

# Solução Ciente da Área para Alocação de Recursos em Redes Ópticas Metropolitanas

Léia S. de Sousa<sup>1,2</sup>, Lucas R. Costa<sup>1</sup>, André C. Drummond<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Computação – Universidade de Brasília (UnB)  
Brasília, Brasil

<sup>2</sup>Faculdade de Computação e Engenharia Elétrica (FACEEL) –  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA)  
Marabá, PA – Brasil

leiasousa@unifesspa.edu.br, lucasrc.rodri@gmail.com, andred@unb.br

**Abstract.** *Metro Optical Networks (MON) are undergoing major transformations to continue to offer services that meet the application requirements of the future. The traffic of these applications behaves differently at each time of day and in each specific area of the network. Context agnostic solutions do not consider such uneven distribution of traffic. This work presents an area-aware routing and spectrum allocation solution in the context of metropolitan elastic optical networks (MEON). Such a proposal achieves a double reduction of bandwidth blocking in the network as a whole, and at least 1% reduction in the comprehensive (CA) and residential (RA) areas existing in the metro.*

**Resumo.** *As redes ópticas metropolitanas (MON) estão passando por grandes transformações para continuar a oferecer serviços que atendam aos requisitos das aplicações do futuro. O tráfego dessas aplicações apresenta um comportamento diferente em cada horário do dia e em cada área específica da rede. As soluções agnósticas desse contexto não consideram tal distribuição desigual de tráfego. Este trabalho apresenta uma solução de roteamento e alocação de espectro ciente da área no contexto de redes ópticas metropolitanas elásticas (MEON). Tal proposta alcança o dobro de redução do bloqueio de largura de banda na rede como um todo, e pelo menos 1% de redução nas áreas compreensivas (CA) e residenciais (RA) existentes na metro.*

## 1. Introdução

As redes ópticas metropolitanas/metro (*Metropolitan Optical Networks* - MON) estão passando por grandes transformações para continuar a oferecer serviços que atendam aos requisitos das aplicações do futuro. A chegada da tecnologia 5G ampliará as possibilidades de oferta de aplicativos de *internet* das coisas (*Internet of Things* - IoT), veículos autônomos e serviços de cidades inteligentes, ao mesmo tempo em que impõe forte pressão sobre a infraestrutura física atualmente implementada, bem como sobre técnicas de engenharia de tráfego estáticas que não respondem de forma ágil à natureza dinâmica e heterogênea dos próximos padrões de tráfego [Pavon-Marino et al. 2020, Troia et al. 2019].

Atualmente, essa mudança contínua na localização dos sistemas de armazenamento/computação em direção à borda já impactou o perfil de tráfego nas

redes de transporte, deslocando a carga das redes de núcleo em nível central para o nível metropolitano [Pavon-Marino et al. 2020]. Além disso, o menor grau de agregação de tráfego na metro, devido à maior proximidade com as fontes de tráfego, leva naturalmente a um perfil de tráfego mais dinâmico e heterogêneo, o que impõe requisitos mais rígidos para transportá-lo. A metro é um dos segmentos de rede com considerável variedade em termos de presença de granularidades de tráfego de dados, variando de menos de 1 *Gb/s* [Shen et al. 2018] até 800 *Gb/s* [Routray et al. 2020], com diferentes modos de comunicação [Cugini et al. 2016] e perfis de tráfego [Uzunidis et al. 2018, Streit et al. 2021, Braga et al. 2021]. Além disso, a metro sofre com um impacto significativo no tráfego gerado em outros segmentos de rede, como redes de núcleo (*backbone* de *Internet*) e redes de acesso, por intermediar a comunicação [Thyagaturu et al. 2016, Rottondi et al. 2013, de Sousa and Drummond 2022].

Um dos maiores desafios da metro é lidar com diferentes padrões de distribuição de tráfego, tanto no tempo quanto no espaço [Troia et al. 2019], e que coexistem neste mesmo segmento de rede. Este fenômeno é denominado tráfego de maré (*tidal-traffic*). O tráfego de maré é caracterizado pela diferença de distribuição de tráfego de dados, decorrente dos vários tipos de serviços e aplicações, ao longo da grande variedade de áreas (residencial, comercial, industrial, recreativa, entre outras), com diferentes comportamentos em cada horário do dia. Isto ocorre porque, neste mundo cada vez mais conectado, as pessoas costumam gerar tráfego nas suas casas durante as últimas horas do dia, e ao locomoverem-se, o tráfego é registrado em áreas compreensivas destinadas ao trânsito e diversão enquanto chegam aos locais de trabalho, onde o tráfego de dados começa a ser maior durante os horários comerciais [Yan et al. 2020]. Adicionalmente, os padrões de tráfego nos dias úteis tendem a ser mais concentrados em determinados horários do dia, enquanto nos finais de semana apresenta-se de forma mais distribuída [Uzunidis et al. 2018, Streit et al. 2021, Braga et al. 2021].

Com a situação de emergência sanitária ocasionada pela COVID-19, no mundo inteiro houve uma mudança na distribuição dos perfis e padrões de tráfego. Os pontos de troca da internet (*Internet eXchange Point* - IXP) e provedores de serviço de internet (*Internet Service Providers* - ISP) registraram um aumento de tráfego de até 50%, o que representa mais do que o dobro da taxa esperada, enquanto nas redes móveis houve uma redução, motivada principalmente pela concentração de pessoas nas residências, que passaram a utilizar redes sem fio domésticas. Com isso, o padrão de tráfego de dias úteis nas áreas metropolitanas passou a exibir o comportamento dos padrões de tráfego de finais de semana, com o agravante de existirem muito mais demandas por largura de banda por parte de aplicações de *streaming*, aplicativos de conectividade VPN e videoconferência [Streit et al. 2021, Braga et al. 2021]. Juntamente com o início do período de vacinação e abertura da economia, na maioria dos países os padrões de tráfego de dados metropolitanos voltaram a exibir o comportamento de 2019, seguindo as mesmas tendências. Entretanto, sabe-se que, a cada surgimento de nova tecnologia, o tráfego das aplicações modifica-se gradualmente gerando novos padrões. Um exemplo é o que ocorreu com a larga adoção das aplicações *peer-to-peer* nos anos 2000 e dos serviços de *streaming* a partir de 2010.

As Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks* - EON) são uma das mais promissoras tecnologias de transmissão, capaz de prover maior quantidade de recursos

otimizados para os diversos perfis de aplicações, uma vez que os recursos espectrais são atribuídos sob demanda, de acordo com os requisitos das aplicações. Uma das primeiras soluções para EON em redes metro cientes da área é proposta em [Yan et al. 2020], que reduziu a probabilidade de bloqueio geral na rede em mais de 2% em comparação com algoritmos agnósticos.

Este trabalho propõe o algoritmo *Aware Link Weighted Area with Complete Sharing* (ALWAcS), focando especificamente no roteamento e alocação de recursos em metro baseada em EON, aproveitando as informações das áreas metropolitanas nas decisões de rotas. O objetivo central do ALWAcS é diminuir a probabilidade de bloqueio de largura de banda para o atendimento de requisições de serviços. Para isso, duas estratégias foram estabelecidas:

- Quando origem e destino de uma conexão fazem parte de um mesmo tipo de área (subárea), e nesta área faz ainda parte de um mesmo *cluster* de nós, o caminho escolhido é o de menor peso total dos seus respectivos enlaces. Os pesos podem ser atribuídos de acordo com a condição de tráfego em determinado horário do dia, tornando mais caro escolher enlaces com origem e destino em áreas distintas.
- Quando a origem e o destino de uma conexão são de áreas (subáreas)/*clusters* distintos, a estratégia adotada é a política *Complete Sharing* (CS) [Wang and Mukherjee 2014], que aloca os recursos espectrais de menor índice no espectro.

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de solução ciente da área que reduz a probabilidade de bloqueio geral e especificamente, em duas grandes áreas metropolitanas. Tal proposta supera a solução de [Yan et al. 2020] em pelo menos 2% enquanto melhora o atendimento de requisições em áreas particulares da rede metro. O resultado é importante por chamar a atenção para os recursos representativos de um dado segmento da metro em um horário específico no qual as demandas são desafiadoras.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta um estudo dos trabalhos relacionados; a Seção 3 descreve alguns conceitos básicos para o entendimento da proposta; a Seção 4 apresenta o problema e o algoritmo ALWAcS proposto; a Seção 5 descreve a metodologia da simulação, cenários e apresentação dos resultados, além da Seção 6, que conclui este artigo.

## 2. Revisão da Literatura

O problema da alocação de recursos em MONs tem estado cada vez mais em evidência devido à necessidade de recursos otimizados, requeridos pelas aplicações emergentes, tais como *Internet of Things* (IoT), Indústria 4.0 e tecnologia 5G [Shen et al. 2018, Layec et al. 2017]. A tecnologia EON é uma das fortes candidatas para apoiar na infraestrutura e provisão de recursos, de modo que todas essas novas aplicações sejam oferecidas com garantias de qualidade de serviço e de experiência, enquanto considera o crescente tráfego de dados e de número de usuários. Neste sentido, novas arquiteturas de rede estão sendo propostas, tais como a *Ultra Dense-Wavelength Switched Network* (UD-WSN) [Shen et al. 2018] ou a *Metro Elastic Optical Network* (MEON) [Hadi et al. 2019, Hadi and Agrell 2019, Yan et al. 2018, Yan et al. 2020], sendo que todas elas são baseadas em tecnologia de transmissão flexível. Estas são especificamente arquiteturas com nós dotados de filtros reconfiguráveis, nomeadamente, *switches* seletivos

de comprimento de onda (*Wavelength Selective Switch* - WSSs). Devido a este aspecto, essas redes ópticas são denominadas redes ópticas seletivas de comprimento de onda (*Wavelength Switched Optical Networks* - WSONs). Além destas arquiteturas, há ainda outros dois tipos, os quais são, redes sem filtro e redes semi-sem filtro. Os autores deste presente trabalho publicaram um *preprint* de um *survey* [de Sousa and Drummond 2022] reunindo e comparando estas e outras principais arquiteturas de rede para o segmento metro e que estão em destaque na literatura recente.

Em [Hadi et al. 2019, Hadi and Agrell 2019] são propostas soluções de roteamento e alocação de espectro (*Routing and Spectrum Allocation* - RSA) para redes metro, mas estas são agnósticas e não consideram dados deste segmento na tomada de decisão, promovendo uma distribuição de recursos totalmente injusta. Enquanto [Hadi et al. 2019] propõe alocação adaptativa com otimização estocástica para atender as demandas de tráfego, tendo como principal resultado a redução na utilização de recursos espectrais, [Hadi and Agrell 2019] propõe uma solução baseada em redes definidas por *software* (*Software-Defined Networking* - SDN) capaz de fornecer uma adaptação entre os recursos alocados e as necessidades reais dos fluxos de tráfego. Nesta solução, as interações com a camada física são consideradas para reduzir o consumo energético dos transponders, e tais dados são obtidos por meio do controlador de rede. Ambos, [Hadi et al. 2019, Hadi and Agrell 2019] não focam nas especificidades pontuais de carga de tráfego em cada horário e região metropolitana. Embora ambas as soluções sejam estudadas no campo das redes metropolitanas, os experimentos são executados utilizando metodologias estendidas daquelas aplicadas às redes de núcleo, como por exemplo, distribuição homogênea de tráfego ao longo dos nós da rede. Já em [Yan et al. 2018, Yan et al. 2020] são propostos modelos de tráfego para redes metropolitanas, bem como soluções de alocação de recursos ciente da área em redes MEON, que tomam como entrada os referidos modelos de tráfego. Estes modelos de tráfego determinam a geração do tráfego em cada hora do dia e em cada região da metro. Enquanto [Yan et al. 2018] apresenta o *Onion Tidal Traffic Model* (OTTM) próprio para MON de pequenas cidades, nas quais são consideradas, em geral, duas áreas únicas e distintas (residencial e comercial), o modelo proposto em [Yan et al. 2020], denominado *Multi-Step Trigonometric Model* (MSTM), é apropriado para grandes metrópoles com duas regiões residenciais, duas regiões de negócios e duas regiões compreensivas (basicamente regiões de lazer e locomoção). O modelo MSTM amplia a complexidade do modelo OTTM. As informações de geração de tráfego obtidas com os modelos são utilizadas como entrada para o algoritmo RSA, ajudando a identificar os pontos de gargalo na topologia.

