

# Política de Roteamento Ciente das Áreas e dos Clusteres 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 Sistemas de Informação (FACSI) –  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA)  
Marabá, PA – Brasil

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

**Abstract.** *Metropolitan Optical Network (MON) concentrate a large part of the traffic coming from the internet, as well as aggregate all the traffic coming from the access networks. The distribution of this traffic on the MON occurs in different ways and in different types of areas, either due to the population's activity pattern or the time of day. Thus, a traffic imbalance is perceived along the areas while many resources remain idle, increasing the service blocking rate. This work proposes the use of area-aware and cluster-aware routing and spectrum allocation algorithms. The proposed solution demonstrates twice the improvement of blocking results compared to area-agnostic routing algorithms.*

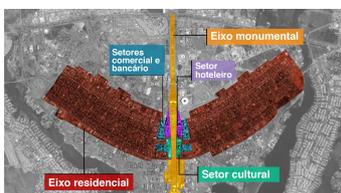
**Resumo.** *As redes ópticas metropolitanas (ROM)s concentram grande parte do tráfego que vem da internet, assim como agrega todo o tráfego proveniente das redes de acesso. A distribuição desse tráfego na ROM ocorre de diferentes maneiras e em diferentes tipos de áreas, seja em decorrência do padrão de atividades da população ou do horário do dia. Assim, um desequilíbrio do tráfego é percebido ao longo das áreas enquanto muitos recursos permanecem ociosos, aumentando a taxa de bloqueio dos serviços. Este trabalho propõe a utilização de algoritmos de roteamento e alocação de espectro ciente da área e de clusteres de áreas. A solução proposta demonstra o dobro de melhoria dos resultados de bloqueio em comparação com algoritmos agnósticos das áreas.*

## 1. Introdução

Os operadores de telecomunicação em Redes Ópticas Metropolitanas (ROM ou metro) têm sido cada vez mais desafiados a melhorar o desempenho da sua infraestrutura enquanto atendem as crescentes demandas de capacidade e velocidade das tecnologias disruptivas, como por exemplo, a Internet das Coisas (IdC) [de Sousa and Drummond 2023]. Os clientes desses operadores, principalmente grandes empresas e instituições, necessitam de largura de banda escalável e flexível para a manutenção dos seus negócios. Assim, a metro têm mesclado características da internet e das redes de acesso [Pavon-Marino et al. 2020, Troia et al. 2019]. O paradigma de computação em nuvem, com recursos centralizados nas redes de núcleo, tem seguido a tendência de modularizar-se em computação de borda e

afins, com natureza distribuída ao longo de toda a rede metro e acesso. O resultado dessas novas abordagens é uma maior variedade de densidades e escalas de padrões de interconexões [Kosmatos et al. 2023], granularidades de tráfego de dados (1 Gb/s [Shen et al. 2018] até 800 Gb/s [Routray et al. 2020]), diferentes modos de comunicação [Cugini et al. 2016] e perfis de tráfego [Uzunidis et al. 2018, Streit et al. 2021, Braga et al. 2021, Kosmatos et al. 2023].

Por ser um tipo de rede de dimensões comparáveis a grandes cidades/metrópoles, englobam áreas/bairros residenciais e comerciais que se destacam pelas diferentes movimentações das atividades humanas. Geralmente as classificações de áreas e *clusters* são feitas pelas empresas de telecomunicações, para que tais informações possam ser utilizadas como entrada para problemas de planejamento e projeto de infraestrutura de rede e de políticas de engenharia de tráfego. Devido a dinamicidade do comportamento dos seus habitantes, as áreas residenciais (RA - *residential areas*) gradualmente atingem o pico de concentração de pessoas a partir das primeiras horas da noite, que vai decaindo até os horários do início da manhã. Conseqüentemente, dentro dessa janela de horários essas pessoas geram tráfego de dados a partir dessas áreas, que leva ao maior consumo de recursos nos enlaces da rede nessas regiões, enquanto outros pontos da rede encontram-se ociosos. Da mesma forma, nos horários comerciais, quando a maioria das pessoas está frequentando seus locais de trabalho nas áreas de negócio (OA - *office area*) das cidades, a geração do tráfego de dados é maior do que em outras localizações. Este fenômeno é denominado tráfego de marés (*tidal-traffic*). O tráfego de marés 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 [Troia et al. 2019]. As áreas de transição entre CA e RA são denominadas de áreas compreensivas (CA - *comprehensive area*) e incluem locais frequentados para o lazer, bem como vias de transporte que interconectam todas as demais áreas, por onde ocorre grande migração populacional diariamente. A Figura 1 representa um exemplo de diferentes áreas no espaço geográfico de Brasília. Na figura destacam-se o eixo residencial (RA), setores comercial, bancário, hoteleiro (OA) e setores culturais e eixo monumental (CA). Observe que cada tipo de área está organizado em múltiplas regiões de mesma cor, que são consideradas os *clusters* de área.



