

Roteamento e Alocação de Recursos para Internet de Nova Geração

Edson Rodrigues¹, Helder Oliveira¹

¹Universidade Federal do Pará (UFPA)
Rua Augusto Corrêa 01, 66075-110 – Belém – PA – Brasil

edson.rodriques@itec.ufpa.br, heldermay@ufpa.br

Abstract. *The current core of the network needs increments to provide a service of high capacity, performance, and reliability. To avoid network strain, the expansion of capacity can be provided by implementing Space-Division Elastic Optical networks. However, resource management on these networks is still an open issue. This paper summarizes the scientific initiation work's contributions, which proposes four routing algorithms and resource allocation for the new generation Internet. The proposed algorithms will allow routing and allocation in networks that will carry a much larger volume of traffic than those of current optical networks.*

Resumo. *O núcleo atual da rede precisa de incrementos para fornecer um serviço de alta capacidade, performance e confiabilidade. Como forma de evitar a extenuação da rede, a ampliação da capacidade pode ser provida por meio da implementação das Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial. No entanto, a gestão de recursos nessas redes ainda é um problema em aberto. Neste artigo, resumem-se as contribuições do trabalho de iniciação científica, que propõe quatro algoritmos de roteamento e alocação de recursos para Internet de nova geração. Os algoritmos propostos permitirão a provisão de roteamento e alocação em redes que transportarão um volume de dados muito maior do que os das redes ópticas atuais.*

1. Introdução

O aumento do número de dispositivos conectados e a difusão de aplicações em rede impacta na quantidade de dados que trafegam na internet. Há a previsão que em um futuro próximo a rede atual não seja capaz de suprir as demandas heterogêneas que existem atualmente. Além da expansão da capacidade da rede, há a preocupação em como utilizar os recursos da melhor forma. Nesse contexto, surgem as Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial *Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks – SDM-EONs* [Oliveira and da Fonseca 2019]. Esse modelo de rede tem como vantagem a combinação de duas estratégias que permitem o suporte às futuras demandas. As Redes Ópticas Elásticas possuem características essenciais para garantir eficiência na utilização do espectro. A divisão do espectro em pequenos *slots* de frequência facilitam a adequação às demandas heterogêneas da rede. Aliado a isso, a Multiplexação por Divisão Espacial contribui substancialmente na ampliação da capacidade total da rede por meio da utilização de fibras multinúcleo.

A expansão da quantidade de recursos e a flexibilidade na alocação deles trazem novos desafios, dentre eles o aumento da complexidade na escolha do roteamento, causado pela adição de núcleos e as restrições de continuidade e contiguidade. Enquanto a contiguidade, refere-se aos *slots* de frequência para uma mesma requisição que devem ser sequenciais, a continuidade afirma que os *slots* devem ocupar o mesmo núcleo durante todo o percurso da transmissão a fim de evitar a comutação de núcleo e a conversão do meio óptico para o elétrico [Brasileiro et al. 2019]. Além disso, para potencializar a eficiência na transmissão, modulações adaptativas podem ser aplicadas. Diversos formatos de modulações são utilizados para aumentar a taxa de transmissão por meio do ganho no número de bits por símbolo que uma modulação pode carregar, no entanto, a atenuação do sinal pela distância e interferências externas tornam a escolha da modulação uma decisão difícil, dando origem ao problema de Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro e Núcleo (*Routing, Modulation Spectrum, and Core Assignment – RMSCA*).

Alocar requisições quando a carga da rede é alta pode ser um desafio, visto que os recursos disponíveis podem não ser suficientes, devido o alto número de alocações na rede. Esse processo dá origem ao problema da fragmentação que, após sucessivas conexões e desconexões, cria pequenos espaços que não coincidem com as demandas da rede [Xiong et al. 2020]. Para evitar a subutilização desses *slots*, a estratégia de alocação em multicaminho pode ser adotada, dividindo a conexão em dois caminhos com demanda distribuída entre eles, possibilitando alocar em espaços menores. Para essas conexões, existe o problema do atraso diferencial, que surge a partir da diferença no tempo de chegada ao destino entre os caminhos da transmissão. Para que o multicaminho seja praticado, a diferença de tempo de chegada entre os caminhos deve estar dentro do limite aceitável.