Para análise comparativa com a solução proposta neste trabalho (ALWAcS), selecionou-se o algoritmo RSA proposto em [Yan et al. 2020] por ser a proposta mais recente e por considerar uma gama maior de áreas metropolitanas, o que pode ser mais representativo para diversas metros no mundo real. A estratégia adotada por [Yan et al. 2020] é selecionar caminhos que tenham o mínimo possível de saltos contidos em áreas residenciais e comerciais, enquanto o ALWAcS é capaz de ser mais acurado, olhando dentro dessas áreas os possíveis *clusters* existentes. Com isso, o ALWAcS realiza a seleção considerando os pesos diferenciados nos enlaces e a localização dos nós de origem e destino das requisições. O RSA de [Yan et al. 2020] objetiva apenas a redução do bloqueio de banda geral, o ALWAcS consegue superá-lo tanto no bloqueio médio ao longo da rede como um todo, quanto em pelo menos dois terços de todas as áreas metros.

### 3. Conceitos Básicos

As metros tipicamente agregam e roteiam o fluxo de dados oriundo das redes de acesso. Os fluxos em trânsito são também trocados/encaminhados para as redes de núcleo (*backbone*). Em comparação com outros segmentos de rede, a metro possui maior número de nós, e conseqüentemente enlaces. O diâmetro da metro tem aumentado em decorrência dos requisitos de novas aplicações, que impõem fortes necessidades de ampliação da infraestrutura ao longo do tempo, tendo hoje um diâmetro de até 700 km, e portanto, demandado maiores investimentos [Ayoub et al. 2022, Pavon-Marino et al. 2020].

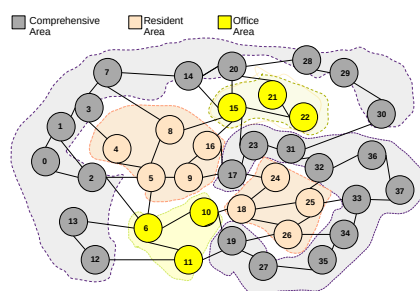
A metro pode ser subdividida em dois tipos: metro-core (MC) e metro-acesso (MA) [Shen et al. 2018]. Essa divisão possibilita a separação de tarefas específicas para determinados nós dentro do segmento, assim como, diferentes configurações. Deste modo, torna-se menos dispendioso escolher equipar apenas parte da metro com equipamentos mais robustos, ao invés de todos os nós do próprio segmento, uma vez que o CAPEX associado está fortemente ligado ao número e tamanho das redes metro [Lord et al. 2016]. Dessa maneira, o segmento MC pode lidar com tráfego agregado do segmento MA. O segmento MC é o objeto de estudo deste trabalho, assim como em [Yan et al. 2018, Yan et al. 2020]. O segmento MC pode ainda ser dividido em três tipos de camadas de rede, tais como [Lord et al. 2016]: (1) recursos de computação na camada de serviço, como por exemplo, processamento e memória; (2) largura de banda na camada IP/MPLS ou OTN; (3) e finalmente recursos ópticos na camada de transporte, como, por exemplo, fibras, largura de banda na camada óptica ou comprimentos de onda. O foco deste trabalho é nesta terceira camada de rede, isto é, rede óptica.

A tecnologia de grade flexível, como EON, por exemplo, possui granularidade espectral mais fina, como 6.25 GHz [Hadi et al. 2019] ou 12.5 GHz [Yan et al. 2020, Hadi and Agrell 2019]. Como é possível realizar agregação também na camada óptica, o nível de agregação dos fluxos das requisições pode ser reduzido, com vantagens diretas no aumento de recursos disponíveis e na redução da latência de oferecimento dos serviços. Esta é a principal justificativa na literatura para a adoção de grade flexível no segmento metro [Shen et al. 2018, Layec et al. 2017, Lord et al. 2016]. Para alocação de recursos que atendam uma conexão, é necessário encontrar uma rota de enlaces na rede que tenha recursos espectrais disponíveis. A resolução do RSA leva em consideração as seguintes restrições:

- Continuidade da mesma faixa de espectro durante todo o percurso de um fluxo.
- Alocação contígua de *slots* de frequência pertencentes a uma requisição.
- Não sobrepor espectro para duas demandas.
- Manter *slots* (banda de guarda) entre os espectros alocados para que não haja interferências.

Mas o aumento de recursos espectrais não resolve todos os problemas do tráfego da metro. Nestas redes, a agregação e distribuição do tráfego ocorre de maneira desigual. A Figura 1 mostra um esquema de separação das diversas áreas de zoneamento nas grandes cidades, que são determinantes para a previsão do comportamento dos habitantes residentes. As pessoas costumam passar um determinado período de tempo nas suas respectivas áreas residenciais (*residential area* - RA), nas quais são registrados fluxos de aplicações de jogos, *streamings* de mídias e aplicações de redes sociais, por exemplo. Em outros períodos de tempo, as pessoas deslocam-se para as áreas de negócios (*office*

area - OA) ou áreas comerciais, onde trabalham e/ou estudam. Estas áreas têm maior concentração de ocupação em dias úteis e nos horários comerciais. Nas OA, tipicamente estão localizados os provedores de serviços, e nestes horários comerciais é frequente a utilização de aplicações de vídeo-conferência e conectividade VPN, por exemplo. Conforme as pessoas se locomovem entre RA e OA, a área compreensiva (*comprehensive area* - CA) que funciona como intermediação entre as demais áreas, é inundada por tráfego transitório, especialmente nos horários de pico no trânsito de locomoção das pessoas, decorrente das aplicações de geolocalização e roteamento de tráfego de veículos, por exemplo. As atividades humanas são mais intensas em cada uma dessas áreas/distritos em momentos específicos do dia, seja na parte da manhã, da tarde ou da noite. Os horários comerciais, por exemplo, apresentam maior pico de tráfego nas áreas de negócios. Entretanto, a quantidade de zonas e os horários detalhados são muito particulares de cada cidade, e por este motivo, são um pouco complexos e influenciados por muitos fatores que variam desde os tipos de atividades comerciais praticadas ao hábito cultural dos residentes, conforme discute [Yan et al. 2020].