**Figura 1. Variedade de áreas/setores em Brasília-DF [Brasil 2022]**

Enquanto é possível compreender o comportamento do tráfego de dados a partir da perspectiva da dinâmica social, há diversos e complexos problemas relacionados à engenharia de tráfego que precisam ser resolvidos pelos operadores de rede para melhor utilização dos recursos na metro. Dentre tais problemas pode-se destacar [Zhong et al. 2016, Hadi and Agrell 2019, Yan et al. 2020]: *i*) pode existir enorme *gap*

entre o pico de tráfego em uma área e o vale de tráfego em outra (ou *clusters* distintos), o que irá requerer soluções rápidas e flexíveis a um menor custo; *ii*) não há um modelo único de definição e organização dessas áreas. Há cidades que possuem uma única área comercial, assim como pode haver cidades com duas ou mais dessas áreas, isto é, vários *clusters* de área comercial, impondo múltiplos pontos críticos para o estrangulamento do tráfego de dados simultaneamente; *iii*) o aumento da adoção de serviços orientados a dados tem ocorrido mediante o surgimento de novas aplicações, as quais irão requerer melhor operação e gerenciamento dos recursos da rede [Sousa et al. 2022]; e *iv*) nesse ecossistema irá predominar grande heterogeneidade de tecnologias com diferentes padrões de interconexão [Kosmatos et al. 2023], exigindo estratégias multicamadas e multidomínios.

O sistema de redes de transporte baseado em Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks* - EON) é uma possível solução a ser adotada no futuro no contexto da metro, através da arquitetura *Metro Elastic Optical Networks* (MEON) [de Sousa and Drummond 2023]. A EON é capaz de prover maior quantidade de recursos otimizados para os diversos perfis de aplicações, mas até o momento a maior parte das soluções estudadas não consideram as informações sobre essas áreas/*clusters* na tomada de decisão. Em [Yan et al. 2020] é proposto um algoritmo de roteamento cientes das áreas, que é capaz de reduzir o bloqueio em toda a rede, mas não ficam claros os resultados particulares a cada área/*cluster*. Este trabalho aborda dois outros algoritmos cientes, denominados solução de roteamento ciente das área (*Metro Area Aware Routing Solution* - MAARS) e dos *clusters* metropolitanos (*Metro Cluster Aware Routing Solution* - MCARS). Ambas as soluções apresentam resultados duas vezes melhor do que o algoritmo apresentado em [Yan et al. 2020]. Além disso, as simulações mostraram que frequentemente o MAARS resulta em melhor desempenho que o MCARS em termos de bloqueio dos serviços.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta uma revisão da literatura recente sobre o fenômeno do tráfego de marés em redes metro ópticas; a Seção 3 descreve alguns conceitos básicos para o entendimento da proposta que será apresentada; a Seção 4 apresenta o problema da alocação de recursos na metro óptica, destacando as políticas MAARS e MCARS (subseção 4.1) e a complexidade algorítmica dessas propostas (subseção 4.2); a Seção 5 descreve a metodologia da simulação, cenários e apresentação dos resultados; e por fim a Seção 6 apresenta as conclusões obtidas.

## 2. Revisão da Literatura

A forma como as operadoras gerenciam o tráfego nas suas redes metro ópticas deve ser adaptada às condições específicas desse segmento da rede, considerando informações de utilização dos recursos no espaço e o tempo. A literatura recente ([Hadi et al. 2019, Hadi and Agrell 2019, Yan et al. 2018, Yan et al. 2020]) tem investigado políticas que empreguem tomadas de decisão fundamentadas nas taxas de tráfego para otimização no uso dos recursos em redes ópticas metropolitanas baseadas em EON. Seguindo esta tendência, a proposta de [Sousa et al. 2022] utiliza ponderamento dos enlaces baseados em pesos que podem representar o nível de tráfego local em MEON. Em comum, todas essas soluções exploram o problema de roteamento e alocação de espectro (RSA), mas apenas [Yan et al. 2020] e [Sousa et al. 2022] destacam RSA ciente das áreas da metro, enquanto todas as demais soluções são agnósticas das áreas. Já em [Kosmatos et al. 2023] uma aplicação de rede definida por *software* possibilita a criação

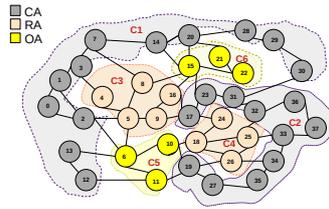
de fatias de conectividade fim-a-fim com reconhecimento de qualidade de serviço, ajustando em tempo real a configuração fixa aos parâmetros variáveis do tráfego, embora esta seja uma solução para um ambiente coabitado por múltiplas tecnologias de transmissão, e não apenas transmissão óptica. Cenários com essa variedade de interconexões aumentam a complexidade do problema. Com isso, novas arquiteturas de rede metro são pensadas para promover, com baixo custo, a melhoria e escalabilidade da maioria dos serviços [de Sousa and Drummond 2023].

O presente trabalho sugere formar caminhos baseando-se na estratégia de selecionar previamente os enlaces da rede menos frequentemente utilizados por outras requisições, e que potencialmente passam por outras áreas da rede menos congestionada com o tráfego. Por se tratar de uma bordagem ciente da área e referir-se ao domínio óptico, comparam-se as soluções com outras de igual natureza do problema ([Yan et al. 2020] e [Sousa et al. 2022]).

