



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Redes Ópticas Metropolitanas: Arquiteturas e Engenharia de Tráfego

Léia Sousa de Sousa

Tese apresentada como requisito parcial para
conclusão do Doutorado em Informática

Orientador
Prof. Dr. André Costa Drummond

Brasília
2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SS725r Sousa de Sousa, Leia
Redes Ópticas Metropolitanas: Arquiteturas e Engenharia
de Tráfego / Leia Sousa de Sousa; orientador André Costa
Drummond. -- Brasília, 2023.
228 p.

Tese(Doutorado em Informática) -- Universidade de
Brasília, 2023.

1. Rede Metropolitana. 2. Rede Óptica. 3. Arquitetura de
Redes. 4. Engenharia de Tráfego. I. Costa Drummond, André ,
orient. II. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus avós maternos, Maria Rosa (*in memoriam*) e Juvenal (*in memoriam*), que muito me estimularam a correr atrás dos meus objetivos.

Aos meus pais, Ana Amélia e Raimundo, pelos incentivos e por todo o trabalho duro realizado em função da minha formação.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por toda força e iluminação durante esta jornada.

Agradeço à minha família por torcerem pelo meu sucesso, em especial minhas irmãs Aline e Letícia, assim como todos os meus sobrinhos. Ao meu noivo, Alex, por todo carinho, paciência e compreensão dispensados a mim.

Agradeço ao meu orientador, Professor André Drummond, pelos quase 10 anos de parceria e contribuição com a minha formação, especialmente por ter me apoiado em momentos de grande dificuldade.

Agradeço aos amigos que a Universidade de Brasília (UnB) me proporcionou Lucas Rodrigues, Jeremias, Nilson Guerin, Ítalo, Guilherme, Paulo, Amanda, Paula, Ariane, Gustavo, Henrique, e outros não citados mas igualmente importantes, os quais levarei para a vida.

Sou grata também aos meus colegas de trabalho na Unifesspa, pelo apoio à continuidade do meu curso de doutorado.

Agradeço a todos os meus professores e minhas professoras da UnB, em especial, as professoras Célia, Alba e Maria Emília, por toda prestatividade e acolhimento.

Resumo

Redes ópticas metropolitanas (do inglês *Metropolitan Optical Network* - MON) são redes de comunicação de alta velocidade que interconectam diferentes locais em uma área metropolitana. Diferentes tipos de aplicações são oferecidas aos clientes através das MONs, desde aplicações de computação em nuvem, cada vez mais próximas dos usuários final, até os recentes serviços de Internet das Coisas. Essas aplicações estão gerando demandas crescentes de clientes empresariais e privados por serviços de largura de banda escaláveis, flexíveis, transparentes, com velocidade de terabit e personalizados. As MONs utilizam tecnologia de fibra óptica para transmitir dados em altas velocidades e a partir de qualquer ponto da sua infraestrutura. Diferentemente das redes ópticas de núcleo, as MONs apresentam grande variedade de granularidade de serviços, com arquiteturas e perfis de tráfego heterogêneos e desbalanceada distribuição dos fluxos de tráfego ao longo dos seus nós. Devido a isso, as MONs devem ser tratadas de maneira diferente. Para os provedores de rede, é de grande importância determinar as regiões existentes, tais como as áreas residenciais e áreas de negócios, de modo que se possa analisar o comportamento do tráfego local, propondo intervenções na infraestrutura dos pontos críticos da rede. Atualmente, as MONs estão passando por grandes transformações que incluem a adoção de uma variedade de taxas de transmissão, subdivisão em vários níveis hierárquicos e atribuição de novos papéis aos variados nós. Este trabalho apresenta um levantamento sobre as novas arquiteturas MONs propostas, tanto mono quanto multicamadas. Além disso, são discutidas soluções de engenharia de tráfego para MONs baseadas em Redes Ópticas Elásticas (do inglês *Metropolitan Elastic Optical Network* - MEON), analisando soluções cientes da área que resultam em menor bloqueio de largura de banda (do inglês *Blocking Bandwidth Ratio* - BBR) nas redes. Além da métrica de BBR geral, este trabalho considera o BBR por área e BBR por *cluster* de área, que são métricas ainda não identificadas na literatura científica atual. As soluções propostas alcançam o dobro de melhorias em comparação com outras soluções cientes da literatura, em termos de bloqueio de largura de banda.