**Figura 1. Demonstração da variedade de áreas/distritos nas cidades [Yan et al. 2020]**

De maneira representativa, para formalizar a geração e distribuição de tráfego nas metros, modelos como OTTM [Yan et al. 2018] e MSTM [Yan et al. 2020] são propostos para simular picos e vales de tráfego de dados em cada momento do dia. A validação de tais modelos ocorre, por exemplo, aplicando o modelo ao tráfego agregado real coletado de algumas estações base de redes móveis. O modelo MSTM, por exemplo, foi testado com bases de dados da rede 4G de Xangai. Tais modelos são úteis para redes ópticas metropolitanas por indicar o nível de tráfego de dados em cada nó da rede, ilustrando as condições reais de distribuição desigual deste tráfego.

#### **4. Problema do Roteamento e Alocação de Espectro Ciente da Área**

O problema RSA tradicional encontra uma rota específica com os recursos de espectro requisitados para atender uma determinada demanda, quando, em geral, a distribuição do tráfego é homogênea ao longo da rede. Nas redes metropolitanas este problema torna-se mais complexo devido à distribuição desigual do tráfego que resulta em gargalos pontuais em diferentes horários e locais das áreas metropolitanas. Outro grande desafio é que, cada região metropolitana no mundo pode apresentar características únicas de organização dos espaços. Para explicar o algoritmo RSA proposto neste artigo, as seguintes variáveis são definidas:

- $G(V, E)$ : grafo representando uma MEON, onde  $V$  é o conjunto de nós constituído por nós de RA, OA e CA, e  $E$  é o conjunto de enlaces de fibra com  $e \in E$  possuindo um total de  $|S|$  slots de frequência.
- $(v_c^a)_i \in V$ : o  $i$ -ésimo nó em  $V$ , sendo que cada  $v_c^a$  faz parte de uma área  $a$  e de um determinado *cluster*  $c$  na topologia da rede metro. Um *cluster* é um conjunto maximal de nós pertencentes a uma mesma área. Uma área é formada por mais de um *cluster* se para um par de nós desta área o caminho mínimo entre eles passe por outra área. Para o algoritmo ciente, estas informações são conhecidas previamente.
- $e_i \in E$ : o  $i$ -ésimo enlace em  $E$ , sendo  $e((v_c^a)_i, (v_c^a)_j, w)$ , ou seja, trata-se de um enlace entre um par de nós  $(v_i, v_j)$  com  $i \neq j$ . Podem existir arestas entre nós de diferentes áreas e *clusters*. Cada  $e_i$  possui um determinado peso  $w$ , com  $w \in \mathbb{Q}$ , a ser definido de acordo com os horários do dia. Para o algoritmo ciente, estas informações são conhecidas previamente. A atribuição de pesos ( $w$ ) a um determinado enlace ( $e$ ) atende aos seguintes critérios:
  - Se ambos, origem e destino,  $v_i, v_j$ , estão na mesma área CA, o peso dos enlaces será  $w_c$ ;
  - Se ambos  $v_i, v_j$  estão na mesma área RA, o peso do enlace será  $w_r$ ;
  - Se ambos  $v_i, v_j$  estão na mesma área OA, o peso do respectivo enlace será  $w_o$ ;
  - Se a origem e o destino são de áreas distintas, então o enlace terá peso  $w$ ;
- $r(source, destination, requestedSlots(), ht)$ : requisição de conexão entre um determinado par de origem e destino  $(source, destination)$ , sendo ambos  $v_c^a$  distintos. Esta requisição solicita um determinado número de *slots* de frequência  $(requestedSlots())$  dentro de um período de tempo pré-definido como *holding-time* ( $ht$ ) conhecido.
- $p \in P$ : é o caminho pertencente ao conjunto de caminhos de roteamento viáveis para atender a requisição  $r$ , sendo que  $|P| = k$ , com  $k \in \mathbb{N}$ .
- $SA(r, p, r.requestedSlots())$ : é a alocação de *slots* espectrais para a requisição  $r$  no caminho  $p$ , correspondendo a um determinado número de fatias designadas como  $r.requestedSlots()$ , de acordo com as restrições de continuidade e contiguidade.

#### 4.1. Algoritmo Proposto

A solução RSA proposta é denominada *Aware Link Weighted Area with Complete Sharing* (ALWAcS), conforme mostra o Algoritmo 1. Na linha 3 é executado o algoritmo iterativo de *Yen* [Yen 1971] para calcular os  $k$  menores caminhos sem ciclos, construindo-se o conjunto de caminhos viáveis  $P$ . Em seguida, são considerados dois casos. O primeiro caso refere-se ao caso de a origem e o destino da requisição serem ambos de mesma área e *clusters*, enquanto que o segundo caso diz respeito a todas os demais pares de origem e destino que não atendem esta restrição. Para o primeiro caso as linhas 4-13 são executadas. Já para o segundo caso são executadas as linhas 14-16. Na linha 5 é executada a função de ordenação dos caminhos de acordo com a soma dos pesos atribuídos aos enlaces. Os valores numéricos utilizados como pesos são parametrizados e podem ser modificados de acordo com a situação da rede, de modo a evitar caminhos mais caros. Após a ordenação, o primeiro caminho possível que atende as restrições de

alocação de espectro (linha 7) é utilizado para o estabelecimento da requisição, e esta é aceita, conforme mostra a linha 8. Caso contrário, a requisição é bloqueada (linha 11).

Para o segundo caso, em alternativa à linhas 5 é utilizada a política descrita na linha 15, na qual são selecionados os  $k$  caminhos com *slots* disponíveis mais à direita do espectro, isto é, os *slots* de menores índices. Esta política é denominada *Complete Sharing* (CS) [Wang and Mukherjee 2014]. A requisição poderá ser aceita se há um caminho viável com disponibilidade. Caso contrário, a requisição é bloqueada, executando-se as linhas 6 – 13.