### 3. Conceitos Básicos

As metros são o ecossistema onde o fluxo de dados proveniente das redes de acesso é agregado para ser encaminhado para a *internet* pelas redes de núcleo, ao mesmo tempo em que atua como distribuidor do tráfego vindo da *internet*. Geralmente as topologias da metro possuem maior quantidade de nós do que as redes de núcleo, e consequentemente enlaces. A escalabilidade dessas arquiteturas de rede tem demandado maiores investimentos para apoiar a escalabilidade da infraestrutura, em topologias que tem evoluído do formato em anel para o formato em malha [de Sousa and Drummond 2023].

Devido a separação de tarefas para serem executadas na metro, uma porção da rede é denominada metro-*core* (MC), com arquitetura e equipamentos mais robustos, enquanto que outra recebe o nome de metro-acesso (MA), dotada de equipamentos de menor custo [Shen et al. 2018]. Deste modo, é possível equipar cada um desses segmentos com equipamentos adequados a essas tarefas e com melhor custo-benefício, ao invés de elevar as despesas de capitais equipando igualmente todos os nós com equipamentos de alto custo e robustez [de Sousa and Drummond 2023]. 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]. Os recursos ópticos na camada de transporte da metro podem ter sua capacidade melhorada com a implantação da tecnologia de grade flexível, como EON, por exemplo, que possui granularidade espectral mais fina, em torno de 6.25 GHz [Hadi et al. 2019] ou 12.5 GHz [Yan et al. 2020, Hadi and Agrell 2019], aumentando consideravelmente o número de canais para antedimento dos serviços. Esta é a principal justificativa na literatura para a adoção de grade flexível no segmento metro [Shen et al. 2018, de Sousa and Drummond 2023]. Para a alocação de recursos que atendam uma conexão, é necessário encontrar uma rota de enlaces na rede que tenha recursos espectrais disponíveis. Com essa tecnologia, o atendimento de uma requisição está condicionado às seguintes restrições: *i*) os recursos espectrais devem estar dispostos de forma contínua na mesma faixa de espectro durante todo o percurso de um fluxo; *ii*) esses mesmos recursos devem ser alocados de maneira contígua em cada um dos enlaces da rede que fazem parte do caminho; *iii*) os recursos de duas demandas distintas não devem se sobrepor; e *iv*) o atendimento de uma demanda requer banda de guarda separando o seu canal dos demais.



**Figura 2. Organização das áreas e *clusters* na topologia considerada em [Yan et al. 2020]**

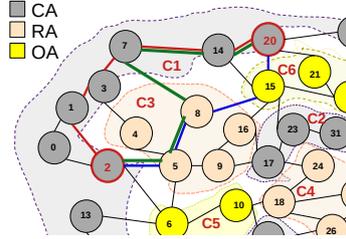
Apesar disso, o aumento de recursos espectrais não resolve todos os problemas do tráfego da metro. Nestas redes, a agregação e distribuição do tráfego ocorre de maneira desigual ao longo do dia nas áreas CA, RA e OA, mostradas na Figura 2. Em grandes cidades, um mesmo tipo de área pode se apresentar com múltiplas recorrências, sendo cada uma das ocorrências denominadas de *clusters*. Enquanto as áreas são caracterizadas por região de mesma cor na Figura 2, cada *cluster* de área está identificado de  $C1$  até  $C6$ . Existem dois *clusters* de cada tipo de área.

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 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]. Existem modelos que podem determinar como ocorre a distribuição do tráfego nessas áreas. 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 as ROMs por indicar o nível de tráfego de dados em cada nó da rede, ilustrando as condições reais de distribuição desigual deste tráfego.

#### 4. Soluções de Roteamento 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. Entretanto, esta não é a realidade da metro. Existem informações adicionais relacionadas a engenharia de tráfego na metro que poderiam ser de grande relevância e aproveitamento na determinação de soluções de melhor desempenho. A Figura 3 mostra um fragmento de uma metro, com suas diversas áreas e *clusters*, que pode apresentar grandes variações de volume de tráfego ao longo do dia. Em destaque há um caminho estabelecido entre os nós 2 e 20, fazendo parte do *Cluster C1*, que é uma microrregião CA. Como ambos os nós fazem parte da mesma área e *cluster*, há possibilidades de alocação de um caminho óptico exclusivamente contido nessa própria região, como o caminho em vermelho mostrado na figura. Entretanto, outros potenciais caminhos podem ser estabelecidos incluindo-se enlaces que passem por

nós de *clusters* diferentes, como os caminhos em verde e azul. Essa estratégia de caminhos com enlaces em múltiplos *clusters* pode contribuir com o desafogamento do tráfego, uma vez que é possível passar por locais e horários onde há recursos ociosos. Sabe-se que os algoritmos agnósticos, em geral, não possuem esse tipo de conhecimento.