Este artigo resume os resultados alcançados no trabalho de iniciação científica (TIC) desenvolvido pelos autores. O trabalho investiga o problema de RMSCA com diferentes mecanismos de roteamento e gerenciamento do espectro. Os resultados alcançados demonstram que as propostas possuem melhores resultados que algoritmos propostos na literatura. Foram propostos e avaliados quatro novos algoritmos para o roteamento e alocação de recursos em SDM-EON, a saber:

- Um novo algoritmo RMSCA chamado TOURISM (**R**outing **M**odulation **S**pectrum and **C**ore **M**apping **S**cheme in SDM-EON), que mapeia o espectro da rede e encontra a rota com o melhor conjunto de recursos para as demandas, com aumento na taxa de aceitação de requisições.
- Um novo algoritmo RMSCA chamado PANORAMIC (**H**ybrid **R**outing, **M**odulation, **S**pectrum **and** **C**ore **A**llocation based on the **M**apping **S**cheme in SDM-EONs), que emprega a estratégia de multicaminho para potencializar o número de conexões estabelecidas na rede e reduzir a taxa de fragmentação por meio da utilização de recursos ociosos.
- Um novo algoritmo RMSCA chamado REGARD (**R**oteamento e **A**locação de **N**úcleo e **E**spectro com **C**iência de **F**ragmentação e **C**rosstalk em SDM-EON), que utiliza a ciência de *crosstalk* e fragmentação nos enlaces para selecionar a melhor rota com recursos disponíveis, mantendo tanto *crosstalk* quanto fragmentação em níveis adequados.
- Um novo algoritmo RMSCA chamado RUPERT (**R**outing **M**odulation **S**pectrum and **C**ore **F**ragmentation **A**ware) que emprega o mapeamento de espectro com

análise do estado dos enlaces antes de buscar o caminho óptico. Fazem parte das considerações do algoritmo o *crossstalk* e a fragmentação para seleção do caminho menos impactante em outras conexões.

As contribuições do trabalho avançam o estado da arte no projeto de EON-SDM e em roteamento de redes ópticas. A relevância dessas contribuições é, portanto, possibilitar a evolução da tecnologia de EON-SDM, o que permitirá o aumento ainda maior da capacidade de transmissão da Internet e dotar a Internet de robustez, permitindo novas aplicações com grandes demandas de banda passante.

Este trabalho está organizado como o descrito a seguir. A Seção 2 descreve alguns trabalhos relacionados em SDM-EONs. A Seção 3 apresenta o modelo de rede utilizado nas simulações e os dois algoritmos propostos. A Seção 4 apresenta os resultados de performance dos algoritmos propostos comparados a outros da literatura. A Seção 5 apresenta a conclusão do trabalho e trabalhos futuros. Por fim, a Seção 6 sumariza os trabalhos publicados durante o desenvolvimento do TIC.

2. Trabalhos Relacionados

O surgimento das SDM-EON motivou inúmeros trabalhos para solucionarem o problema RSCA, no entanto, somente recentemente passaram a considerar modulação adaptativa e poucos desses trabalhos combinam outras estratégias para melhorar alocação de recursos em SDM-EON.

Os autores [Moura and Da Fonseca 2018] propuseram quatro algoritmos RMSCA baseados em uma abordagem de processamento de imagem. Foram utilizados dois algoritmos de processamento de imagens para reduzir a complexidade computacional. O algoritmo apresentado combinou as estratégias de processamento de imagem com a política de melhor ajuste para reduzir o desperdício de espectro. As modulações foram aplicadas com base na estimativa de distância da transmissão e *crossstalk*. Também foram utilizadas políticas de alocação. No artigo não são empregadas técnicas de fragmentação e nem roteamento multicaminho.