---

**Algoritmo 1**  $ALWAcS(G(V, E), r, k, w_c, w_r, w_o, w)$

---

```

1:  $s \leftarrow r.source()$ 
2:  $d \leftarrow r.destination()$ 
3:  $P \leftarrow KSP(r, k)$ 
4: se  $s.getArea() == d.getArea()$  e  $s.getCluster() == d.getCluster()$  então
5:    $SortByLowestWeightOnLinks(P, w_c, w_r, w_o, w)$ 
6:   para cada  $p \in P$  faça
7:     se  $SA(r, p, r.requestedSlots())$  é satisfeita então
8:        $Aceita(r)$ 
9:        $Break()$ 
10:    senão
11:       $Bloqueia(r)$ 
12:    fim se
13:  fim para
14: senão
15:    $SortByCompleteSharingPolice(r, k)$ 
16:   GOTO linha 6
17: fim se

```

---

A estratégia do primeiro caso pondera os enlaces da rede de maneira a evitar os enlaces mais comprometidos. A parametrização dos pesos possibilita uma ponderação customizada para as condições de tráfego de cada horário. Já a estratégia do segundo caso, que visa atender requisições entre diferentes áreas e/ou *clusters*, busca caminhos disponíveis que podem ser potencialmente maiores de modo a equilibrar a distribuição da carga na rede, o que aumenta as possibilidades de sucesso no atendimento de uma requisição. De maneira diferente, as soluções cientes propostas em [Yan et al. 2020] apenas tentam evitar os nós das áreas RA e/ou OA no estabelecimento dos caminhos.

## 4.2. Análise da Complexidade do ALWAcS

O algoritmo ALWAcS, assim como todos os algoritmos em [Yan et al. 2020], é baseado no KSP de Yen [Yen 1971], que seleciona os  $k$  menores caminhos sem *loops*, rotina que é executada na linha 2 do Algoritmo 1. A complexidade de tempo do cálculo do caminho usando o algoritmo de Yen é  $O(k|V|^3)$ . Na linha 5 do algoritmo, a função  $SortByLowestWeightOnLinks()$  ordena por seleção os caminhos em  $P$ , com complexidade de  $O(k^2)$ , onde  $k$  representa o número máximo de caminhos. A função  $SA()$ , na linha 7, que é baseada em *first-fit*, verifica a viabilidade de espectro capaz de atender a requisição em um dado caminho e leva  $O(|E||S|)$ , sendo  $|E|$  o tamanho do conjunto de enlaces e  $|S|$  o número máximo de *slots* em cada enlace. Essa complexidade se justifica



porque cada um dos  $|E|$  caminhos é varrido para detectar e interseccionar os  $|S|$  slots de espectro. Devido ao laço de repetição iniciado na linha 6, a função  $SA()$  é executada, no máximo,  $k$  vezes, uma vez que  $k = |P|$ . A função  $SortByCompleteSharingPolice()$  utiliza uma extensão do algoritmo *First-Fit* para alocação de espectro. Os slots do espectro são indexados e o caminho escolhido é estabelecido no espectro contíguo de menor índice para atender a demanda, o que leva a uma complexidade de tempo de  $O(K^3|V|^3)$ . Desta maneira, a complexidade de tempo geral do ALWAcS (Algoritmo 1) é  $O(k|V|^3 + k^2 + k(|E||S|) + k^3|V|^3)$ .

## 5. Simulação e Análise de Resultados

O algoritmo ALWAcS (Algoritmo 1) foi implementado no *Optical Networks Simulator* (ONS<sup>1</sup>) [Costa et al. 2016]. Para comparação, foram implementados os algoritmos propostos em [Yan et al. 2020], os quais são *Min-Hop K-shortest path routing* (MHK), *Occupied-Slots-as-Weight K-shortest path routing* (SWK), *Area-Aware RSA* (A2RSA). Nesta referência da literatura, também é fornecido um modelo de geração de carga de tráfego por cada momento no tempo. A saída do modelo é a carga em *Erlang* para cada área da topologia em cada hora do dia. Como o modelo de tráfego não faz parte do escopo do problema discutido neste artigo, foram selecionados pontos específicos da linha do tempo, respectivamente 06h e 18h, para representarem o estado do tráfego leve e tráfego elevado.

De acordo com [Yan et al. 2020], os algoritmos MHK e SWK são agnósticos das áreas da rede metropolitana e são explorados como *benchmarks* nas simulações. Os autores propuseram um único *Area-Aware RSA* (A2RSA) dividido em duas partes de acordo com o horário do tráfego, sendo a primeira delas para ser executada com requisições que chegassem antes das 10h e que fossem concluídas até as 18h, e a segunda parte para requisições com horário de início a partir das 10h e conclusão após as 18h. A principal diferença entre essas duas partes é que na primeira delas são selecionados caminhos com a mínima quantidade de nós da OA, e na segunda parte são escolhidos os caminhos com mínima quantidade de nós de ambas OA e RA juntas. Neste trabalho, as duas partes do A2RSA são apresentadas separadamente, sendo a primeira parte denominada A2RSAp1 e a segunda parte, A2RSAp2. Desta maneira, estes dois algoritmos cientes são executados indistintamente para qualquer ponto no tempo.

### 5.1. Cenário das Simulações

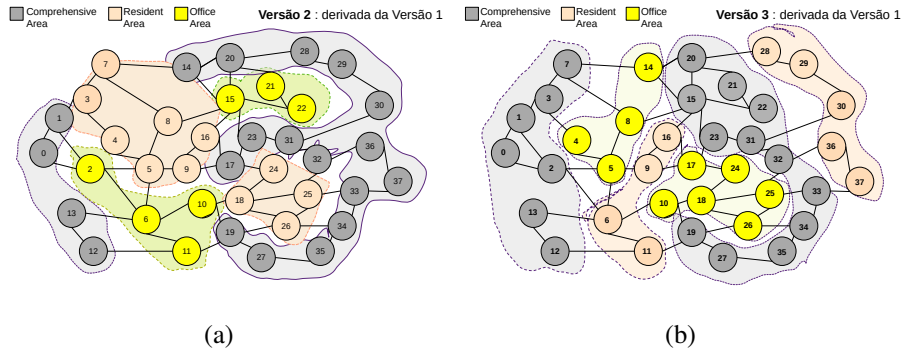
A topologia de rede testada nas simulações foi a mesma utilizada em [Yan et al. 2020], mostrada na Figura 1, composta de 38 nós e 60 enlaces unidirecionais. Para gerar outros cenários de simulação, algumas variações desta mesma topologia foram sinteticamente produzidas (Figura 2), uma vez que não foi identificada na literatura uma outra topologia de referência para os testes. Já a definição das áreas é feita representando-se o padrão geográfico dos locais onde a rede está implantada. Em [Yan et al. 2020] as áreas representam o espaço geográfico de Xangai. As variações geradas são mostradas na Figura 1 [Yan et al. 2020]. Topologias derivadas podem ser geradas mudando aleatoriamente os nós que fazem parte de uma determinada área, o que pode fazer tal área se deslocar. A única restrição para a geração de topologias derivadas é a conservação

