

Novo Esquema para Provisão de Modulação Adaptativa em Redes Ópticas Elásticas

Lucas R. Costa, André C. Drummond

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

lucasrc.rodri@gmail.com, andred@unb.br

Abstract. *Elastic optical networks are becoming a promising technology for the future of high-capacity networks. Its features provide flexibility and superior scalability in spectrum allocation following the growing demands of Internet traffic. In this paper we propose a novel approach to address the Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation (RMLSA) problem through the use of a distance-adaptive modulation scheme that enables the routing of traffic through multiple hops in virtual topology, enabling smoothing out the spectrum continuity and transmission distance constraints. The results showed that the use of the adaptive modulation scheme proposed may provide a reduction of up to 82% in the bandwidth blocking ratio and energy savings of up to 34% compared to literature approaches. This proposal opens a new avenue for future research, allowing new solutions for RMLSA problem.*

Resumo. *Redes ópticas elásticas mostram-se como uma tecnologia promissora para o futuro das redes de alta capacidade. Suas características proporcionam uma flexibilidade e escalabilidade superior na alocação de espectro acompanhando a crescente demanda do tráfego na Internet. Este trabalho tem como objetivo propor uma nova abordagem para o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation - RMLSA) por meio do uso de um esquema de modulação adaptativa que viabilize o roteamento do tráfego através de múltiplos saltos na topologia virtual, permitindo a suavização das restrições de continuidade de espectro e distância de transmissão. Os resultados mostraram que o uso do esquema de modulação adaptativa proposto pode proporcionar uma redução de até 82% na taxa de bloqueio de banda e uma eficiência energética de até 34% em comparação com abordagens da literatura. Esta proposta abre um novo caminho para pesquisas futuras, permitindo novas soluções para o problema RMLSA.*

1. Introdução

O paradigma de redes ópticas elásticas (Elastic Optical Networks - EON) tem atraído bastante atenção e interesse na academia e na indústria nos últimos anos [Tomkos et al. 2014, Chatterjee et al. 2015]. A característica fundamental das redes EON refere-se à capacidade da rede de ajustar dinamicamente seus recursos, tais como, a largura de banda e formato de modulação de acordo com os requisitos de cada demanda [Jinno et al. 2010]. Em comparação com as redes ópticas tradicionais de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength-Division Multiplexing* - WDM), as redes EON exigem

mecanismos de alocação de largura de banda mais sofisticados, baseados em abordagens de roteamento e de atribuição do espectro (*Routing and Spectrum Assignment - RSA*) e dispositivos de largura de banda variável, como transmissores de largura de banda variável (*Bandwidth Variable Transponder - BVT*) e comutadores ópticos de banda variável (*Bandwidth Variable Optical Cross-Connects - BV-OXC*) [Chatterjee et al. 2015].

A eficiência do espectro esta relacionada à sua tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) implementada pelos BVTs e BV-OXCs das redes EON. Estes componentes possibilitam que o espectro seja separado em subportadoras contíguas parcialmente sobrepostas. Isso permite a criação de caminhos ópticos com taxa de transmissão ajustável facilitando o atendimento das recentes requisições de tráfego da Internet [Tomkos et al. 2014]. Para melhorar ainda mais a eficiência e a utilização do espectro, a literatura EON incorporou a qualidade de transmissão (*Quality-of-Transmission - QoT*) para as soluções RSA. Isto transformou o problema RSA no problema de alocação de espectro com modulação adaptativa (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation - RMLSA*), que adiciona a atribuição do formato de modulação ao espectro, considerando sua distância de transmissão [Christodoulopoulos et al. 2011].

Este trabalho propõe uma técnica que resolve o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) através do uso de um esquema de modulação adaptativa inovador. Este esquema propõe dividir o problema RMLSA em dois subproblemas: (i) atribuição do formato de modulação; e (ii) execução de um algoritmo RSA através do roteamento *multi-hop*. O esquema proposto permite a utilização de qualquer abordagem RSA clássica para resolver o problema RMLSA ao mesmo tempo que ameniza as restrições de continuidade de espectro e de distância de transmissão do problema. Ao decompor o problema em dois sub-problemas, estabelecem-se novas possibilidades a serem exploradas em futuras pesquisas, propiciando o surgimento de novas soluções RMLSA adaptadas às necessidades dos provedores de redes de transporte óptico.

Uma análise preliminar deste estudo foi apresentado em [Costa and Drummond 2016b], onde os autores abordam as vantagens do esquema em relação a ganhos da taxa bloqueio e eficiência de espectro. Neste trabalho novas perspectivas, como eficiência energética, são observadas. Apresenta-se novos resultados e novas métricas que consolidam ainda mais a relevância do esquema proposto. Os resultados mostram uma redução de até 82% na taxa de bloqueio de banda e uma eficiência energética de até 34% em comparação com abordagens da literatura.

O restante do artigo está organizado como segue. A Seção 2 apresenta brevemente os conceitos básicos da rede EON e o modelo de gasto energético adotado nas avaliações. A Seção 3 apresenta os trabalhos relacionados ao problema RMLSA. A Seção 4 apresenta o esquema de modulação adaptativa proposto para resolver o problema RMLSA. A Seção 5 mostra as avaliações de desempenho do esquema de modulação adaptativa proposto. 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 OFDM, permitindo múltiplos formatos de modulação e taxas de dados e espectro de tamanhos variados. Uma rede EON é capaz de alocar uma

demanda em um caminho óptico com largura de banda apropriado à requisição. Como já mencionado, a arquitetura da rede EON é composta por BVTs e BV-OXCs, estes componentes são responsáveis pelo estabelecimento de caminhos ópticos flexíveis. Os BVTs são encarregados por alocar espectro suficiente para acomodar cada demanda. Por outro lado, os BV-OXC 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 [Zhang et al. 2013].