Os autores [Yin et al. 2019] introduziram um algoritmo para sobrevivência em SDM-EONs com ciência de *crossstalk* e estratégias de roteamento multicaminho. Foi utilizada a abordagem de super-canais, utilizando economia de custo por meio da redução do número de *slots* de lasers necessários. Para encontrar o caminho foi utilizado o algoritmo de caminhos disjuntos de Bhandari de forma prévia. Em seguida, para que a conexão seja estabelecida, a *crossstalk* é verificado e, caso o nível não seja aceitável, a conexão é negada. Os autores não consideraram atraso diferencial, métricas de fragmentação e modulação adaptativa.

Os autores [Yousefi et al. 2020] introduziram duas métricas: tempo de retenção e coeficiente da métrica variante. Baseado nessas métricas, eles propuseram três algoritmos para resolver o problema de fragmentação e reduzir a probabilidade de bloqueio de banda para o problema RSCA. Os algoritmos utilizam o desperdício de espectro para encontrar áreas retangulares no espectro para alocar cada conexão por meio do algoritmo de k menores caminhos, considerando a fragmentação para redução da taxa de fragmentação. Modulação adaptativa, técnicas de fragmentação e multicaminho não foram utilizados nos algoritmos propostos.

Os autores [Ujjwal et al. 2021] propuseram um esquema de desfragmentação ótimo que dividi as conexões com o intuito de diminuir a fragmentação e aumentar o número de transmissões na rede. O caminho é encontrado por meio do algoritmo de k menores caminhos e a política de alocação *FirstFit* (FF). Para conexões que não conseguem ser estabelecidas nesse modelo, é utilizado o esquema de desfragmentação. A multiplexação por divisão espacial não é considerada nesse trabalho e somente uma modulação é utilizada para as transmissões.

Os trabalhos presentes na literatura abordam o roteamento em SDM-EONs, adotando ciência de crosstalk e fragmentação, modulação adaptativa e roteamento multicaminho, no entanto, poucos trabalhos agrupam essas estratégias em um algoritmo.

3. Algoritmos Desenvolvidos

Esta seção apresenta quatro algoritmos de roteamento e alocação de recursos em SDM-EON chamados TOURISM, PANORAMIC, REGARD e RUPERT. Os algoritmos lidam com o problema RMSCA, com ênfase no aumento do número de conexões estabelecidas na rede, com considerações para problemas característicos desse tipo de rede como a fragmentação e o *crosstalk* entre núcleos.

3.1. Modelo de Rede

Foi adotado um modelo de rede óptica com utilização de multiplexadores ópticos reconfiguráveis flexíveis add/drop capaz de alternar entre comprimentos de onda e granularidade com transceptores de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*Multiple-Input Multiple-Output – MIMO*). Também foi considerada a utilização de Transponders Multi-fluxos (*Multi-Flow Transponders – MFTs*) para dividir em diversos sub transceptores para facilitar a alocação.

A topologia de rede é composta por fibras bidirecionais com sete núcleos dispostos de forma hexagonal. Cada núcleo é composto por 320 *slots* de frequência com capacidade de transmissão de 12,5 Gbps cada. Foram utilizados os valores reais em quilômetros para as distâncias entre os pontos da topologia. Foram mantidas as restrições de continuidade e contiguidade, não sendo permitida a troca de *slots* e núcleos durante todos os enlaces do percurso. A modulação aplicada é associada à distância de transmissão. Além disso, o *slot* Filtro de Banda de Guarda (*Filter Guard Band – FGB*) é sempre alocado para manter a separação entre o conjunto de *slots* de transmissões distintas.

3.2. Mapeamento

Para os algoritmos TOURISM, PANORAMIC e RUPERT foi adotado o mecanismo de mapeamento de espectro. Neste mecanismo os *slots* são mapeado em uma matriz binária que sinaliza a disponibilidade do *slot* de frequência entre dois enlaces que compõem a rede. Um conjunto de *slots* do tamanho da demanda é verificado e é representado na matriz de mapeamento como um único *slots* sinalizando o estado do conjunto, ou seja, se é capaz de alocar a requisição ou não. Para o caso onde o conjunto de *slots* é suficiente para a demanda, o resultado do *slot* correspondente na matriz de mapeamento é verdadeiro; para o caso onde o conjunto de *slots* não é suficiente para a demanda, o *slot* correspondente na matriz de mapeamento é falso. Ao final do processo, a matriz de mapeamento é retornada como resultado do algoritmo de mapeamento.

