartilha o máximo de enlaces com  $Paths[i]$ 
21:      se encontrou um caminho óptico então
22:         $d' \leftarrow$  o último nó compartilhado
23:        se possível fazer AE com  $r$  de  $s'$  até  $d'$  então
24:           $s' \leftarrow d'$ 
25:        senão
26:          se possível fazer AO com  $r$  de  $s'$  até  $d'$  então
27:             $s' \leftarrow d'$ 
28:          senão
29:            Sai do laço
30:          fim se
31:        fim se
32:      senão
33:        Sai do laço
34:      fim se
35:    fim enquanto
36:    se  $s' = d$  então
37:      aceita a requisição  $r$ 
38:    senão
39:      Criar um novo caminho óptico de  $s'$  até  $d$  com o algoritmo KSP com nível de modulação adequado à distância
40:      se for possível criar caminho óptico então
41:        aceita a requisição  $r$ 
42:      fim se
43:    fim se
44:  fim para ▷ (Estratégia singlehop)
45:  Executar o algoritmo KSP na requisição  $r$  com origem  $s$  e destino  $d$  com o maior nível de modulação adequado à distância
46:  se for possível criar um caminho óptico então
47:    aceita a requisição  $r$ 
48:  senão
49:    bloqueia a requisição  $r$ 
50:  fim se
51: fim para
```

caminho $Paths[i]$, realizando assim, múltiplos saltos na topologia virtual (linhas 16-35). Ainda no final do laço, o algoritmo procura criar um novo caminho óptico com o maior nível de modulação adequado à distância para compor o restante do caminho $Paths[i]$ que não foi possível ser completado pela agregação de tráfego (linhas 36-44). Por fim, se não for possível realizar nenhum tipo de agregação, então o algoritmo executa a estratégia utilizada pelo algoritmo *KSP* com o nível de modulação adequado à distância usando uma abordagem *singlehop* (linha 45). Se mesmo assim não for possível criar um caminho óptico, então a requisição é bloqueada (linha 49).

É interessante notar, que o uso da estratégia *multihop* do MBM associado ao esquema de modulação adaptativa *mAdap* procura sempre utilizar o maior nível de modu-

lação possível, neste caso, o melhor nível de modulação possível dado a distância. Em outras palavras, o algoritmo MBM potencializa o esquema de modulação adaptativa *mAdap* provocando a utilização dos maiores níveis de modulação suportados na rede, com o intuito de economizar espectro. O uso de múltiplos saltos na topologia virtual provoca a utilização de mais transmissores na rede. Entretanto, a agregação óptica faz com que o aumento do uso de transmissores não seja um fator significativo, pois à medida que novos transmissores são ativados em pontos distribuídos na rede, os mesmos podem ser reaproveitados para a agregação de novas demandas.

A complexidade de tempo do algoritmo MBM é analisada como segue. A primeira parte (linhas 4-14) é dominada por duas etapas: (i) a verificação inicial de possível *AE* (linha 4); e (ii) a verificação de possível *AO* em k rotas (linhas 8-13). Tendo em vista que o número máximo de caminhos ópticos alocados na rede é $|E||S|$, onde E é o conjunto de enlaces na rede e S é o conjunto de *slots* em cada enlace, tem-se que a complexidade da primeira etapa é $O(|E||S|)$. A complexidade da segunda etapa segue o mesmo raciocínio em k rotas, logo tem-se uma complexidade de $O(k * |E||S|)$. Portanto, a primeira parte tem uma complexidade de tempo equivalente a $O(k * |E||S|)$. A segunda parte (linhas 15-44) é dominada por duas etapas: (i) a verificação de possível *AE* (linha 23) e/ou possível *AO* (linha 26); e (ii) a execução do algoritmo KSP (linha 39). Seguindo o raciocínio anterior, a complexidade da primeira etapa é $O(|E||S|)$ para realizar *AE* ou *AO*. Na segunda etapa, marcada pela execução do algoritmo KSP, tem-se uma complexidade de $O(k)$, uma vez que o algoritmo YenKSP é executado *offline* [Wan et al. 2012]. Portanto, considerando os laços das linhas (16/19), a segunda parte tem uma complexidade equivalente a $O(k * N * |E||S| + k^2)$, onde N é o número de nós na rede. A terceira parte (linhas 45-50) tem apenas uma etapa que é a execução do algoritmo KSP, logo sua complexidade é de $O(k)$. Como a segunda parte é a que impõem a maior complexidade, tem-se que a complexidade do algoritmo MBM é de $O(k * N * |E||S| + k^2)$ que é polinomial.