A alocação do espectro em diferentes níveis de modulação é outro aspecto que permite o ajuste flexível da largura de banda em uma rede EON. Em particular, alocação de espectro com modulação adaptativa permite com que cada caminho óptico, possa ser modulado individualmente utilizando um modulador (BVT) diferente para cada transmissão [Nag et al. 2010]. 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 [Wan 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.

A tecnologia de agregação de tráfego elétrica (EG) das redes ópticas tradicionais também é aplicável nas redes EON. A EG permite a agregação de múltiplas requisições de tráfego em um mesmo caminho óptico através da multiplexação por divisão de tempo [Zhang et al. 2011]. A tecnologia OFDM também permite outro tipo de agregação do tráfego, a agregação através do meio óptico. A agregação óptica (OG) permite aproveitar a flexibilidade proporcionada pelos comutadores EON agregando múltiplos caminhos ópticos em um único transmissor sem a necessidade de bandas de guarda entre os caminhos comutando-os 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.

O roteamento em múltiplos saltos (*multi-hop*) é dado quando uma conexão passa por vários caminhos ópticos, tendo em vista que cada caminho óptico pode passar por vários enlaces. Ao final de cada caminho óptico, será realizada uma conversão OEO (*Optical-Electrical-Optical*) o que resultará em um salto na topologia virtual. Os caminhos ópticos da conexão podem ser novos ou existentes. Novos quando os caminhos ópticos forem criados para atender uma nova conexão, existentes quando os caminhos ópticos forem usados através da agregação de tráfego.

Em um cenário de rede dinâmico, o processo de estabelecimento e encerramento de conexões inevitavelmente cria pequenos fragmentos de espectro não-contíguos o que conduz ao chamado problema de fragmentação de espectro [Zhang et al. 2013]. Este problema também causa a utilização ineficiente dos recursos de espectro proporcionando uma degradação do desempenho da rede. Para medir o nível de fragmentação do canal pode-se utilizar o cálculo da fragmentação externa, comumente utilizado na arquitetura de computadores, e denotada pela Equação 1 [Horota et al. 2014]:

$$F_{ext} = 1 - \frac{\text{maiorBlocoLivre}}{\text{totalLivre}} \quad (1)$$

2.1. Modelo de Consumo Energético das redes EON

Devido à indisponibilidade comercial dos componentes de largura de banda variável OFDM (BVT/BV-OXC) algumas hipóteses têm sido feitas pela literatura para mensurar o gasto energético dos componentes EON [Vizcaíno et al. 2012]. O consumo de energia de um único BVT pode ser interpolado em função da sua taxa de transmissão (TR) como mostra a Equação 2. Conseqüentemente, o consumo energético dos BVTs para uma subportadora nos diferentes formatos de modulação é apresentado na Tabela 1. Além disso, um adicional de 25% é considerado para possíveis sobrecargas nos BVTs [Vizcaíno et al. 2012].

$$PC(W) = 1,25 \times TR(\text{Gb/s}) + 31,5 \quad (2)$$

A Tabela 1 também mostra as distâncias máximas necessárias para que as modulações obtenham uma taxa de transmissão com QoT aceitável na rede.

Tabela 1. Consumo Energético dos transmissores de banda variável (BVT) para diferentes formatos de modulação.

Formato de Modulação	Capacidade da Subportadora (Gb/s)	Consumo Energético (W)	Distância Máxima (km)
BPSK	12,5	47,13	8000
QPSK	25	62,75	4000
8QAM	37,5	78,38	2000
16QAM	50	94	1000
32QAM	62,5	109,63	500
64QAM	75	125,23	250

Semelhante à tecnologia de rede tradicional, o consumo energético dos comutadores ópticos de banda variável (BV-OXC) é dado em função do grau de conexão de cada nó N . Além disso, é adicionada uma sobrecarga de 150 W por nó como mostra a Equação 3.

$$PO(W) = N \times 85 + 150 \quad (3)$$

Em relação aos amplificadores ópticos (*Optical Line Amplifiers* - OLA) EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), são considerados 60 W por par de fibra óptica (30 W por fibra E). Além disso, é considerado mais 140 W adicionais por OLA como possível sobrecarga, como mostra a Equação 4.

$$PA(W) = E \times 30 + 140 \quad (4)$$

3. Trabalhos Relacionados

Recentemente, há um número crescente de trabalhos de pesquisa que investigam soluções para o problema de roteamento e atribuição de espectro em redes EON. Os problemas de alocação de espectro são investigados sob diversos cenários de rede com roteamento *single-hop* ou *multi-hop*, incluindo ainda considerações sobre a tecnologia de modulação e distância adaptativa do canal.

O problema RMLSA foi inicialmente apresentado em [Christodoulopoulos 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 em algoritmos RSA. Os autores propõem um esquema de modulação adaptativa, denominado *mAdap*, que interage através das possíveis modulações da rede, em ordem decrescente na quantidade de bits por símbolo, aplicando um algoritmo RSA até encontrar uma solução. Os resultados de simulação para este trabalho mostraram uma redução significativa no bloqueio e no uso do espectro.

Os autores em [Ye et al. 2014] propõem o primeiro algoritmo de modulação adaptativa com técnicas de agregação de tráfego. No algoritmo 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. Embora o algoritmo leve em consideração o uso da 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.