O mapeamento está representado na Figura 1. O conjunto de *slots* circulado pela linha vermelha é representado na matriz de mapeamento como disponível, visto que o conjunto todo pode alocar a requisição. Enquanto que o conjunto marcado de azul não tem todos os *slots* disponíveis, dessa forma, o resultado na matriz de mapeamento é de indisponível. O conjunto de *slots* marcados em verde está totalmente indisponível, resultando na matriz de mapeamento como falso.

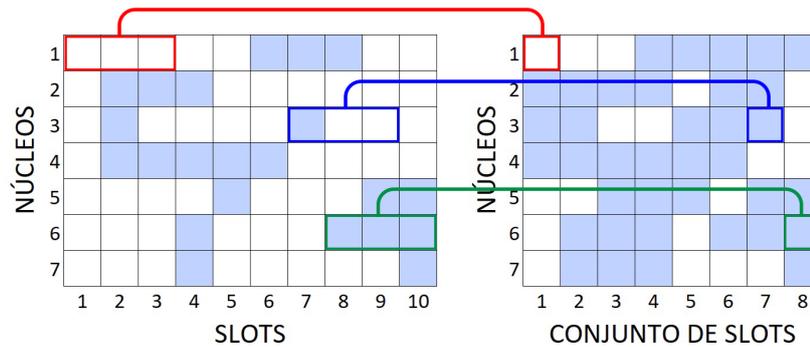


Figura 1. Espectro do enlace da Matriz de Mapeamento.

3.3. Algoritmo TOURISM

O TOURISM é um algoritmo RMSCA que adota a estratégia do mapeamento para encontrar as melhores rotas com recursos adequados para o estabelecimento de conexões na rede, reduzindo assim o número de requisições bloqueadas, bem como melhora a utilização de recursos [Rodrigues et al. 2020b].

O algoritmo TOURISM recebe o tráfego da rede como entrada e retorna o caminho óptico para a requisição. Inicialmente, o algoritmo é performado para cada uma das modulações consideradas em cada etapa. Em seguida, o número de *slots* necessários para a transmissão é calculado, com base na demanda e na taxa de bits por símbolo da modulação aplicada. Em seguida, o algoritmo de mapeamento é chamado e o espectro da rede é mapeado em matrizes binárias que armazenam grafos para cada um dos *slots*. Entre os grafos resultantes, é buscado um caminho óptico adequado para alocar a requisição. Caso o caminho seja encontrado, a requisição é então aceita na rede, no entanto, caso nenhum caminho tenha sido encontrado, o processo é feito novamente para outra modulação. Ao final, se todas as modulações foram testadas e nenhum caminho foi encontrado, a requisição é então bloqueada, finalizando a ação do algoritmo.

3.4. Algoritmo PANORAMIC

O PANORAMIC é um algoritmo RMSCA executado em SDM-EONs, para diferentes cargas, cenários e topologias [Rodrigues et al. 2020a]. O objetivo do algoritmo é aumentar o número de conexões estabelecidas na rede e melhorar o uso de espectro, evitando o desperdício de *slots* de frequência. Para atingir tal objetivo, são adotadas as estratégias de mapeamento de espectro e multicaminho para requisições não satisfeitas em caminho único. O algoritmo não faz a comutação de núcleo, mantendo as restrições de continuidade e contiguidade.

O conjunto de requisições serve de entrada para o algoritmo, com informações de origem, destino e largura de banda, em seguida, o processo de roteamento é iniciado. O

algoritmo PANORAMIC adota a estratégia de roteamento em multicaminho como alternativa para os casos onde o caminho único não pode ser alocado. Primeiramente, uma das modulações é escolhida para a tentativa de roteamento, o número de *slots* é calculado com base nessa escolha e, após isso, o algoritmo de mapeamento é executado. O espectro da rede é mapeado em matrizes binárias e armazenado em grafos para cada *slot*, que são retornados como resultado do algoritmo de mapeamento. O caminho é buscado nesses grafos para que a conexão seja estabelecida. Caso um caminho seja encontrado, a requisição é aceita na rede e os recursos são alocados, caso contrário, um processo semelhante é tomado para o roteamento em multicaminho, com *slots* sendo calculados com base na modulação. Para o roteamento em multicaminho, a restrição de delay diferencial é considerada, onde a diferença entre os caminhos deve respeitar o limite de 15ms ou 3000km. Ao final, se o caminho não foi encontrado utilizando caminho único nem multicaminho, a requisição é de fato bloqueada.