**Figura 3. Estabelecimento de conexões aos longa das áreas e *clusters* de área**

Uma solução que toma decisões com base no conhecimento sobre as áreas, é capaz de incluir no seu caminho enlaces que pertençam a outras áreas com potencial ociosidade nos recursos, uma vez que essa área é intersectada por nós de áreas distintas. Já uma solução de roteamento ciente dos *clusters* inicialmente elege caminhos circunscritos na mesma região, reduzindo a latência de atendimento dos serviços (Figura 3). 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 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.
- $W(v^a)$ : peso associado a cada nó da topologia,  $(v^a) \in V$ . Inicialmente, cada nó é inicializado com peso 1. Sempre que um nó é usado como parte de um caminho óptico, seu peso é aumentado em uma unidade.
- $e_i \in E$ : o enlace  $i$ -ésimo em  $E$ , onde  $e((v^a)_i, (v^a)_j, W(v_j^a))$ , ou seja, é um enlace entre um par de nós  $(v_i, v_j)$  com  $i \neq j$ . Cada  $e_i$  tem um certo peso  $W$ , com  $W \in \mathbb{N}$ , inicializado como 1. A aresta herda o peso correspondente ao índice de vértice  $j$ , o sorvedouro desta respectiva aresta.
- $r(source, destination, requestedSlots())$ : solicitação de conexão entre um determinado par de origem e destino  $(source, destination)$ , ambos  $v_c^a$  distintos. Esta requisição solicita um certo número de frequência *slots*  $(requestedSlots())$ .
- $p \in P$ : é o caminho pertencente ao conjunto de caminhos de roteamento viáveis para atender a requisição  $r$ , onde  $|P| = k$ , com  $k \in \mathbb{N}$ .
- $SA(r, p, r.requestedSlots())$ : é a alocação de *slots* espectrais para a requisição  $r$  no caminho  $p$ , correspondente a um certo número de *slots* designados como  $r.requestedSlots()$ , de acordo com as restrições de continuidade e contiguidade.

#### 4.1. Algoritmos Propostos

As soluções de roteamento abordadas no contexto deste trabalho são denominadas solução de roteamento ciente das áreas (MAARS) e dos *clusters* metropolitanos

(MCARS). A estratégia dos algoritmos é ilustrada na Figura 3 e formalizada no Algoritmo 1, sob a perspectiva do MCARS.

A estratégia do Algoritmo 1 promove a alocação mais distribuída de recursos ao longo da topologia. Pretende-se escolher os caminhos compostos por enlaces que conectam estrategicamente nós menos utilizados, isto é, menos frequentemente selecionados para composição de caminhos ópticos. Na Figura 3, são apresentados três caminhos possíveis, os quais são mostrados nas cores vermelho, verde e azul, traçados do nó 2 ao nó 20. Assume-se que a área cinza apresenta pico de tráfego no momento da seleção de rota, e além disso, ambos os nós, origem e destino, estão contidos no mesmo *cluster* de área. Os três caminhos poderiam ser selecionados como o caminho mais curto para atender a solicitação, mas o MCARS seleciona o caminho em azul ou verde, em detrimento do caminho vermelho, por conter nós de outras áreas.

Dessa maneira, o Algoritmo MCARS (Algoritmo 1) inicialmente obtém o *cluster* da origem  $C_s$  e do destino  $C_d$  (linha 1), assim como o número de *slots* requisitados pela chamada (linha 2). O laço das linhas 4 – 6 inicializa o peso de todos os vértices com valor 1 (linha 5). O conjunto de possíveis caminhos  $P$  é inicializado com vazio (linha 7). Após a comparação entre os *clusters* no laço de repetição inicializado na linha 8, caso a origem e o destino da requisição estejam contidos no mesmo *cluster*, o algoritmo aciona na linha 9 a função que atualiza os pesos dos nós de forma adaptativa. Como esses nós são usados no roteamento, seja como origem, destino ou nó intermediário (*bypass*), o peso é sempre incrementado em 1 a cada nova utilização, e nunca é decrementado. Com esta estratégia distribui-se o uso dos nós ao longo da rede de forma equilibrada. O *K-Shortest Paths* (KSP) é o algoritmo iterativo de caminhos mínimos de Yen [Yen 1971] para calcular os  $k$  menores caminhos sem ciclos. O grafo ponderado é utilizado como entrada para a função  $KSP(G, k, C_s, C_d)$  da qual obtém-se o conjunto de caminhos candidatos (linha 10). Caso a origem e o destino não pertençam ao mesmo *cluster* (linhas 11 – 14), o conjunto de caminhos candidatos  $P$  é ordenado utilizando a estratégia do *Complete Sharing* (CS)[Wang and Mukherjee 2014], para selecionar enlaces cujos *slots* de frequência disponíveis estejam mais próximos do índice zero (*First-Fit*), e não necessariamente selecionar a rota viável mais curta (linha 13). Com o conjunto de caminhos candidatos devidamente obtidos, o laço das linhas 15 – 22 verifica se as restrições de alocação de espectro são atendidas. Em caso positivo, a requisição é aceita (linha 17). Caso contrário, a requisição é bloqueada (linha 20).