Até o momento, são poucos os trabalhos que consideram o uso do roteamento *multi-hop* e o cenário de modulação adaptativa em EON. Em [Costa and Drummond 2016a, Costa et al. 2016b], os autores apresentaram uma abordagem RMLSA *multi-hop* que procura usar técnicas de agregação de tráfego associado ao nível de modulação mais eficiente do ponto de vista espectral. Os resultados foram comparados com várias abordagens RSA utilizando o esquema *mAdap*.

Observando as vantagens do roteamento *multi-hop* com o uso de modulação adaptativa, os autores apresentam em [Costa and Drummond 2016b] uma análise preliminar do estudo proposto neste trabalho. Os resultados têm como foco a diminuição da taxa de bloqueio de banda e a redução do uso de espectro na rede. Conclui-se que é vantajosa a utilização do esquema proposto. Com o intuito de enfatizar mais as vantagens proporcionadas pelo esquema, este trabalho apresenta a avaliação de novas métricas em novos cenários de rede, mostrando que, além da redução na taxa de bloqueio de banda, o esquema ainda proporciona uma eficiência energética na rede.

4. Proposta de Trabalho

A proposta deste trabalho visa criar um esquema de modulação adaptativa, baseado no *mAdap*, para resolver o problema RMLSA. O esquema, denominado AMMS (*Adaptive Modulation Multi-hop Schema*), permite a utilização de qualquer abordagem RSA clássica para resolver o problema RMLSA. O AMMS tem como objetivo atribuir níveis de modulação adequados, associado a uma quantidade de saltos necessários para atender uma requisição de tráfego. Para atingir esse objetivo o AMMS caracteriza a rede em zonas de alcançabilidade.

O AMMS implementa as zonas de alcançabilidade através de gráficos auxiliares que representam o alcance relativo de cada nó para um nível de modulação específica. A partir da topologia física, o AMMS constrói topologias de modulação (off-line) cujas arestas representam a zona de alcançabilidade de cada nó. Cada aresta na determinada topologia de modulação é construída a partir do caminho mais curto entre os nós, satisfazendo o alcance do nível de modulação adotado para fornecer um QoS aceitável na rede.

A Figura 1 mostra as topologias virtuais de modulação para uma topologia física com 7 nós. Neste exemplo, os formatos de modulação BPSK e QPSK foram considerados permitindo alcances máximos de 8000 e 4000 km, respectivamente, de acordo com a Tabela 1. Pode-se observar que em cada topologia as arestas são construídas a partir dos alcances entre os nós. O peso da aresta representa a menor distância entre os nós (a soma das arestas que compõe a menor distância). Portanto, isso representa que cada par de nós ligados por uma aresta pode estabelecer um caminho óptico fim-a-fim no determinado nível de modulação. Por exemplo, considere um pedido de conexão do nó P1 para o nó P4, é possível atender a conexão com apenas um caminho óptico ($B1 \rightarrow B4$) no nível de modulação BPSK, no entanto são necessários no mínimo 2 caminhos ópticos ($Q1 \rightarrow Q2 \rightarrow Q4$) para atender a conexão no nível de modulação QPSK.

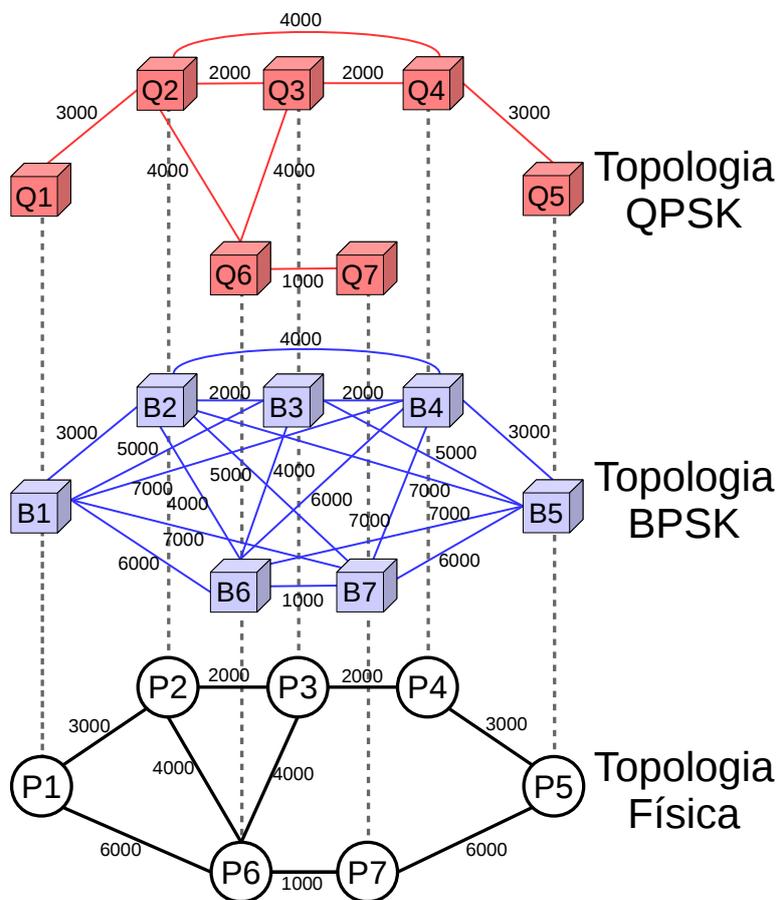


Figura 1. Exemplos de topologias virtuais de modulação para uma topologia com 7 nós. As distâncias dos enlaces são apresentadas em quilômetros.