3.5. Algoritmo REGARD

O REGARD é um algoritmo RMSCA para SDM-EONs, executado sob diferentes cargas, cenários e topologias. O algoritmo define rotas de maneira *offline* e utiliza estimativas de *crossstalk* e fragmentação para definir o melhor conjunto de recursos alocáveis para as requisições.

O conjunto de requisições serve de entrada para o algoritmo. Os caminhos de um nó a outro da rede são calculados previamente utilizando o algoritmo de K menores caminhos e os caminhos são ordenados pela distância total. Quando uma requisição chega, a origem e o destino são recuperados e o conjunto de caminhos entre esses pontos é verificado. A modulação é selecionada de acordo com a distância da transmissão e o número de *slots* é calculado. É verificado o nível de fragmentação e *crossstalk* para cada um dos núcleos, e a região que pode ser alocada e com menor impacto em outras transmissões é selecionada. O processo é repetido por todos os k caminhos encontrados. Caso o caminho seja encontrado, a requisição é aceita, senão a requisição é bloqueada.

3.6. Algoritmo RUPERT

O RUPERT é um algoritmo RMSCA para SDM-EONs sob diferentes cargas, cenários e topologias. O algoritmo alia o mapeamento à utilização de estimativas de *crossstalk* e fragmentação para definir o melhor caminho para a transmissão.

O algoritmo performa para cada uma das modulações o mapeamento. O número de *slots* é calculado com base na escolha da modulação e o mapeamento armazena as matrizes binárias em grafos que serão utilizados para a busca de caminhos disponíveis. Além de verificar os recursos da rede, o cálculo de fragmentação e *crossstalk* são essenciais na escolha do melhor caminho para a requisição, sendo selecionado o núcleo que menos afeta outras requisições existente entre núcleos adjacentes. Esse processo se repete para todas as modulações. Caso o algoritmo não encontre caminho para a requisição para todas as modulações ou o nível de *crossstalk* seja ultrapassado, a requisição é bloqueada.

4. Avaliação

Nesta seção, são apresentados os principais resultados para os algoritmos propostos e esses são comparados a outros trabalhos da literatura que performam proposta semelhante com parâmetros e cenários comparáveis.

4.1. Parâmetros de Simulação

Para análise de performance dos algoritmos, simulações foram empregadas com a utilização do simulador de eventos discretos Flexgridsim [Moura and Drummond]. Requisições seguiram o processo de Poisson e foram distribuídas uniformemente entre os nós da rede. Foram produzidas 10 replicações para cada cenário. Nos gráficos apresentados a carga da rede variou em 50 erlangs. Além disso, foram geradas 100.000 requisições para cada uma das simulações, com intervalo de confiança de 95%. As simulações utilizaram o mesmo conjunto de sementes para os algoritmos. Foram empregadas sete tipos de requisições com 25/50/125/200/500/750/1000 Gbps. A fibra utilizada é composta de sete núcleos arranjados de forma hexagonal, com cada núcleo dividido em 320 slots de frequência. As topologias utilizadas foram a USA e NSF (Figura 2). A topologia USA tem 24 nós e 43 enlaces, enquanto a NSF tem 14 nós e 19 enlaces. O número representa a distância em quilômetros.