Palavras-chave: Rede Metropolitana, Rede Óptica, Arquitetura de Redes, Engenharia de Tráfego

Abstract

Metropolitan Optical Networks (MONs) are high-speed communication networks that interconnect different locations in a metropolitan area. Different types of applications are offered to customers through MONs, from cloud computing applications, increasingly closer to the end user, to the recent Internet of Things services. These applications are driving increasing demands from enterprise and private customers for scalable, flexible, transparent, terabit-speed, and personalized bandwidth services. MONs use fiber optic technology to transmit data at high speeds and from any point in your infrastructure. Unlike core optical networks, MONs have a wide variety of service granularity, with heterogeneous architectures and traffic profiles and an unbalanced distribution of traffic flows along their nodes. Because of this, MONs must be handled differently. For network providers, it is of great importance to determine the existing regions, such as residential areas and business areas, so that the behavior of local traffic can be analyzed, proposing interventions in the infrastructure at the critical points of the network. Currently, MONs are undergoing major transformations that include the adoption of a variety of transmission rates, subdivision into several hierarchical levels, and assignment of new roles to the various nodes. This work presents a survey of the proposed new MONs architectures, both single and multi-layered. In addition, traffic engineering solutions for MONs based in Elastic Optical Networks (EONs), called MEONs, are discussed, analyzing area-aware solutions that result in lower Bandwidth Blocking Rate (BBR) on networks. In addition to the general BBR metric, this work considers BBR by area and BBR by cluster, which are metrics not yet identified in the current scientific literature. The proposed solutions achieve twice the improvements compared to other aware solutions in the literature in terms of blocking bandwidth.

Keywords: Metropolitan Network, Optical Network, Network Architecture, Traffic Engineering

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	6
1.2	Contribuições	6
1.3	Publicações Relacionadas a Tese	7
1.4	Demais publicações	7
1.5	Organização da Tese	8
2	Conceitos Básicos	9
2.1	Redes Ópticas Metropolitanas	9
2.1.1	Sistemas de Transmissão nas Redes Ópticas Metropolitanas	10
2.1.2	Componentes das Arquiteturas Metro	14
2.1.3	Classificação de Redes com Respeito à Utilização de Filtros	24
2.1.4	Topologias de Rede	25
2.2	Redes Ópticas Elásticas	28
2.2.1	Arquitetura EON	29
2.2.2	Roteamento e Alocação de Espectro	34
2.2.3	Padrões, Classes e Perfis de Tráfego	38
2.3	Tendências Futuras	40
2.4	Resumo Conclusivo	48
3	Arquiteturas das Redes Ópticas Metropolitanas de Múltiplas Camadas	50
3.1	Arquitetura OTN Pura	52
3.2	Arquitetura OTN sobre DWDM	54
3.3	<i>Ultra Dense-Wavelength Switched Network</i> (UDWSN)	56
3.4	<i>Hub-and-Spoke</i> (HnS) com WDM	59
3.5	<i>Self-Adjusting Unified Metropolitan and Access Network</i> (ARMONIA)	61
3.6	Modular Optical Metro-Core (MOMC)	63
3.7	Análise Comparativa das Arquiteturas	66
3.7.1	Temas de Pesquisa por Arquitetura	68