5. Resultados Numéricos

As simulações foram realizadas utilizando o simulador WDMSim [Drummond 2016] com adaptações para cenário EON. Cada simulação foi realizada cinco vezes utilizando o método de replicações independentes. Para os resultados apresentados foram calculados intervalos de confiança com 95% de confiabilidade. Em cada simulação foram geradas 10^5 requisições de conexão com 15 níveis de granularidade variando de 12,5 Gb/s até 100 Gb/s com passos de 6,25 Gb/s com mesma probabilidade de chegada. O processo de chegada das chamadas segue a distribuição de *Poisson* com origem e destino distribuídos uniformemente para todos os pares de comunicação da rede. As topologias consideradas nas simulações foram a USANet com 24 nós e 43 enlaces bidirecionais, e a topologia PanEuro com 27 nós e 81 enlaces bidirecional. A Figura 5 apresenta as distâncias dos enlaces em quilômetros. A largura de cada *slot* considerada foi 12,5 GHz e foi assumido que cada enlace possui a capacidade de 120 *slots* (1,5 THz). Assume-se uma banda de guarda de 2 *slots* (25 GHz). Cada nó na topologia possui 15 transmissores e cada transmissor tem a capacidade máxima de transmitir até 8 *slots*. As modulações consideradas são BPSK, QPSK, 8QAM e 16QAM com 1, 2, 3 e 4 bits por símbolo e alcances de 8000, 4000, 2000 e 1000 km, respectivamente. Para todos os algoritmos, foi considerado o parâmetro $k = 3$ e a política de FF (*First Fit*) para resolver o problema RSA.

Foram comparados cinco algoritmos da literatura (KSP, MSP, SPV, FPA e MPH-

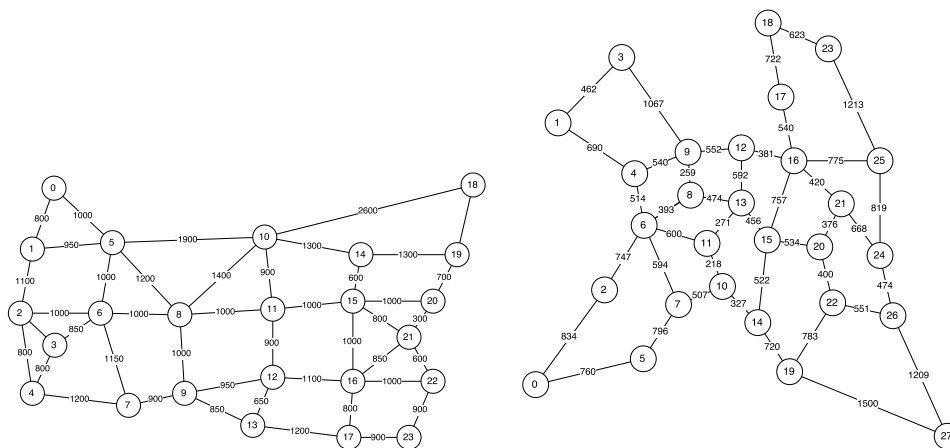


Figura 5. Topologia USANet e PanEuro.