A ideia geral é dividir a rota da requisição de tráfego em várias partes procurando sempre atender os níveis de modulação mais adequados a essa requisição. Para isso, o esquema é composto por uma estrutura de dados, computada off-line, formada a partir dos k -menores caminhos entre cada par de nós de cada topologia virtual de modulação. O AMMS contém uma rotina $\omega(s, d, k, m)$ que obtém o k -menor caminho entre os nós de origem e destino da requisição de tráfego (s e d), para a topologia virtual de modulação m . A rotina $\omega(s, d, k, m)$ retorna um caminho composto pelos nós de origem e destino, s e d , e, possivelmente, nós de articulação adicionais entre eles. Cada travessia em cada nó de articulação representa uma conversão OEO ou, em outras palavras, um salto na

topologia virtual. Conseqüentemente, a rotina ω retorna um caminho, em que o número de nós deste caminho, menos 1, representa o número de execuções de um algoritmo RSA necessárias para atender a demanda. Portanto, o AMMS permite resolver o problema RMLSA através de $n + 1$ execuções de qualquer algoritmo RSA, onde n é o número de nós de articulação definidos pela rotina ω .

Com o intuito de escolher um nível de modulação apropriado à demanda, um número específico de nós de articulação deve ser calculado, tendo em vista que muitos nós de articulação significam muitos saltos virtuais, o que poderá prejudicar a qualidade da solução. Para este fim, o AMMS define uma constante denominada *MHC* (*Multi-Hop Constraint*). O *MHC* é um mecanismo de controle que define o número apropriado de saltos virtuais que o esquema AMMS irá propor. Além disso, o *MHC* também impacta na escolha do nível de modulação apropriado para a solução RMLSA. Para definir o valor do *MHC* são considerados a topologia de rede e os níveis de modulação adotados na rede, como mostra a Equação 5.

$$MHC = \left\lceil \frac{dia \times 0,25}{Reach(maxM)} \right\rceil + 1 \quad (5)$$

onde “*dia*” é o diâmetro da rede e “*Reach(maxM)*” representa o alcance máximo do nível de modulação mais eficiente espectralmente na rede. Por último, a constante 0,25 foi empiricamente definida através de análises de simulação considerando várias topologias e cenários de rede¹.

Portanto, o *MHC* define um limite superior no número de nós de articulação. Mais especificamente, $MHC - 1$ representa o número máximo de saltos virtuais que o AMMS deve propor para que se possa aceitar uma requisição de tráfego. Se a rotina $\omega(s, d, k, m)$ retornar um caminho na topologia virtual de modulação com um número de nós maior que *MHC*, então o esquema irá ignorar este caminho para não oferecer uma solução com muito saltos na topologia virtual. O esquema AMMS pode ser visto na Figura 2.

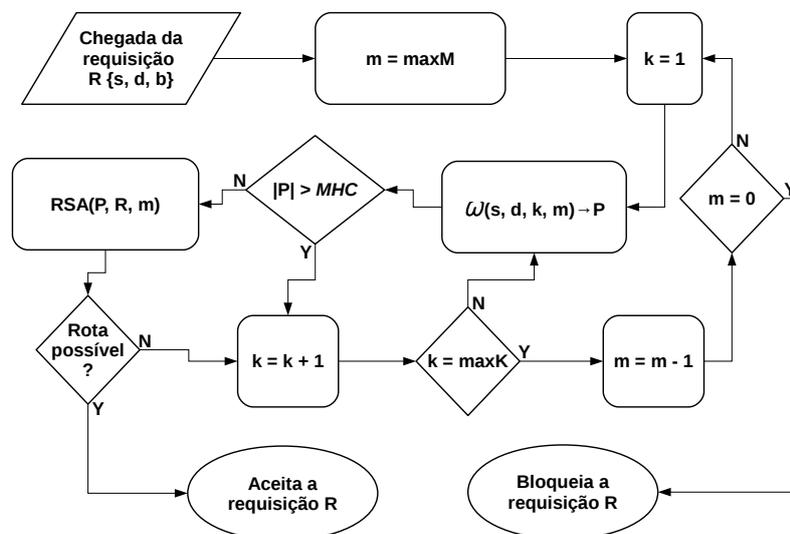


Figura 2. Esquema de modulação adaptativa AMMS.

¹Os resultados desta avaliação são extensos e portanto foram omitidos neste artigo.

A cada chegada de requisição $R\{s, d, b\}$, o esquema escolhe o nível de modulação mais espectralmente eficiente disponível na rede $R\{s, d, b\}$, em seguida, atribui $k = 1$ e executa a rotina $\omega(s, d, k, m)$, baseado no k -menor caminho e no nível de modulação m , definindo o caminho “ P ”. Em seguida, o algoritmo verifica se o número de nós em “ P ” é maior que “ MHC ”. Se não for, o caminho “ P ” é enviado para o algoritmo *RSA* para que ele possa resolver o problema RSA salto a salto em “ P ” com o nível de modulação “ m ”. Se o algoritmo *RSA* atribuir espectro para todos os sub-caminhos de “ P ”, então a requisição R é aceita na rede. Caso contrário, ou se $|P| > MHC$ (passo anterior), incrementa-se o valor de k . O próximo passo verifica se $k = \max K$, se não for, a rotina $\omega(s, d, k, m)$ é executada novamente com um novo valor de k , caso contrário decrementa-se m , atribui $k = 1$ e executa-se os passos anteriores novamente. Este laço é executado até $m = 0$, em caso de insucesso, bloqueia-se a requisição.