3.8	Resumo Conclusivo do Capítulo	70
4	Arquiteturas das Redes Ópticas Metropolitanas de Camada Única	71
4.1	Redes ópticas comutadas de comprimento de onda	73
4.1.1	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> (DWDM)	73
4.1.2	<i>Metro Elastic Optical Network</i> (MEON)	75
4.1.3	<i>SDN-Like Innovative Metro-Access Optical Network</i> (SIMON)	78
4.1.4	Tridimensional Metro-Access Optical Network	80
4.2	Redes Ópticas sem Filtro	82
4.2.1	<i>Filterless Metropolitan Network</i> (FMN)	82
4.2.2	<i>Dual Fibre Network</i> (DuFiNet)	85
4.3	Rede Óptica Semi Filtrada/Semi Sem Filtro	87
4.3.1	<i>Metro-Haul</i>	87
4.3.2	<i>Drop-and-Waste</i> (DnW)	89
4.4	Visão Geral	91
4.5	Análise Comparativa das Arquiteturas	91
4.5.1	Comparação de Recursos	94
4.5.2	Temas de Pesquisa por Arquitetura	98
4.6	Resumo Conclusivo do Capítulo	102
5	Engenharia de Tráfego nas Redes Ópticas Metropolitanas	104
5.1	Tráfego de Marés	104
5.1.1	Modelos de Tráfego de Marés para Redes Ópticas Metropolitanas	108
5.2	Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Metropolitanas	110
5.2.1	Algoritmos Agnósticos	110
5.2.2	Algoritmos Cientes para a Metro	114
5.3	Tráfego de Dados em Redes Metropolitanas	118
5.3.1	Classes de Tráfego	118
5.3.2	Padrões de Tráfego	119
5.3.3	Perfis de Tráfego	120
5.4	Áreas e <i>Clusteres</i> Metropolitanos	123
5.5	Resumo Conclusivo	124
6	Engenharia de Tráfego Ciente da Área	125
6.1	Embasamento Teórico	126
6.2	Algoritmo de Roteamento e Alocação de Espectro Ciente da Área	127
6.2.1	Algoritmo Proposto	131
6.2.2	Análise da Complexidade do ALWAcS	133

6.3	Simulação e Análise de Resultados	133
6.3.1	Cenário das Simulações	134
6.3.2	Avaliação dos Resultados	135
6.4	Resumo Conclusivo	142
7	Engenharia de Tráfego Ciente da Área e do <i>Cluster</i>	143
7.1	Soluções de Engenharia de Tráfego Cientes da Área e do <i>Cluster</i>	144
7.1.1	Algoritmos Propostos	146
7.1.2	Análise da Complexidade do MAARS e MCARS	147
7.2	Simulação e Análise de Resultados	148
7.2.1	Cenário das Simulações	149
7.2.2	Avaliação dos Resultados	150
7.3	Resumo Conclusivo	157
8	Conclusões e Trabalhos Futuros	159
8.1	Trabalhos Futuros	162
	Referências	164
	Apêndice	184
A	Algoritmos Propostos Neste Trabalho	185
A.1	ALWAcS	185
A.2	MAARS	195
A.3	MCARS	200

Lista de Figuras

2.1	A perda de diferentes comprimentos de onda na fibra óptica, adaptado de [1].	11
2.2	Esquema da grade fixa [2].	12
2.3	Estrutura de Redes de Transporte Óptico	15
2.4	Exemplo esquemático de um transponder óptico.	17
2.5	Dispositivos passivos: <i>Splitter</i> , <i>Coupler</i> (ou <i>Combiner</i>) e <i>Blocker</i>	20
2.6	Nó OTN e suas conexões.	21
2.7	Esquema simplificado de um comutador seletivo de comprimento de onda (WSS).	23
2.8	Alguns tipos de nós ópticos: WSON (A), sFL (B) e FL (C)	24
2.9	Exemplo de tipos de topologias de rede.	26
2.10	Ilustração da grade flexível [2].	30
2.11	Arquitetura das Rede Ópticas Elásticas (EON).	30
2.12	Arquitetura do SBVT.	32
2.13	Arquitetura do BV-OXC.	33
2.14	Abordagem de <i>slot</i> de frequência para redes ópticas elásticas.	35
2.15	Rede composta de 4 nós e 4 enlaces e duas duas requisições de conexão, D_1 e D_2	36
2.16	Restrições do problema RSA no atendimento das conexões D_1 e D_2	36
3.1	Classificação das arquiteturas metro ópticas multicamadas.	52
3.2	Arquitetura de rede OTN Pura	53
3.3	Arquitetura de rede OTN/DWDM	55
3.4	Arquitetura UDWSN com os segmentos MC e MA.	57
3.5	Arquitetura lógica HnS sobre WDM.	60
3.6	Arquitetura multicamada ARMONIA.	62
3.7	Arquitetura MOMC com SDN.	65
4.1	Classificação das arquiteturas metro ópticas de camada única.	72
4.2	Arquitetura MEON em malha.	76