SRNP) com o algoritmo MBM. Os algoritmos KSP, MSP e SPV [Wan et al. 2011, Wan et al. 2012] não consideram técnicas de agregação de tráfego e utilizam a estratégia *singlehop*. O algoritmo FPA [Khodashenas et al. 2013], por sua vez já considera o uso das técnicas de agregação de tráfego mas continua utilizando a estratégia *singlehop*. O algoritmo MPH-SRNP [Zhang et al. 2015] considera o uso das técnicas de agregação de tráfego e utiliza a estratégia *multihop*. Para tornar todas as abordagens avaliadas capazes de resolver o problema RMLSA e garantir um ambiente de avaliação justo, todos os algoritmos foram avaliados sob o esquema *mAdap* (Figura 2) conforme em [Wan et al. 2012].

As seguintes métricas são avaliadas: Taxa de bloqueio de banda (BBR), taxa média de transmissores disponíveis, média de saltos na topologia virtual por requisição, média da taxa de espectro disponível e taxa média do uso de modulação. As métricas referentes à utilização de recursos na rede são avaliadas para evidenciar os ganhos relativos aos mecanismos implementados no algoritmo MBM. Além disso, soluções de engenharia de tráfego que levam à redução na utilização dos recursos instalados na rede, contribuem para a diminuição de sua probabilidade de exaustão.

Taxa de bloqueio de banda (BBR)

O BBR reflete a taxa de banda bloqueada, quanto maior essa taxa, maior é a banda bloqueada. A Figura 6 mostra o BBR dos algoritmos considerados para várias cargas de tráfego nas topologias UsaNet e PanEuro, respectivamente. Pode-se observar que o algoritmo MBM obteve o menor bloqueio de banda frente aos demais algoritmos. Em relação aos algoritmos KSP, MSP e SPV a diferença na taxa de bloqueio caiu pela metade, para os algoritmos FPA e MPH-SRNP a redução foi de até 50% para cargas baixas e até 10% para cargas mais altas. Isso acontece, pois ao considerar múltiplos saltos na topologia virtual o algoritmo tem mais possibilidades para atender as demandas, tendo em vista que os requisitos de continuidade são aliviados. Embora o algoritmo MPH-SRNP também realize *multihop*, sua técnica de minimizar o número de saltos na topologia física faz com que suas rotas percorram maiores distâncias e conseqüentemente leva o esquema de modulação adaptativa (*mAdap*) a utilizar níveis de modulação menores. O não aproveitamento adequado dos maiores níveis de modulação provoca uma queda no desempenho do MPH-SRNP.

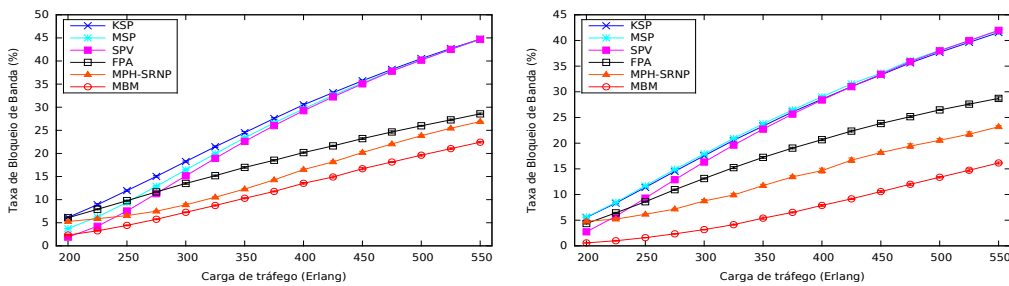


Figura 6. Taxa de bloqueio de banda (BBR). Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Taxa média de transmissores disponíveis

A taxa de transmissores disponíveis reflete a usabilidade do número de transmissores, quanto maior for essa taxa, maior a quantidade de transmissores disponíveis na rede. A Figura 7 mostra os resultados para as topologias UsaNet e PanEuro, respectivamente, tendo em vista que cada nó possui 15 transmissores nesta simulação. Observa-se que o uso de transmissores no algoritmo MBM é um pouco superior ao do algoritmo FPA e bem inferior aos demais. No entanto, isso já era esperado, tendo em vista que o uso da técnica de *multihop* exige um maior uso de transmissores na rede. É importante notar a proximidade do MBM com o FPA, cerca de 2% na topologia UsaNet e 5% na topologia PanEuro. Nos demais algoritmos a taxa de utilização de transmissores é cerca de 12% maior que o MBM. Isto demonstra que o aumento do uso de transmissores do algoritmo MBM não trouxe um impacto significativo quando comparado aos ganhos de BBR, o mesmo não acontece ao MPH-SRNP, que utiliza um maior número de transmissores e obtém um baixo ganho de BBR. Isto evidencia a eficiência do algoritmo MBM frente aos demais algoritmos.