A complexidade de tempo da fase off-line do esquema AMMS é analisada como segue. Para construção das topologias de modulação tem-se $|V|^2$ execuções do algoritmo de Dijkstra para cada par de nós. Logo a complexidade de tempo é dada como $O(|V|^2 * (|E| + |V|\log|V|))$, onde E é o conjunto de enlaces e V é o conjunto de nós da rede. Para formar a estrutura de dados que armazena os k -menores caminhos entre cada par de nós em cada topologia virtual de modulação, o algoritmo de Yen [Yen 1971] é utilizado. Dessa forma, a complexidade de tempo final da fase off-line é dada como $O(m * |V|^2 * (k * |V|(E + |V|\log V)))$. A complexidade de tempo da fase on-line do esquema AMMS é baseada na quantidade de execuções do algoritmo *RSA* considerado. A rotina $\omega(s, d, k, m)$ pode ser executada até $\max K * \max M$ vezes e cada execução fornece até V execuções do algoritmo *RSA* adotado. Logo, a complexidade de tempo do esquema AMMS é dado como $O(V * \max K * \max M)$ multiplicado pela complexidade do algoritmo *RSA* adotado. É importante observar que $\max K$ e $\max M$ são, na prática, constantes de valor baixo.

5. Avaliação de Desempenho

As simulações foram realizadas com o objetivo de avaliar o desempenho do esquema AMMS proposto em comparação ao esquema *mAdap*. Para ambos os esquemas de modulação foram comparados quatro algoritmos *RSA*, são eles: KSP, MSP e SPV, utilizando agregação elétrica e o FPA, utilizando agregação elétrica e óptica. Todos os algoritmos possuem o roteamento *single-hop*.

Os algoritmos KSP, MSP e SPV são referenciados em [Wan et al. 2012]. O KSP é o algoritmo de alocação de espectro clássico baseado no roteamento de k -menores caminhos. O MSP é baseado no algoritmo de Dijkstra com incorporação de métodos de alocação de espectro no seu processo. O SPV consiste em um algoritmo de busca e construção de uma árvore para encontrar o menor caminho com espectro disponível para atender à demanda. O FPA foi proposto em [Khodashenas et al. 2013] e utiliza caminhos disjuntos para realizar agregação de tráfego e k -menores caminhos para estabelecer um novo caminho óptico. Para todos os algoritmos, foi considerado $k = 3$ e a política de alocação de espectro First Fit (FF).

5.1. Cenário e Parâmetros Adotados

Foram realizadas simulações usando o simulador de redes ONS [Costa et al. 2016a]. 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 6 níveis de granularidade: 25 Gb/s, 50 Gb/s, 100 Gb/s, 200 Gb/s, 300 Gb/s e 400 Gb/s com as proporções 6:5:4:3:2:1, respectivamente. 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 bidirecionais. A Figura 3 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 320 *slots*. Assume-se uma banda de guarda de 2 *slots*. Cada nó na topologia é equipado com transmissores e receptores suficientes sendo cada transmissor capaz de transmitir até 32 *slots*. As modulações consideradas são BPSK, QPSK, 8QAM e 16QAM com 1, 2, 3 e 4 bits por símbolo e, considerando eventuais regeneradores de sinal, calculam-se as distâncias máximas como 8000, 4000, 2000 e 1000 km, respectivamente.

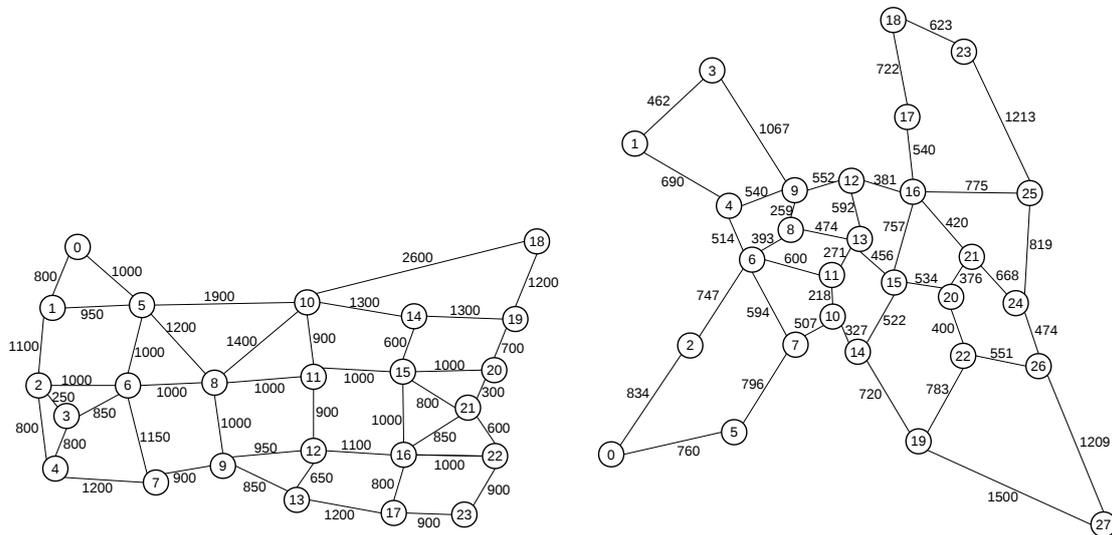


Figura 3. Topologia USANet e PanEuro.