<sup>1</sup><https://gitlab.com/get-unb/ons>

**Tabela 1. Percentual de excedente de carga por área em cada horário de acordo com [Yan et al. 2020].**

$\mathcal{T}$	$\rho(\text{CA})$	$\rho(\text{RA})$	$\rho(\text{OA})$
06h	0.4	0.3	0.1
18h	0.8	0.5	0.3

do número de áreas e *clusters*, que são características próprias do problema, conforme destaca [Yan et al. 2020].



**Figura 2. Topologias derivadas da Topologia 1 (Figura 1), sendo denominadas (a) Topologia 2 e (b) Topologia 3.**

Cada enlace é dividido em 100 *slots* de frequência, sendo cada *slot* equivalente a 12.5 GHz, com banda de guarda de 2 *slots*. A modulação utilizada é a QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). Com relação ao cenário de tráfego, foram escolhidos 2 horários específicos da linha do tempo do modelo dos autores [Yan et al. 2020], os quais são 06h e 18h. Cada horário apresenta diferentes características de distribuição do tráfego. Os pesos dos enlaces ( $w_c, w_r, w_o, w$ ) foram configurados com os valores (1, 0.04, 0.04, 1.4) e (0.6, 1.5, 1.7, 1.4), para os horários das 6h e 18h, respectivamente. A Tabela 1 [Yan et al. 2020] apresenta os percentuais de excedentes de carga de tráfego por cada área em alguns horários do dia, definidos adicionalmente ao tráfego geral. Isto significa que, em um dado momento onde a carga geral na rede é  $x$ , às 06h o carga será de  $1.4x$  em CA,  $1.3x$  em RA e  $1.1x$  em OA. Foram configuradas 100.000 chamadas dinâmicas de acordo com a distribuição de *Poisson* e um número de 50 a 250 chegadas, com incrementos de 25. Todas as conexões são bidirecionais e os nós de origem e destino das solicitações são selecionados aleatoriamente.

Nas solicitações de conexão, o valor esperado do tempo médio de espera (*holding-time*) para as conexões é definido como [1, 2, 3, 4] unidades de tempo e o número de *slots* requisitados é aleatório entre [1, 2, 3, 4]. Cada simulação foi realizada 5 vezes utilizando o método de replicações independentes. Para os resultados apresentados foram calculados intervalos de confiança com 95% de confiabilidade.

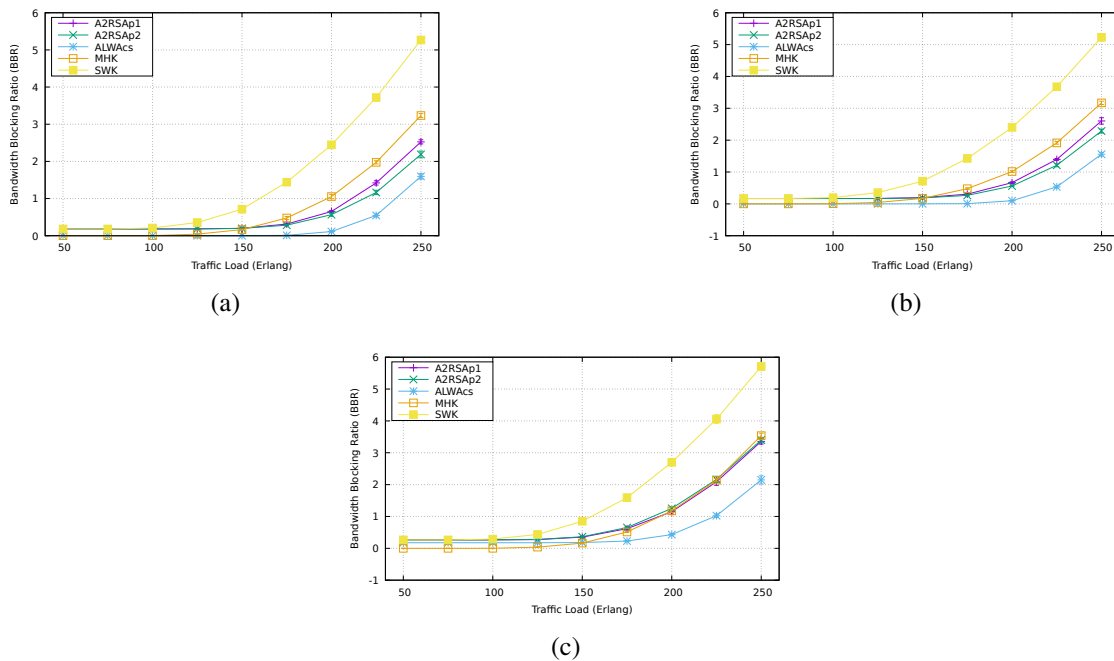
## 5.2. Avaliação dos Resultados

Para avaliação de desempenho da solução proposta, o ALWAcS foi implementado e comparado com outras soluções igualmente cientes da área, A2RSAp1 e A2RSAp2, e

também foi comparado com soluções agnósticas consideradas *benchmarks* de referência. A métrica definida para comparação foi a taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) das requisições, apresentada a seguir (Subseção 5.3). Enquanto [Yan et al. 2020] destaca como métrica principal BBR geral da rede, este trabalho adicionalmente estuda o BBR específico por cada área da topologia.