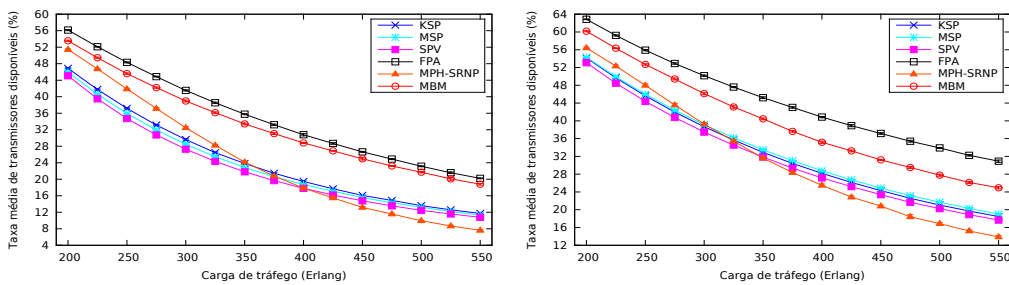


Figura 7. Taxa média de transmissores disponíveis. Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Média de saltos na topologia virtual por requisição

O número de saltos na topologia virtual indica o número de conversões OEO e processamento elétrico que são utilizados na rede. A Figura 8 mostra a média de saltos na topologia virtual por requisição para várias cargas de tráfego nas topologias UsaNet e PanEuro, respectivamente. Os algoritmos KSP, MSP, SPV e FPA mantêm em todas as cargas de tráfego uma média igual a 1, pois esses algoritmos são *singlehop*. Pode-se observar que o algoritmo MBM mantém sua média de saltos entre 2 e 2,5 por requisição mesmo com o crescimento do tráfego. O mesmo não acontece ao algoritmo MPH-SRNP, onde

sua tendência é aumentar o número de saltos com o crescimento do tráfego. Dessa forma, o algoritmo MBM faz, em média, dois saltos para atender uma requisição usando, em geral, o melhor nível de modulação possível. Observa-se que essa característica do MBM não afeta negativamente o desempenho do algoritmo, como demonstrado anteriormente.

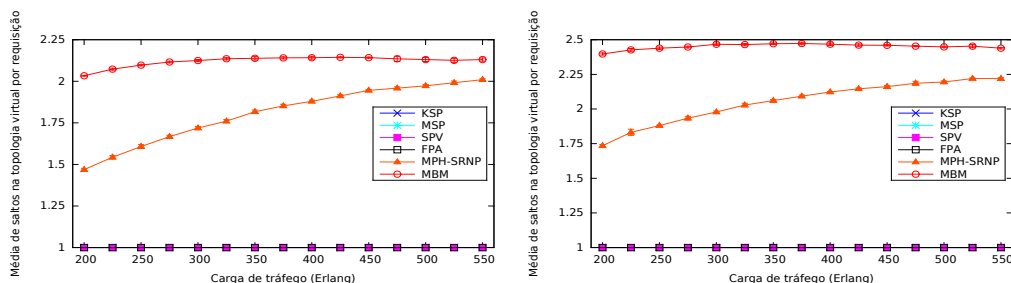


Figura 8. Média de saltos na topologia virtual por requisição. Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Taxa média de espectro disponível

A taxa de espectro disponível reflete o uso de recursos de espectro utilizado em toda a rede. A Figura 9 mostra a média da taxa de espectro disponível por requisição para várias cargas de tráfego nas topologias UsaNet e PanEuro, respectivamente. Observa-se que o algoritmo MBM tem o menor uso do espectro, em média cerca de 6% menor chegando a 8%, em todas as cargas de tráfego dentre todos os algoritmos avaliados, evidenciando o melhor desempenho do algoritmo MBM. Por aproveitar melhor o uso do espectro, o algoritmo MBM obtém uma melhor taxa de bloqueio que os demais. Um detalhe importante é que a mesma correspondência apresentada pela taxa de bloqueio de banda entre o algoritmo MBM e o FPA é refletida na taxa de uso do espectro, mostrando a importância desta métrica no bloqueio de banda.