5.2. Resultados Numéricos

As métricas que se referem à utilização de recursos são avaliadas para demonstrar os ganhos relativos aos mecanismos implementados. Além disso, soluções de engenharia de tráfego que levam à redução na utilização dos recursos instalados na rede, auxiliam na diminuição de sua probabilidade de exaustão. As seguintes métricas são avaliadas para todos os algoritmos em ambos os esquemas de modulação adaptativa: Taxa de bloqueio de banda (BBR); média de saltos na topologia virtual por requisição; média da taxa de espectro disponível; taxa média de fragmentação externa; taxa média de consumo de energia; e taxa média do uso de modulação.

Taxa de bloqueio de banda (BBR)

O BBR (Figura 4) mostra a taxa do bloqueio de banda na rede, quanto maior for o BBR, maior será a banda bloqueada na rede e pior o desempenho do algoritmo. Observa-se que em ambas as topologias o desempenho de todos os algoritmos sob o esquema AMMS obteve uma melhora significativa em relação ao esquema de modulação *mAdap*, em média 82% para a USANet e 63% para a PanEuro, para todos os algoritmos RSA compara-

dos. Nota-se que a estratégia tomada pelo esquema *AMMS*, de controle de modulação associado ao controle do número de saltos na topologia virtual, traz aos algoritmos mais possibilidades para atender as demandas, tendo em vista ainda que os requisitos de continuidade de rota são aliviados com o uso dessa estratégia.

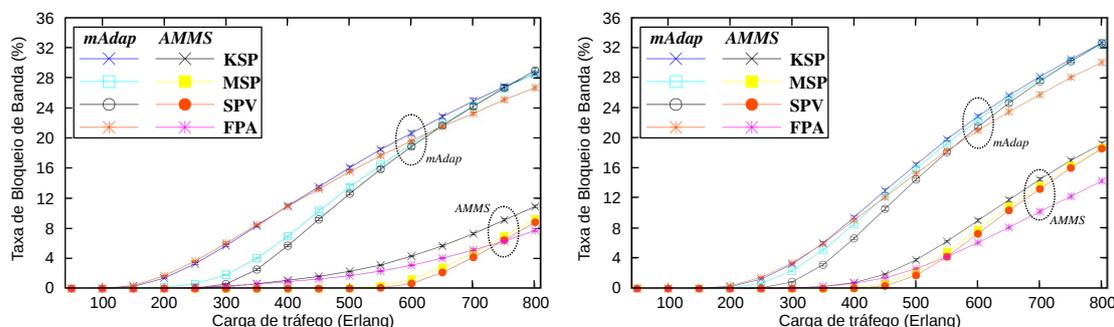


Figura 4. Taxa de bloqueio de banda (BBR). Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Média de saltos na topologia virtual por requisição

O número de saltos na topologia virtual (Figura 5) indica o número de conversões OEO e processamento elétrico que são utilizados na rede. Os algoritmos KSP, MSP, SPV e FPA sob o esquema de modulação adaptativa *mAdap* mantêm em todas as cargas de tráfego uma média igual a 1, uma vez que esses algoritmos são *singlehop*. Observa-se que os algoritmos sob o esquema de modulação adaptativa *AMMS* apresentam médias 1,75, em ambas as topologias mesmo com o aumento da carga. Estes resultados evidenciam a capacidade do *AMMS* de assegurar uma solução com poucos saltos virtuais, evitando o atendimento das requisições de tráfego com um número excessivo de conversões OEO. Isso atesta a eficácia do *MHC*, que limita o uso do roteamento multi-hop contribuindo para diminuição da latência total da rede.

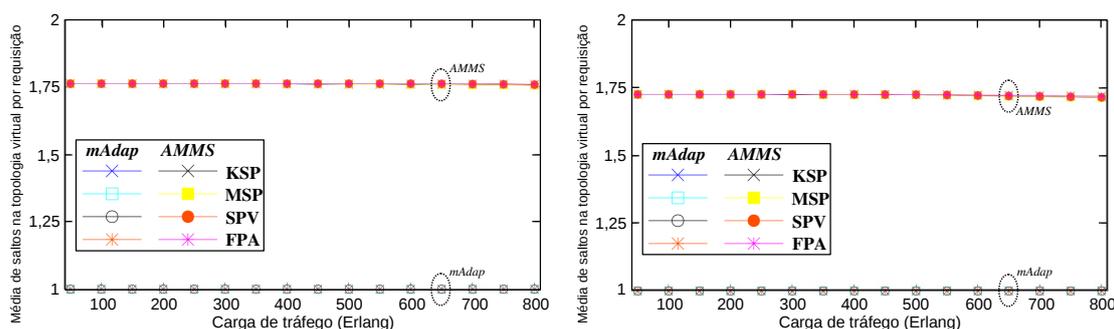


Figura 5. Média de saltos na topologia virtual por requisição. Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Taxa média de espectro disponível

A taxa de espectro disponível (Figura 6) mostra os recursos de espectro utilizados em toda a rede, quanto maior a taxa, mais espectro disponível existe na rede, ou seja, *slots* livres. Todos os algoritmos apresentaram um uso de espectro semelhante em ambos os esquemas de modulação adaptativa, *AMMS* e *mAdap*, concentrando seu uso em cerca de um terço do total de espectro disponível em toda a rede. Para cargas mais baixas

o AMMS apresentou um leve ganho, cerca de 6,22% para a USANet e 4,14% para a PanEuro. Isso se deve a característica do esquema AMMS, que procura utilizar os níveis de modulação mais espectralmente eficientes da rede e, por sua vez, provocando uma maior economia no uso do espectro. Com o aumento da carga, o uso do espectro aproxima do esquema *mAdap*. Isto acontece pois, devido a limitação de recursos, o AMMS procura criar mais caminhos ópticos na rede aumentando o k . Entretanto observa-se que essa característica não afeta negativamente o desempenho do esquema, tendo em vista que, com mais caminhos ópticos alocados na rede, aumenta-se a oportunidade da utilização de agregação de tráfego na rede.