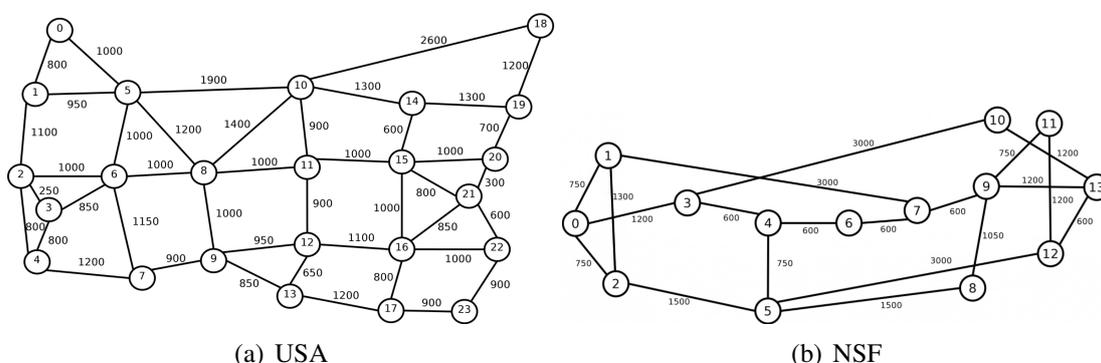


Figura 2. Topologias USA e NSF.

Devido as restrições de espaço, apenas a métrica BBR é apresentada. No entanto, diversas métricas foram utilizadas na avaliação, isto é, Taxa de Bloqueio de Banda (BBR), *Crosstalk* por Slot (CpS), Eficiência Energética (EE), Taxa de Fragmentação (FR) e Porcentagem de Formatos de Modulação (MFP),

O *BBR* é calculado pela soma de toda banda bloqueada (α) durante o período de simulação, dividido pela soma de toda banda das requisições (β) pelo mesmo período de tempo. O *BBR* é definido pela equação (1).

$$BBR = \frac{\sum \alpha}{\sum \beta} \quad (1)$$

4.2. Resultados da Simulação

Nesta seção mostra-se os resultados dos algoritmos para a taxa de bloqueio de largura de banda, que representa a principal métrica de desempenho em uma rede. Apresentamos e discutimos os resultados correspondentes aos algoritmos TOURISM, PANORAMIC, REGARD e RUPERT para as topologias de rede NSF e USA. Os três últimos algoritmos são comparados entre si por possuírem parâmetros de simulação parecidos, enquanto TOURISM é comparado com outros algoritmos presentes na literatura.

Os resultados da simulação do algoritmo TOURISM foram comparados com resultados derivados dos algoritmos CCL [Moura and Da Fonseca 2018] e MSPM

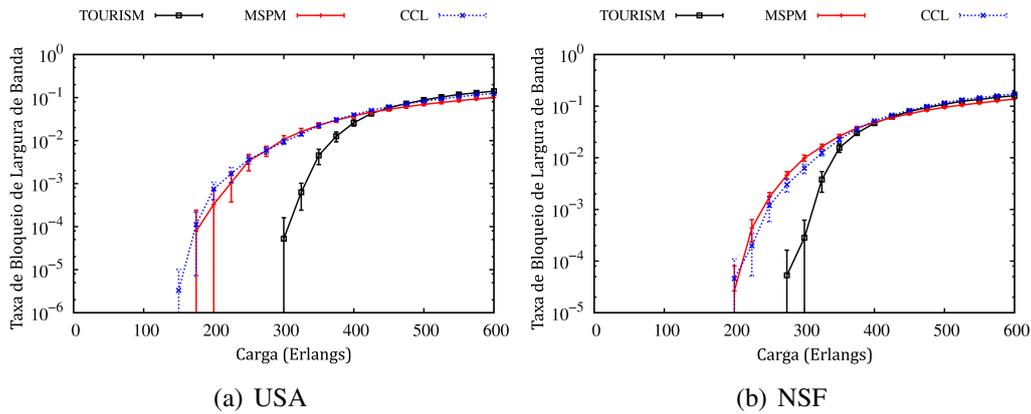


Figura 3. Taxa de bloqueio de largura de banda para as topologias USA e NSF.