A estratégia do primeiro caso pondera os enlaces da rede de maneira a evitar os enlaces mais frequentemente utilizados. Já a estratégia do segundo caso visa atender requisições entre diferentes *clusters* com caminhos potencialmente maiores de modo a equilibrar a distribuição da carga na rede, o que aumenta as possibilidades de sucesso no atendimento de uma requisição. Outra versão do algoritmo MCARS considerando as áreas ao invés dos *clusters*, denominada MAARS é obtida com algumas modificações no Algoritmo 1. Para tanto, altera-se as linhas 2, 8, 10 e 12 para indicar as áreas às quais pertencem a origem ( $A_s$ ) e o destino ( $A_d$ ). Apesar de poucas adaptações, as diferenças entre o MCARS e MAARS refletem a busca por soluções que consideram regiões únicas nas quais o caminho mínimo não passe por outra região, no caso do *cluster*, ou passe por pelos menos uma região, no caso das áreas.

---

**Algoritmo 1** MCARS( $G = (V, E), r, k, w$ )

---

```
1:  $(v_c^a)_s \leftarrow r.source(), (v_c^a)_d \leftarrow r.destination()$ 
2:  $(C_s, C_d) \leftarrow getCluster(((v_c^a)_s), (v_c^a)_d)) \triangleright$  Ou  $(A_s, A_d) \leftarrow getArea(((v_c^a)_s), (v_c^a)_d)$ ,  
   no caso do MAARS
3:  $NumSlots \leftarrow r.requestedSlots()$ 
4: para cada  $v \in G$  faça
5:    $w(v) \leftarrow 1$ 
6: fim para
7:  $P \leftarrow \{0\}$ 
8: se  $C_s == C_d$  então  $\triangleright$  Ou  $A_s == A_d$ , no caso do MAARS
9:    $G \leftarrow ComputeFrequencyOfUse(G(V, E, W))$ 
10:   $P \leftarrow KSP(G, k, C_s, C_d)$   $\triangleright$  Ou  $P \leftarrow KSP(G, k, A_s, A_d)$ , no caso do MAARS
11: senão
12:   $P \leftarrow KSP(G, k, C_s, C_d)$ 
13:   $CompleteSharingSort(P)$ 
14: fim se
15: para cada  $p \in P$  faça
16:   se  $SA(p, NumSlots)$  é satisfeita então
17:      $Aceita(r)$ 
18:      $Break()$ 
19:   senão
20:      $Bloqueia(r)$ 
21:   fim se
22: fim para
```

---

## 4.2. Análise da Complexidade do MAARS e MCARS

A complexidade de tempo dos algoritmos MAARS/MCARS é analisada da seguinte forma. A inicialização dos pesos dos vértices é feita no laço das linhas 4 – 6, sendo portanto  $O(V)$ . Para a rotina *ComputeFrequencyOfUse* (linha 9) é necessário avaliar e atribuir o peso de todos os nós, então  $O(V)$ . Para a rotina *KSP* (linhas 10 ou 12), foi empregado o algoritmo de *Yen*, portanto  $O(k * |V|(|E| + |V| \log |V|))$ . O *CompleteSharingSort* (linha 13) avalia qual é o menor índice de *slot* disponível entre os  $k$  caminhos disponíveis em  $P$ . Para isso, é necessário analisar todos os *slots* ( $|S|$ ) de todas as fibras disponíveis ( $|E|$ ). Assim, a complexidade de tempo é  $O(|S| * |E| * k)$ . Finalmente, a rotina *SA* (linha 16) analisa a alocação de espectro nos enlaces para cada *slot*, portanto  $O(|S| * |E|)$ . Substituindo a soma de todos os termos menores pelos maiores e cortando as constantes assintoticamente, temos que a complexidade de tempo total de MAARS/MCARS é  $O(((k * |V|(|E| + |V| \log |V|) + (|S| * |E| * k)))$ .

## 5. Simulação e Análise de Resultados

De acordo com [Yan et al. 2020], os algoritmos *Min-Hop K-shortest path routing* (MHK) e *Occupied-Slots-as-Weight K-shortest path routing* (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 executada com requisições que chegas-

sem 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

Para realização da simulação dos algoritmos foi utilizada a topologia identificada em [Yan et al. 2020], que é mostrada na Figura 2. A referida topologia é formada por 38 nós e 60 enlaces unidirecionais e representa uma metro implantada em Xangai. São configurados 100 *slots* de frequência por enlace, com largura de banda de 12.5 GHz cada um. Utiliza-se banda de guarda equivalente a 2 *slots*. A modulação utilizada é a QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). Para representar o tráfego de marés na metro foram selecionados dois horários na linha do tempo, para os quais foram configurados padrões de distribuição de tráfego por área de acordo com o modelo MSTM [Yan et al. 2020]. Esses horários são 10h e 18h, nos quais o tráfego de dados atinge um pico na OA, afetando o desempenho da rede nessa região. 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 10h o carga será de  $1.5x$  em CA,  $1.3x$  em RA e  $1.9x$  em OA. Foram configuradas 100.000 chamadas dinâmicas de acordo com a distribuição de *Poisson* e um número de 50 a 300 chegadas, com incrementos de 50. Todas as conexões são bidirecionais e os nós de origem e destino das solicitações são selecionados aleatoriamente. Nas solicitações de conexão, a largura de banda solicitada pelas conexões é aleatório entre [1, 2, 3] *slots* de frequência. 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.