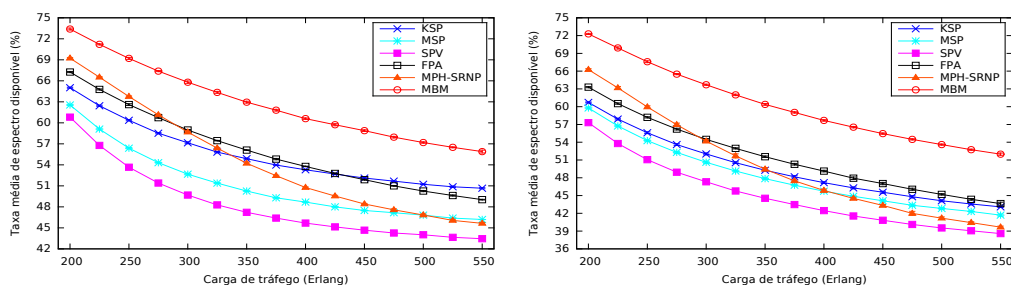


Figura 9. Taxa média de espectro disponível. Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Taxa média do uso de modulação

A taxa média do uso de modulação mostra o percentual de caminhos ópticos alocados para cada nível de modulação. A Tabela 2 mostra a taxa média do uso de modulação considerando a média para todas as cargas de trabalho nas topologias UsaNet e PanEuro, respectivamente. É necessário destacar que a taxa apresentou uma pequena variação entre as cargas de trabalho, com o desvios médios menores que 1. Os resultados mostram que o algoritmo MBM aproveita ao máximo o uso do maior nível de modulação fornecido

pelos transmissores. Com essa estratégia o algoritmo consegue um melhor desempenho no uso dos recursos de espectro proporcionando uma menor taxa de bloqueio de banda. A modulação 16QAM foi utilizada em 55% dos caminhos ópticos alocados na topologia UsaNet, e em 81% na topologia PanEuro. O algoritmo MPH-SRNP obteve um percentual bastante distribuído na topologia UsaNet. Na topologia PanEuro, o percentual maior concentrou-se na modulação 16QAM, uma vez que essa topologia possui uma distância média menor entre seus nós. Os demais algoritmos mantêm o mesmo padrão de uso do nível de modulação em suas respectivas topologias concentrando seu maior percentual nas modulações QPSK e 8QAM para as topologias UsaNet e PanEuro, respectivamente, uma vez que, em média, modulações superiores não atendem as distâncias dos caminhos ópticos maiores.