[Wan et al. 2012]. Especificamente, o algoritmo CCL emprega um algoritmo de processamento de imagem para identificar os *slots* e núcleos alocáveis que atendem à demanda. Por outro lado, o algoritmo MSPM usa um algoritmo de Dijkstra para calcular a rota e depois encontrar a modulação, espectro e núcleo. Nos algoritmos MSPM, o problema de roteamento é tratado de forma independente e o problema MSCA considera a distância entre a origem e o destino.

A Figura 3 mostra os resultados da simulação para a Taxa de Bloqueio de Largura de Banda. O algoritmo TOURISM apresenta resultados melhores que os algoritmos comparados da literatura. Para a topologia USA, os algoritmos MSPM e CCL bloqueiam requisições sob a carga de 150 Erlangs, enquanto TOURISM começa a bloquear sob a carga de 300 Erlangs. Cenário semelhante acontece para a topologia NSF, onde MSPM e CCL bloqueiam requisições a partir de 200 Erlangs e TOURISM bloqueia a partir 275 Erlangs. O algoritmo TOURISM apresenta resultados superiores para ambas as topologias USA e NSF. Os baixos valores de BBR produzidos pelo algoritmo TOURISM demonstram o benefício de realizar o mapeamento ao escolher a rota, a modulação, o espectro e o núcleo juntos nos algoritmos RMCSLA.

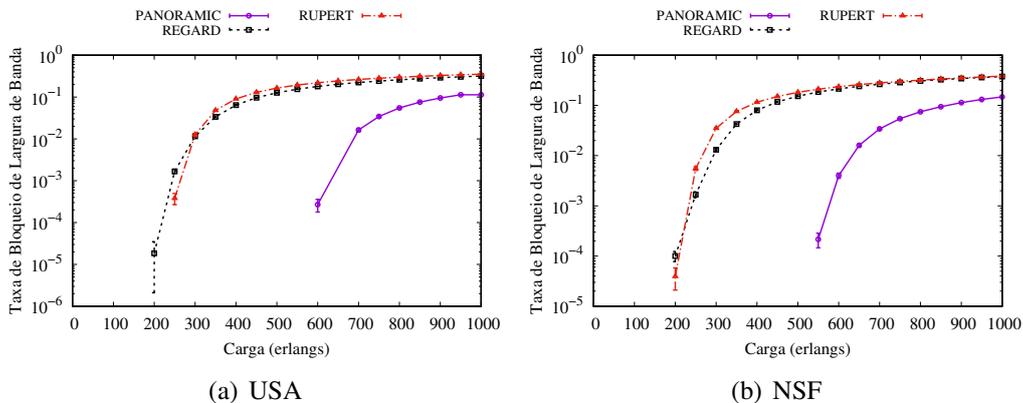


Figura 4. Taxa de bloqueio de largura de banda para as topologias USA e NSF.

A Figura 4 exibe os resultados da simulação para a Taxa de Bloqueio de Largura de Banda para os algoritmos PANORAMIC, REGARD e RUPERT comparados entre si. Para a topologia USA, PANORAMIC bloqueia requisições a partir de 600 Erlangs,

enquanto os algoritmos REGARD e RUPERT bloqueiam a partir de 200 erlangs. Para a topologia NSF, PANORAMIC bloqueia requisições a partir de 550 Erlangs, enquanto REGARD bloqueia a partir de 200 erlangs e RUPERT começa a bloquear a partir da carga de 250 erlangs.

O algoritmo PANORAMIC demonstra maior efetividade na transmissão de dados devido a estratégia de multicaminho adotada, combinado ao mapeamento do espectro e à aplicação de modulação às transmissões, que potencializam a quantidade de bits transmitidos. PANORAMIC não adota ciência de *crosstalk* ou fragmentação, diferentemente dos algoritmos REGARD e RUPERT. REGARD define as rotas de modo offline, o que permite a alocação de recursos de forma mais rápida, calculando o impacto da transmissão em *crosstalk* e fragmentação na rede. O algoritmo RUPERT utiliza o mapeamento para verificar recursos disponíveis, propiciando uma abordagem de melhor utilização de espectro, considerando todos os caminhos entre os nós da rede.