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

$\mathcal{T}$	$\rho(\text{CA})$	$\rho(\text{RA})$	$\rho(\text{OA})$
10h	0.5	0.3	0.9
18h	0.8	0.5	0.3

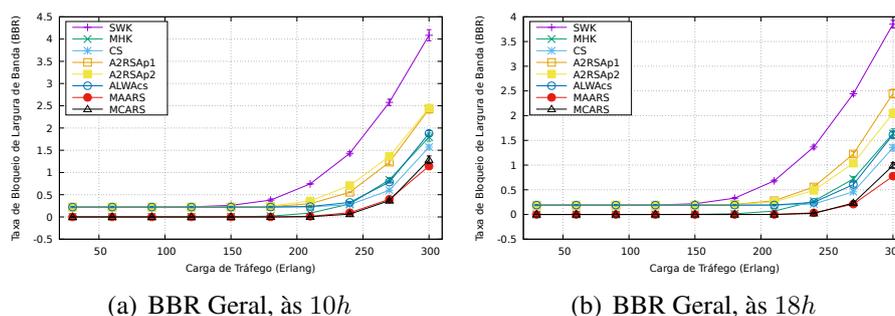
### 5.2. Avaliação dos Resultados

Para avaliação de desempenho da solução proposta, foram implementadas duas estratégias de ciência dos nós, denominadas MAARS e MCARS. Ambas as estratégias foram comparadas com os algoritmos igualmente cientes ALWacs [Sousa et al. 2022], e os complementares A2RSAp1 e A2RSAp2 [Yan et al. 2020]. De acordo com a literatura da área, as soluções cientes foram comparadas com soluções agnósticas consideradas como *benchmarks*, as quais são os algoritmos MHK e SWK [Yan et al. 2020], bem como com o CS [Wang and Mukherjee 2014]. A métrica definida para comparação foi a taxa de

bloqueio de largura de banda (do inglês, *bandwidth blocking ratio* - BBR) das requisições, que será abordada de forma geral na rede como um todo (Subseção 5.2.1), específico por área (Subseção 5.2.2) e por *cluster* de área apresentada a seguir (Subseção 5.2.3). Destaca-se que, 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, bem como por alguns *clusters*, a fim de verificar as diferenças de comportamento dessas soluções sob diferentes perspectivas.

### 5.2.1. Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) Geral

Os gráficos mostrados na Figura 4 mostram os resultados de BBR geral para cada nível de carga da rede no horário de 10h (Figura 4 (a)) e 18h (Figura 4 (b)). Destaca-se que, de uma forma geral, o bloqueio é relativamente maior na parte da manhã, com leve redução às 18h, e assim, todos os algoritmos testados tiveram uma queda de desempenho nesse cenário. Além disso, houve uma maior distância entre os resultados nesse horário das 18h em comparação com os resultados obtidos no horário das 10h.



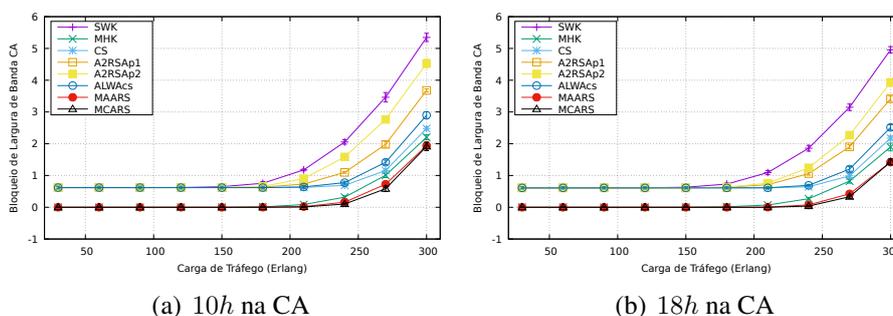
**Figura 4. Probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) geral dos algoritmos com  $k = 3$  no horário de (a) 10h e (b) 18h.**

A política MAARS apresentou resultados duas vezes melhores com relação a redução do bloqueio em comparação com o algoritmo agnóstico CS. Sobre utilizar a estratégia por *clusters* ou por área, enquanto a carga da rede for inferior a 260, não há grandes diferenças em se utilizar o MAARS ou MCARS. Com o aumento da carga na rede, torna-se mais vantajoso utilizar a estratégia de seleção que verifica as áreas das quais fazem parte a origem e o destino. O ALWAcs, apesar de ser ciente, tem uma taxa de bloqueio maior que chega a ser comparada com o o algoritmo agnóstico MHK. Nos referidos horários, tanto o MAARS quanto o MCARS são melhores soluções do que o A2RSAp1 e A2RSp2, demonstrando que para a melhoria de desempenho geral na rede, selecionar rotas mais longas pode ser uma tática mais bem sucedida do que a minimização do número de nós nas áreas residenciais e de negócios.