Tabela 2. Taxa média do uso de modulação nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

Algorithm	% BPSK	% QPSK	% 8QAM	% 16QAM
KSP	19,06	42,26	24,72	13,96
MSP	22,23	39,93	24,18	13,66
SPV	24,25	39,09	23,38	13,28
FPA	16,48	43,87	25,52	14,13
MPH-SRNP	27,87	26,39	20,49	25,25
MBM	7,95	18,42	18,57	55,06

Algorithm	% BPSK	% QPSK	% 8QAM	% 16QAM
KSP	1,37	37,75	39,78	21,10
MSP	2,77	36,64	39,23	21,36
SPV	3,82	38,14	37,48	20,56
FPA	1,19	37,24	40,36	21,21
MPH-SRNP	19,03	19,00	22,56	39,41
MBM	0,87	8,78	8,83	81,52

6. Conclusão

Este trabalho abordou as principais características do paradigma de redes ópticas elásticas (EON) e apresentou os principais desafios encontrados na literatura. Foi proposta uma técnica para solucionar o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) através do uso da agregação elétrica e óptica associado ao controle da modulação espectral no cenário de tráfego dinâmico. O objetivo de associar essas técnicas procura aproveitar melhor os recursos de espectro da rede óptica atendendo maiores taxas de dados. Para este fim, propõe-se o algoritmo MBM que procura realizar agregação óptica usando os níveis de modulação mais altos através de múltiplos saltos na topologia virtual. Dessa forma, para que uma transmissão óptica entre dois nós distantes seja realizada com o uso de um nível de modulação alto é necessário que essa transmissão óptica seja composta por vários caminhos ópticos mais curtos que possam atender os requisitos de QoT dos níveis de modulações mais elevados. Dessa maneira, é possível utilizar menos recursos de espectro ao custo de utilizar mais transmissores na rede.

Para demonstrar este fato, foram comparados cinco algoritmos da literatura com o algoritmo MBM em duas topologias de rede. Os resultados mostraram que o algoritmo MBM reduziu significativamente a taxa de bloqueio de banda (BBR) frente aos demais algoritmos da literatura. Embora o uso de transmissores tenha crescido cerca de 2% frente aos algoritmos comparados, observa-se que o MBM utiliza de maneira mais eficiente os transmissores através do roteamento *multihop*, viabilizando novos pontos de entrada na rede para a agregação elétrica e óptica, o que leva a um melhor uso de espectro na rede.

Referências

- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I., and Varvarigos, E. (2011). Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 29(9):1354–1366.
- Drummond, A. C. (2016). Wdmsim: Wdm optical network simulator. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/wdmsim/>.
- Jinno, M., Kozicki, B., Takara, H., Watanabe, A., Sone, Y., Tanaka, T., and Hirano, A. (2010). Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]. *IEEE Communications Magazine*, 48(8):138–145.
- Khodashenas, P. S., Comellas, J., Spadaro, S., and Perelló, J. (2013). Dynamic source aggregation of sub-wavelength connections in elastic optical networks. *Photonic Network Communications*, 26:2–3.
- Saradhi, C. and Subramaniam, S. (2009). Physical layer impairment aware routing (pliar) in wdm optical networks: issues and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 11(4):109–130.
- Tomkos, I., Azodolmolky, S., Sole-Pareta, J., Careglio, D., and Palkopoulou, E. (2014). A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges. *Proceedings of the IEEE*, 102(9):1317–1337.
- Wan, X., Hua, N., and Zheng, X. (2012). Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(8):603–613.
- Wan, X., Wang, L., Hua, N., Zhang, H., and Zheng, X. (2011). Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3.
- Xiong, F. (2006). *Digital Modulation Techniques, Second Edition (Artech House Telecommunications Library)*. Artech House, Inc., Norwood, MA, USA.
- Ye, Z., Patel, A., Ji, P., and Qiao, C. (2014). Distance-adaptive and fragmentation-aware optical traffic grooming in flexible grid optical networks. In *2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*, pages 355–356.
- Zhang, G., Leenheer, M. D., Morea, A., and Mukherjee, B. (2013). A survey on ofdm-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(1):65–87.
- Zhang, G., Leenheer, M. D., and Mukherjee, B. (2012). Optical traffic grooming in ofdm-based elastic optical networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(11):B17–B25.
- Zhang, J., Ji, Y., Song, M., Zhao, Y., Yu, X., Zhang, J., and Mukherjee, B. (2015). Dynamic traffic grooming in sliceable bandwidth-variable transponder enabled elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, PP(99):1–1.
- Zhang, Y., Zheng, X., Li, Q., Hua, N., Li, Y., and Zhang, H. (2011). Traffic grooming in spectrum-elastic optical path networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3.