5. Resultados do Trabalho

A Tabela 1 lista os artigos produzidos a partir dos resultados do trabalho de iniciação científica realizado na Universidade Federal do Pará. Salienta-se que todos os artigos foram publicados/submetidos em plataformas de extrato superior, além disso, em todos os artigos o aluno de IC está posicionado como primeiro autor.

Tabela 1. Trabalhos publicados como resultados do trabalho de IC

Referencia	Periódico	Qualis	Situação
[Rodrigues et al. 2020a]	SENSORS 2020	A1	Publicado
Referencia	Conferência	Qualis	Situação
[Rodrigues et al. 2020b]	ISCC 2020	A2	Publicado
[Rodrigues and Oliveira 2021b]	SBRC 2021	B2	Submetido
[Rodrigues and Oliveira 2021a]	IEEE Globecom 2021	A1	Submetido

6. Conclusão

Neste artigo, foram apresentadas as contribuições do trabalho de iniciação científica realizado na Universidade Federal do Pará. Um amplo estudo sobre redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial foi realizado. Os algoritmos desenvolvidos foram avaliados para diferentes topologias, métricas e cargas da rede. Os algoritmos foram propostos para redes que possibilitam o incremento da performance e capacidade do núcleo da Internet de nova geração. Os algoritmos propostos aumentam a aceitação de requisições para o estabelecimento de conexões e levam em consideração o *crosstalk*, o roteamento multicaminho e a fragmentação gerada na rede. Os resultados obtidos são originais e fundamentam um tópico muito pouco explorado na literatura. Espera-se que as contribuições do TIC possam propiciar uma Internet que transporte volume de dados muito maiores que os atuais.

Referências

- Brasileiro, I., Costa, L., e Drummond, A. (2019). A survey on crosstalk and routing, modulation selection, core and spectrum allocation in elastic optical networks.
- Moura, P. M. e Da Fonseca, N. L. S. (2018). Routing, core, modulation level, and spectrum assignment based on image processing algorithms. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 10(12):947–958.
- Moura, P. M. e Drummond, A. C. FlexGridSim: Flexible Grid Optical Network Simulator. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/FlexGridSim/>. Último acesso: 07/05/2021.
- Oliveira, H. M. e da Fonseca, N. L. (2019). Routing, spectrum and core assignment algorithms for protection of space division multiplexing elastic optical networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 128:78–89.
- Rodrigues, E., Cerqueira, Eduardo adn Rosário, D., e Oliveira, H. (2020a). Hybrid routing, modulation, spectrum and core allocation based on mapping scheme. *Sensors*, 20(21):6393.
- Rodrigues, E., Cerqueira, E., Rosário, D., e Oliveira, H. (2020b). Routing, modulation, spectrum and core allocation based on mapping scheme. In *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–6.
- Rodrigues, E. e Oliveira, H. (2021a). Algorithm for routing, modulation, spectrum and core allocation based on fragmentation and crosstalk. In *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. SUBMETIDO.
- Rodrigues, E. e Oliveira, H. (2021b). Roteamento e alocação de núcleo e espectro com ciência de fragmentação e crosstalk em sdm-eons. In *Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. SBC. SUBMETIDO.
- Ujjwal, Thangaraj, J., e Rajnish kumar (2021). Multi-path provisioning in elastic optical network with dynamic on-request optimal defragmentation strategy. *Optical Switching and Networking*, 41:100607.
- Wan, X., Hua, N., e 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.
- Xiong, Y., Ye, Y., Zhang, H., He, J., Wang, B., e Yang, K. (2020). Deep learning and hierarchical graph-assisted crosstalk-aware fragmentation avoidance strategy in space division multiplexing elastic optical networks. *Opt. Express*, 28(3):2758–2777.
- Yin, S., Zhang, Z., Chen, Y., Ma, R., e Huang, S. (2019). A survivable xt-aware multi-path strategy for sdm-eons. In *2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, pages 1–3.
- Yousefi, F., Ghaffarpour Rahbar, A., e Ghadesi, A. (2020). Fragmentation and time aware algorithms in spectrum and spatial assignment for space division multiplexed elastic optical networks (sdm-eon). *Computer Networks*, 174:107232.