### 5.2.2. Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) por Área

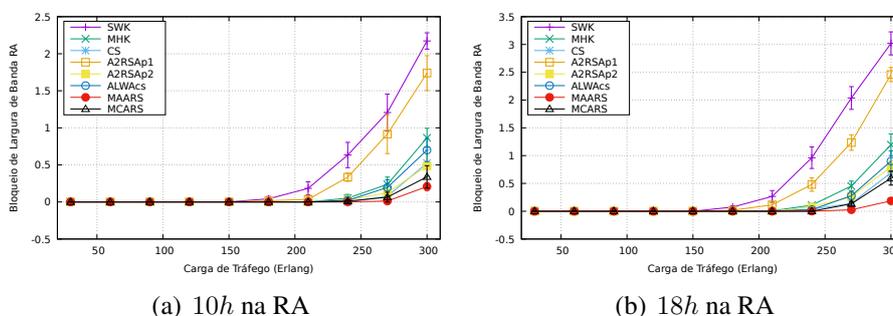
A seguir são mostrados os resultados de BBR por área nos horários comerciais de 10h e 18h: CA (Figura 5), RA (Figura 6) e OA (Figura 7). Em cada caso são analisados os resultados para as requisições que tenham origem e destino na mesma área. Na CA,

conforme mostra os gráficos 5(a) e 5(b), durante o horário comercial é verificado que as políticas MAARS e MCARS tem resultados muito próximos, com uma diferença inferior a 0.1% quando a carga varia entre 230 e 275, entretanto o MCARS apresenta tendência de crescimento mais rápido em termos de bloqueio. Observa-se que ambas as políticas apresentadas nesta trabalho são, pelo menos duas vezes melhor do que qualquer outra solução ciente.



**Figura 5. Probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) na área intermediária (CA) no horário de (a) 10h e (b) 18h**

A área residencial (RA), cujos resultados são mostrados na Figura 6, é afetada com um volume crescente de tráfego nesta janela de horário comercial. A melhor estratégia continua sendo a MCARS, que chega a apresentar quase o dobro de melhoria em comparação com o A2RSAp2.



**Figura 6. Probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) na área residencial (RA) no horário de (a) 10h e (b) 18h.**

Já na área OA (Figura 7 ), as políticas MAARS e MCARS atingem resultados próximos ao do algoritmo A2RSAp2, sendo que o MCARS resulta em maior bloqueio de largura de banda do que o A2RSAp1. O MAARS é duas vezes melhor do que o algoritmo agnóstico CS, sendo que este padrão de resultado é observado às 10h e às 18h.

Conforme mostram os resultados por área, às 10h e 18h, as taxas de bloqueio são muito semelhantes nas áreas RA e OA para todos os algoritmos testados. Já na CA, o algoritmo A2RSAp1 apresenta uma diminuição acentuada de desempenho, indicando que se trata de uma solução instável. Outros resultados gerados e que não estão presentes no escopo deste trabalho são o BBR de requisições entre áreas distintas, que apresentam taxas de BBR ligeiramente menores, uma vez que o estabelecimento de requisições em

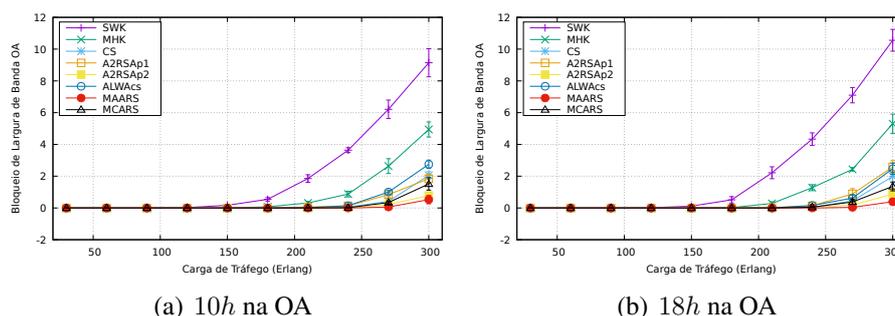


Figura 7. Probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) na área de negócios (OA) no horário de (a) 10h e (b) 18h.

regiões distintas utilizando o MAARS, é feito com caminhos melhores contrabalanceados em termos de cargas de tráfego.