4.3	Topologia em estrela e anel da arquitetura SIMON.	79
4.4	Esquema representativo da TDGMON, adaptado de [3].	81
4.5	Filterless Metropolitan Network (FMN) architecture.	83
4.6	Representação da arquitetura DuFiNet.	85
4.7	Representação da arquitetura sFL <i>Metro-Haul</i>	89
4.8	Representação da arquitetura sFL denominada DnW.	90
4.9	Escopo do segmento de rede das arquiteturas destacadas.	93
5.1	Demonstração da variedade de áreas/distritos na cidade de Xangai [4] . . .	106
5.2	Demonstração da divisão da rede em várias partes, similar à Torre de Hanói [5]	109
6.1	Grafo com enlaces ponderados.	129
6.2	Políticas de alocação de espectro.	130
6.3	Topologias derivadas da Topologia 1 (Figura 5.1), sendo denominadas (a) Topologia 2 e (b) Topologia 3.	134
6.4	Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na Topologia 1 , no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	136
6.5	Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na Topologia 2 , no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	137
6.6	Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na Topologia 3 , no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	137
6.7	Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na Topologia 1 , no horário de 18h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	138
6.8	Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na Topologia 2 , no horário de 18h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	138
6.9	Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na Topologia 3 , no horário de 18h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	139
6.10	Resultado da taxa BBR dos algoritmos na CA da Topologia 1 , no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	140
6.11	Resultado da taxa BBR dos algoritmos na RA da Topologia 1 , no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala percentual e (b) escala logarítmica. . .	141

6.12	Resultado da taxa BBR dos algoritmos na OA da Topologia 1 , no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	141
7.1	Estabelecimento de conexões aos longa das áreas e <i>clusters</i> de área	145
7.2	Demonstração da variedade de áreas e <i>clusters</i> de área na cidade de Xangai [4].	149
7.3	Taxa de bloqueio de largura de banda geral dos algoritmos com $k = 3$ no horário de 10h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	151
7.4	Taxa de bloqueio de largura de banda geral dos algoritmos com $k = 3$ no horário de 18h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	151
7.5	Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área intermediária (CA) no horário de 10h mostrados na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	152
7.6	Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área intermediária (CA) no horário de 18h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	153
7.7	Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área residencial (RA) no horário de 10h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	154
7.8	Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área residencial (RA) no horário de 18h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	154
7.9	Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área de negócios (OA) no horário de 10h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	155
7.10	Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área de negócios (OA) no horário de 18h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	155
7.11	Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) no horário de 10h no <i>cluster</i> 5, na OA na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	156
7.12	Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) no horário de 10h entre <i>clusters</i> 6-5, ambos na OA, mostrados na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.	157

Lista de Tabelas

3.1 Aspectos gerais sobre arquiteturas MAN ópticas. (NM significa Não Mencionado) . . .	67
3.2 Principais tópicos abordados na literatura para cada arquitetura.	69
4.1 Relação de valores de largura de banda por <i>slot</i> e quantidade total de <i>slots</i> .	76
4.2 Principais características das arquiteturas metropolitanas de camada única.	92
4.3 Lista de publicações que citam as arquiteturas metro deste capítulo.	94
4.4 Aspectos gerais sobre arquiteturas MAN ópticas. (NM significa Não Mencionado) . .	96
4.5 Principais tópicos abordados na literatura para cada arquitetura.	99
5.1 Atributos dos Geotipos de Áreas Geográficas, adaptado de [6]	107
5.2 Comparação de trabalhos com algoritmos agnósticos da área em redes ópticas metropolitanas.	114
5.3 Comparação de trabalhos com algoritmos cientes em algum aspecto em redes ópticas metropolitanas.	118
6.1 Exemplos de possíveis rotas para estabelecer um caminho óptico entre os nós 14 e 17, ambos na CA.	130
6.2 Exemplos de possíveis rotas para estabelecer um caminho óptico entre os nós 7 e 9, estabelecidos em áreas e <i>clusters</i> diferentes.	131
6.3 Percentual de excedente de carga por área em cada horário de acordo com [4].	135
7.1 Percentual de excedente de carga por área às 10h e 18h.	149