### 5.3. Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR)

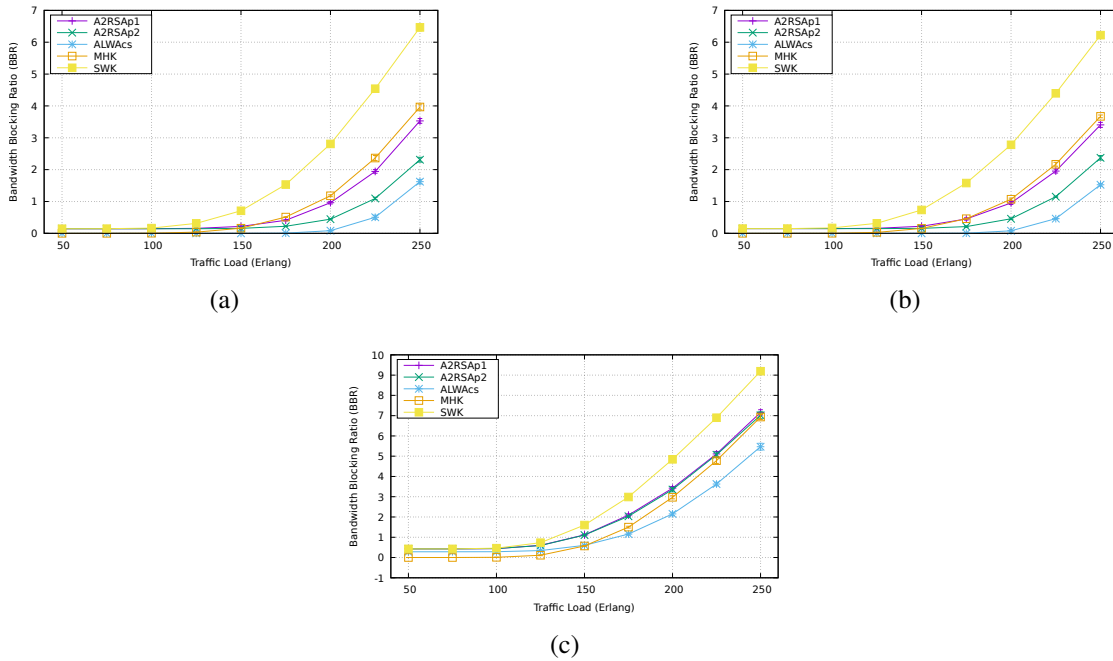
Os gráficos mostrados na Figura 3 ilustram as taxas de bloqueio de largura de banda das requisições para cada nível de carga da rede no horário de 06h e em cada uma das topologias testadas, respectivamente topologia 1 (Figura 3 (a)), Topologia 2 (Figura 3 (b)) e Topologia 3 (Figura 3 (c)). É mostrado que em cada um dos cenários o algoritmo ALWAcS foi mais bem sucedido, sendo até duas vezes mais eficiente em comparação com as demais soluções cientes. O bom resultado foi alcançado porque, ao selecionar o caminho pela menor soma de pesos, tais caminhos tendem a ser formados por enlaces não muito congestionados. Mesmo quando a origem e o destino são de áreas distintas, quando os caminhos selecionados são potencialmente maiores, aproveita-se melhor a distribuição de carga na rede para melhorar o atendimento das requisições.



**Figura 3. Probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos com  $k = 3$  no horário de 06h considerando a (a) Topologia 1 (b) Topologia 2 e (c) Topologia 3.**

No horário das 18h horas, com o volume de tráfego mais elevado, a diferença entre o ALWAcS e os demais algoritmos cientes (A2RSAP1 e A2RSAP2) com nível de carga mais alto é ainda maior em qualquer um dos cenários testados (Figura 4).

Também foi analisado o BBR individualmente por cada área considerada na topologia. Por questões de limitação de espaço serão apresentadas apenas as avaliações de BBR para a Topologia 1 no horário de 06h. Os gráficos exibidos na Figura 5 mostram que o



**Figura 4. Probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos com  $k = 3$  no horário de 18h considerando a (a) Topologia 1 (b) Topologia 2 e (c) Topologia 3.**

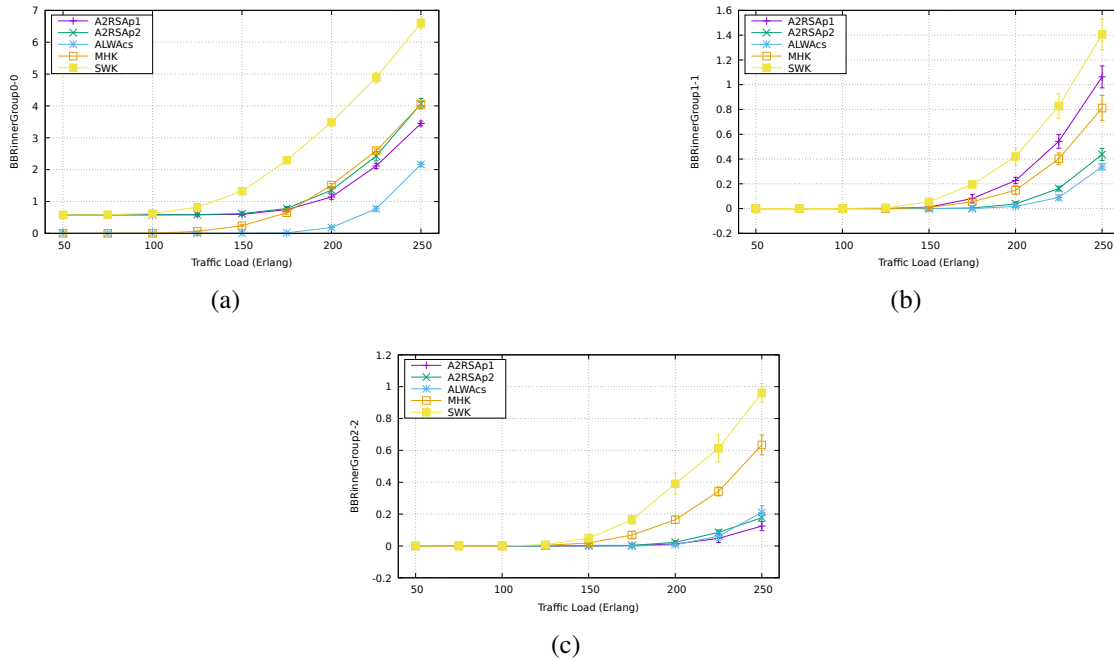
ALWacs obtém menor taxa de bloqueio em pelo menos, dois terços das zonas consideradas. Na área residencial a diferença entre o A2RSap2 e o ALWacs é menor mas tende a aumentar com o crescimento da carga na rede, sendo que o ALWacs apresenta o melhor desempenho. Na OA (Figura 5 (c)) a solução proposta tem desempenho equiparável aos algoritmos cientes até a carga de 200, não representando uma boa estratégia após este limite. Este comportamento foi observado também nas demais topologias (Topologia 2 e Topologia 3).