### 5.2.3. Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) Por *Clusters*

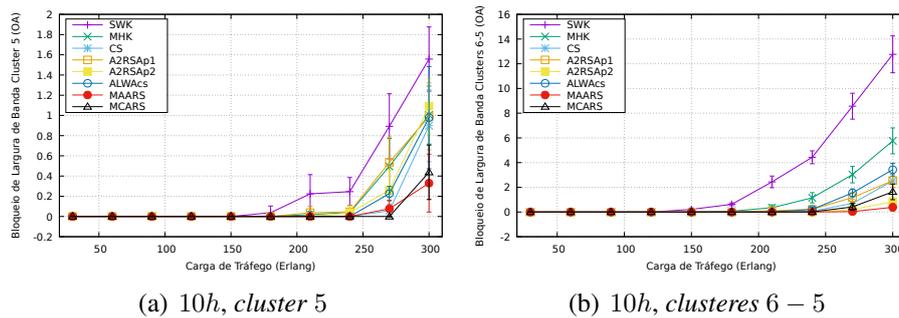
A maneira mais detalhada de aplicar as estratégias de roteamento é considerando-se as regiões da topologia como *clusters*. A simulação levou em consideração os *clusters* configurados na quantidade e sequência mostrada na Figura 2. Como às 10h há uma maior predominância de aumento do tráfego na área OA, devido ao horário comercial, e às 18h ocorre uma ligeira diferença devido ao gradual deslocamento das pessoas saindo dos seus trabalhos na OA e locomovendo-se ao longo da CA, selecionou-se alguns resultados entre *clusters* dessas regiões. Entretanto, foram gerados resultados entre todas as unidades de *clusters*, e que não são apresentados neste trabalho devido as limitações de espaço.

Os gráfico da Figura 8 mostra os resultados para o horário de 10h. O gráfico 8 (a) exhibe os resultados do tráfego originado e destinado ao *cluster* 5, na OA. Todos os algoritmos apresentam rápida elevação na taxa de bloqueio a partir da carga 230. O MCARS, que toma decisões baseadas nos *clusters* segue com menor taxa de bloqueio até a carga 280, mas com o contínuo aumento do tráfego, o MAARS demonstra ser melhor. Os algoritmos MCARS/MAARS utilizam o CS para requisições cruzadas entre os *clusters* (Figura 8 (b)), atingindo uma taxa de bloqueio máxima de 2% com uma carga de 300. para as 18h os resultados encontrados apresentam o mesmo comportamento das 10h, porém, com resultados menores de bloqueio.

Com esses resultados verifica-se que o MCARS é uma boa solução a ser aplicada para melhor utilização dos recursos em um mesmo *cluster* de área, quando a carga na rede é inferior a 280, enquanto que, na maioria dos casos, o MAARS resulta em menor taxa de bloqueio. Como o MAARS resulta em caminhos maiores do que o MCARS para as requisições no mesmo *cluster*, conseqüentemente ocorre o aumento da latência no atendimento dos respectivos serviços.

## 6. Considerações Finais

Este trabalho aborda o problema da alocação de rota e recursos espectrais ciente da área em ROMs, considerando as segmentações da topologia da rede em áreas



**Figura 8. Probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) no horário de 10h (a) no cluster 5 (OA), bem como (b) entre clusters 6-5, ambos na OA.**

e *clusters* de áreas, na forma de regiões que apresentam distintos padrões de tráfego em variados horários do dia. São consideradas topologias de rede com três tipos de áreas: compreensivas, residenciais e comerciais. São propostas duas políticas para resolver esse problema, denominados solução de roteamento ciente das área (*Metro Area Aware Routing Solution - MAARS*) e dos *clusters* metropolitanos (*Metro Cluster Aware Routing Solution - MCARS*). Ambas as estratégias foram comparadas com os algoritmos igualmente cientes ALWacs [Sousa et al. 2022], e os complementares A2RSap1 e A2RSap2 [Yan et al. 2020]. De acordo com a literatura da área, as soluções cientes foram comparadas com soluções agnósticas consideradas como *benchmarks*, as quais são os algoritmos MHK e SWK [Yan et al. 2020], bem como com o CS [Wang and Mukherjee 2014]. O MAARS e MCARS apresentam resultado duas vezes melhor do que o algoritmo apresentado em [Yan et al. 2020]. A redução na taxa de bloqueio é verificada na rede, como um todo, assim como na maioria das áreas subdivididas e dos respectivos *clusters*.

## Referências

- 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.
- Brasil, B. N. (2022). Brasília 60 anos: como a realidade transformou a cidade idealizada por Lúcio Costa e Niemeyer.
- Cugini, F., Porzi, C., Sambo, N., Bogoni, A., and Castoldi, P. (2016). Receiver architecture with filter for power-efficient drop&waste networks. In *2016 IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3.
- de Sousa, L. S. and Drummond, A. C. (2023). Metropolitan optical networks: A survey on single-layer architectures. *Optical Switching and Networking*, 47:100719.
- 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.

- Kosmatos, E., Matrakidis, C., Uzunidis, D., Stavdas, A., Horlitz, S., Pfeiffer, T., Lord, A., and Riccardi, E. (2023). Real-time orchestration of qos-aware end-to-end slices across a converged metro and access network exploiting burst-mode technology. *J. Opt. Commun. Netw.*, 15(1):1–15.
- 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.
- 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.
- Sousa, L., Costa, L., and Drummond, A. (2022). Solução ciente da Área para alocação de recursos em redes Ópticas metropolitanas. In *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pages 363–376, Porto Alegre, RS, Brasil.
- 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 (SBRC)*, pages 238–251, Porto Alegre, RS, Brasil.
- 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.
- 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.
- Zhong, Z., Hua, N., Tornatore, M., Li, Y., Liu, H., Ma, C., Li, Y., Zheng, X., and Mukherjee, B. (2016). Energy efficiency and blocking reduction for tidal traffic via stateful grooming in ip-over-optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(3):175–189.