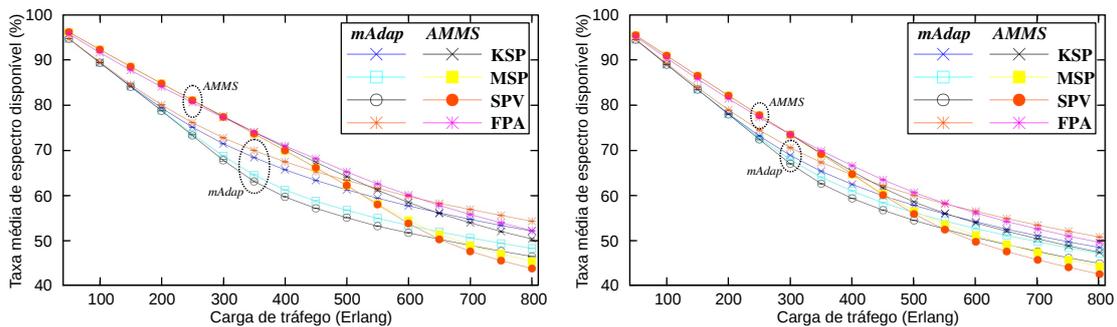


Figura 6. Taxa média de espectro disponível. Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Taxa média de Fragmentação Externa

A taxa média de fragmentação externa (Figura 7) mede o nível de fragmentação externa médio de todos os enlaces da rede durante o tempo de simulação, de acordo com a Equação 1. Níveis elevados representam uma rede com espectro fragmentado e consequentemente provocando uma baixa utilização de recursos de espectro. Observa-se que em ambas as topologias a taxa de fragmentação dos algoritmos sob o esquema AMMS é menor que *mAdap*, apresentando ganhos de cerca de 19% para a USANet e 13% para a PanEuro, para todos os algoritmos RSA. Isso significa que as estratégias tomadas pelo AMMS faz com que os algoritmos RSA fragmentem menos a rede. Isso se deve ao fato do AMMS utilizar níveis de modulação robustos, que carregam mais *bits* por símbolo, e por sua vez formam canais menores com alta capacidade. Canais mais estreitos impactam menos a fragmentação do espectro.

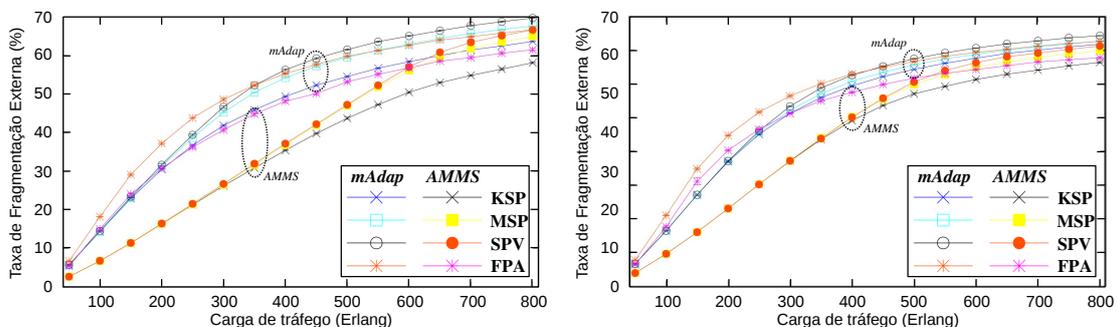


Figura 7. Taxa média de fragmentação externa. Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Taxa média de Consumo de Energia

A taxa média de consumo de energia (Figura 8) mostra a razão entre o gasto total de energia e a quantidade de caminhos ópticos alocados na rede. O modelo energético adotado nos cálculos foi o apresentado na Seção 2.1. É necessário destacar que esta métrica não representa o gasto energético total da rede, mas o gasto médio por caminho óptico alocado. Tendo em vista que o AMMS aloca mais caminhos ópticos que o *mAdap*, pois implementa o roteamento *multi-hop*, observa-se que os caminhos ópticos são mais eficientes e melhores aproveitados energeticamente no esquema AMMS, em média 34% na USANet e 30% na PanEuro.

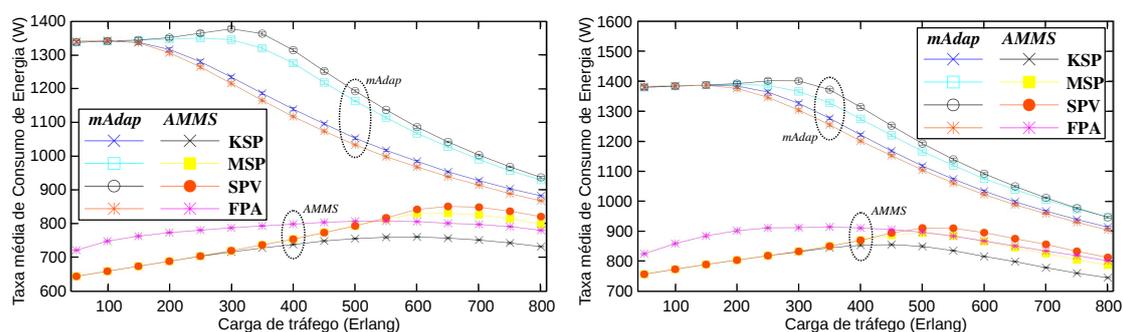


Figura 8. Taxa média de consumo de energia. Topologias USANet e PanEuro, respectivamente

Taxa média do uso de modulação

A taxa média do uso de modulação mostra o percentual de caminhos ópticos alocados em toda a simulação para cada nível de modulação. As Tabelas 2 e 3 mostram 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 diversas cargas de trabalho, com desvios médios inferiores a 1, 2. Os resultados mostram que, em geral, o esquema de modulação adaptativa AMMS faz com que os algoritmos possam aproveitar ainda mais o uso do nível de modulação mais eficiente espectralmente da rede.