## 6. Considerações Finais

Este trabalho aborda o problema da alocação de rota e recursos espectrais ciente da área em MONs. São consideradas topologias de rede que são divididas em três tipos de áreas: compreensivas, residenciais e comerciais, a respeito das quais há diferentes padrões de distribuição da carga do tráfego em períodos do tempo específicos. O algoritmo ALWacs é proposto para melhorar o desempenho da rede enquanto obtém a menor probabilidade de bloqueio de largura da banda em comparação com outras soluções cientes da área. A redução na taxa de bloqueio é verificada na rede, como um todo, assim como na maioria das áreas subdivididas. O ALWacs demonstrou o dobro de ganho em comparação com outro RSA ciente da área. Como trabalhos futuros, o objetivo é melhorar o desempenho da rede também considerando as classes e perfis de tráfego em cada uma das áreas de zoneamento da metro.

## Referências

Ayoub, O., Karandin, O., Ibrahimi, M., Castoldi, A., Musumeci, F., and Tornatore, M. (2022). Tutorial on filterless optical networks [invited]. *Journal of Optical Communi-*



**Figura 5. Probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos com  $k = 3$  no horário de 06h na Topologia 1 sendo (a) BBR em CA (b) BBR em RA e (c) BBR em OA.**

*cations and Networking*, 14(3):1–15.

- Braga, A., Passos, D., and Rocha, A. (2021). Mudança no perfil de tráfego de redes brasileiras em decorrência da pandemia pelo novo coronavírus. In *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 406–419, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Costa, L. R., de Sousa, L. S., de Oliveira, F. R., da Silva, K. A., Júnior, P. J. S., and Drummond, A. C. (2016). ONS: Optical Network Simulator - WDM/EON.
- Cugini, F., Porzi, C., Sambo, N., Bogoni, A., and Castoldi, P. (2016). Receiver architecture with filter for power-efficient drop&waste networks. In *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3. IEEE.
- de Sousa, L. S. and Drummond, A. C. (2022). Metropolitan optical networks: A survey on new architectures and future trends. *arXiv preprint arXiv:2201.10709*.
- Hadi, M. and Agrell, E. (2019). Joint power-efficient traffic shaping and service provisioning for metro elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(12):578–587.
- Hadi, M., Pakravan, M. R., and Agrell, E. (2019). Dynamic resource allocation in metro elastic optical networks using lyapunov drift optimization. *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(6):250–259.
- Layec, P., Dupas, A., Verchère, D., Sparks, K., and Bigo, S. (2017). Will metro networks be the playground for (true) elastic optical networks? *Journal of Lightwave Technology*, 35(6):1260–1266.

- Lord, A., Zhou, Y. R., Jensen, R., Morea, A., and Ruiz, M. (2016). Evolution from wavelength-switched to flex-grid optical networks. *Elastic Optical Networks*, pages 7–30.
- Pavon-Marino, P., Moreno-Muro, F., Garrich, M., Quagliotti, M., Riccardi, E., Rafel, A., and Lord, A. (2020). Techno-economic impact of filterless data plane and agile control plane in the 5g optical metro. *Journal of Lightwave Technology*, pages 1–1.
- Rottondi, C., Tornatore, M., Pattavina, A., and Gavioli, G. (2013). Routing, modulation level, and spectrum assignment in optical metro ring networks using elastic transceivers. *Journal of Optical Communications and Networking*, 5(4):305–315.
- Routray, S. K., Javali, A., Sharma, L., Gupta, J., and Sahoo, A. (2020). The new frontiers of 800g high speed optical communications. In *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, pages 821–825.
- Shen, G., Zhang, Y., Zhou, X., Sheng, Y., Deng, N., Ma, Y., and Lord, A. (2018). Ultra-dense wavelength switched network: A special eon paradigm for metro optical networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(2):189–195.
- Streit, A., Ribeiro, M., Leão, R., and e Silva, E. S. (2021). Efeito do confinamento causado pela pandemia covid-19 nos perfis de tráfego residencial. In *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 238–251, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Thyagaturu, A. S., Mercian, A., McGarry, M. P., Reisslein, M., and Kellerer, W. (2016). Software defined optical networks (sdons): A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4):2738–2786.
- Troia, S., Cibari, A., and Alvizu, R. (2019). Dynamic network slicing based on tidal traffic patterns in metro-core optical networks. In *2019 IEEE 20th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pages 1–7. IEEE.
- Uzunidis, D., Kosmatos, E., Matrakidis, C., Stavdas, A., and Lord, A. (2018). Dufinet: architectural considerations and physical layer studies of an agile and cost-effective metropolitan area network. *Journal of Lightwave Technology*, 37(3):808–814.
- Wang, R. and Mukherjee, B. (2014). Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, 11:83–91.
- Yan, B., Zhao, Y., Chen, W., and Zhang, J. (2020). Area-aware routing and spectrum allocation for the tidal traffic pattern in metro optical networks. *IEEE Access*, 8:56501–56509.
- Yan, B., Zhao, Y., Yu, X., Wang, W., Wu, Y., Wang, Y., and Zhang, J. (2018). Tidal-traffic-aware routing and spectrum allocation in elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(11):832–842.
- Yen, J. Y. (1971). Finding the k shortest loopless paths in a network. *management Science*, 17(11):712–716.