O algoritmo FPA sob o esquema AMMS elevou o uso da modulação 8QAM em média cerca de 80%. Para o nível de modulação 16QAM esse aumento foi ainda maior em comparação ao esquema *mAdap*, cerca de 77% para a topologia USANet e 140% para a topologia PanEuro. Observa-se que o AMMS nem sempre usa o melhor nível de modulação da rede. Isso ocorre, pois o esquema enfrenta o compromisso de equilibrar o uso dos formatos de modulação mais espectralmente eficientes e a limitação na quantidade de saltos virtuais necessários para atender a requisição de tráfego.

6. Conclusão

Este trabalho estudou o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA). Foi proposta uma técnica para solucionar o problema RMLSA através do uso de um esquema de modulação adaptativa que permite a utilização de qualquer abordagem RSA clássica para resolver o problema RMLSA. O esquema AMMS proposto, procura atribuir níveis de modulação adequados, associado a uma quantidade de saltos necessários para atender uma requisição de tráfego. Dessa forma, o AMMS

Tabela 2. Taxa média do uso de modulação para a topologia USANet (%).

	Modulation	KSP	MSP	SPV	FPA
<i>mAdap</i>	<i>BPSK</i>	23,45	24,88	25,62	23,08
	<i>QPSK</i>	42,34	41,39	40,99	41,22
	<i>8QAM</i>	21,72	21,40	21,17	22,98
	<i>16QAM</i>	12,49	12,33	12,22	12,72
AMMS	<i>BPSK</i>	0,11	0,14	0,01	0,04
	<i>QPSK</i>	35,90	36,41	36,60	36,26
	<i>8QAM</i>	41,33	41,01	41,00	41,21
	<i>16QAM</i>	22,66	22,44	22,39	22,49

Tabela 3. Taxa média do uso de modulação para a topologia PanEuro (%).

	Modulation	KSP	MSP	SPV	FPA
<i>mAdap</i>	<i>BPSK</i>	2,74	3,16	3,45	2,66
	<i>QPSK</i>	42,58	42,34	42,85	41,40
	<i>8QAM</i>	36,05	35,86	35,32	37,25
	<i>16QAM</i>	18,63	18,65	18,38	18,70
AMMS	<i>BPSK</i>	0,01	0,02	0,01	0,01
	<i>QPSK</i>	5,15	5,23	5,01	5,08
	<i>8QAM</i>	50,07	50,11	50,28	50,33
	<i>16QAM</i>	44,78	44,64	44,71	44,58

promove o roteamento da requisição através de múltiplos saltos na topologia virtual suavizando as restrições de continuidade de espectro e distância de transmissão, viabilizando o uso de níveis de modulação mais elevados, ao mesmo tempo que permite um melhor aproveitamento dos recursos de espectro na rede.

Para demonstrar a eficiência do esquema de modulação adaptativa proposto, foram comparados quatro algoritmos da literatura sob os esquema de modulação adaptativa *mAdap* de [Wan et al. 2012] e AMMS em duas topologias de rede. Os resultados mostraram que o esquema de modulação adaptativa proposto proporciona um ganho de até 82% na taxa de bloqueio de banda utilizando até 6,22% menos espectro na rede. Observa-se que o AMMS ainda proporciona uma eficiência energética de até 34% em comparação com abordagens da literatura.

Referências

- Chatterjee, B., Sarma, N., and Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(3):1776–1800.
- 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.
- Costa, L. and Drummond, A. (2016a). Novo Algoritmo RMLSA com Roteamento Multihop em Redes ópticas Elásticas. In *SBRC 2016*, Salvador, Bahia.
- Costa, L. R., de Sousa, L. S., de Oliveira, F. R., da Silva, K. A., Júnior, P. J. S., and Drummond, A. C. (2016a). ONS: Optical Network Simulator - WDM/EON. <http://comnet.unb.br/br/grupos/get/ons>.
- Costa, L. R. and Drummond, A. C. (2016b). New distance-adaptive modulation scheme for elastic optical networks. *IEEE Communications Letters*, PP(99):1–1.

- Costa, L. R., Ramos, G. N., and Drummond, A. C. (2016b). Leveraging adaptive modulation with multi-hop routing in elastic optical networks. *Computer Networks*, 105:124 – 137.
- Horota, A. K., Figueiredo, G. B., and da Fonseca, N. L. S. (2014). Algoritmo de roteamento e atribuição de espectro com minimização de fragmentação em redes Ópticas elásticas. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 32:895–908.
- 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.
- Nag, A., Tornatore, M., and Mukherjee, B. (2010). Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4):466–475.
- 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.
- Vizcaíno, J. L., Ye, Y., and Monroy, I. T. (2012). Energy efficiency analysis for dynamic routing in optical transport networks. In *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 3009–3014.
- 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.
- 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.
- Yen, J. Y. (1971). Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, 17(11):712–716.
- 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, 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.