Lista de Abreviaturas e Siglas

A-WDM *Analogue-Wavelength Division Multiplexing Transport Layer.*

A2RSA *Area-Aware Routing and Spectrum Assignment.*

AARSA *Area-Aware Routing and Spectrum Assignment.*

ADC *Analog-to-Digital Converter.*

ALWAcS *Area Link Weighted Aware with Complete Sharing.*

AMEN *Access Metro Edge Node.*

AN *Access Nodes.*

ARMONIA *Self-Adjusting Unified Metropolitan and Access Network.*

ASE *Amplified Spontaneous Emission.*

AWG *Arrayed Waveguide Gratings.*

BBR *Bandwidth Blocking Probability.*

BDM *Band-Division Multiplexing.*

BER *Bit Error Rate.*

BM *Burst Mode.*

BnS *Broadcast-and-Select.*

BV-OXC *Bandwidth Variable Optical Cross-Connects.*

BVT *Bandwidth Variable Transponder.*

BVXC *Bandwidth-Variable Cross-Connect.*

C-RAN *Cloud Radio Access Network.*

CA *Comprehensive Area.*

CAPEX *Capital Expenditure.*

CD *Colorless and Directionless.*

CD-ROADM *Colorless and Directionless Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer.*

CDC-ROADM *Colorless, Directionless and Contentionless Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers.*

CDN *Content Delivery Networks.*

CO *Central Office.*

COVID *Corona Virus Disease.*

CPRI *Common Public Radio Interface.*

CS *Complete Sharing.*

CT *Coherent Transponder.*

CU *Centralized Unit.*

CWDM *Coarse Wavelength Division Multiplexing.*

D-WDM *Digital-to-Wavelength-Division Multiplex Adaption Layer.*

DAC *Digital-to-Analog Converters.*

DC *Data Center.*

DCM *Dispersion Compensation Methods.*

DEON *Dense Elastic Optical Network.*

DnW *Drop-and-Waste.*

DPSK *Differential Phase Shift Keying.*

DRV *Drive Responsible Vehicle.*

DS *Downstream.*

DSP *Digital Signal Processing.*

DuFiNet *Dual Fibre Network.*

DWDM *Dense Wavelength Division Multiplexing.*

E2E *End-to-End.*

EDFA *Erbium-doped fiber amplifiers.*

EON *Elastic Optical Network.*

FL *Filterless.*

Flex-OCSM *Centralized Flexible Optical Carrier Source Module.*

FMN *Filterless Metropolitan Network.*

FOADM *Fixed Optical Add/Drop Multiplexer.*

FS *Frequency Slot.*

FS-BVT *Fully-Sliceable Bandwidth-Variable Transponder.*

FSR *Free Spectral Ranges.*

FSU *Frequency Slot Units.*

HLF *Highest Line Rate First.*

HnS *Hub-and-Spoke.*

ILA *In Line Amplifier.*

ILP *Integer Linear Programming.*

IMDD *Intensity-Modulation Direct-Detection.*

IMT *International Mobile Telecommunications Group.*

IoT *Internet of Things.*

IP *Internet Protocol.*

ISP *Internet Service Provider.*

ITU *International Telecommunication Union.*

ITU-T *International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector.*

IXP *Internet eXchange Point.*

KSP *K Shortest Path.*

LDF *Longest Distance First.*

LSRU *Least Spectrum Resource Usage.*

LSTM *Long Short-Term Memory.*

LT *Line Terminal.*

MA *Metro-Access.*

MAARS *Metro Area Aware Routing Solution.*

MAN *Metropolitan Area Network.*

MB-ROADM *Multi-Band Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer.*

MC *Metro-Core.*

MCARS *Metro Cluster Aware Routing Solution.*

MCEN *Metro-Core Edge Nodes.*

MCF *Multi-Core Fiber.*

MCS *Multicast Switch.*

MD-ROADM *Multi-degree Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer.*

MDC *Mega Data-Center.*

mDC *micro data centers.*

MDF *Most Demanding First.*

ME-DC *Metro-Embedded Data Center.*

MEON *Metro Elastic Optical Network.*

MHK *Min-Hop K-shortest Path Routing.*

ML-SBVT *Multi-Laser Sliceable Bandwidth Variable Transceivers.*

MN *Metro Nodes.*

MOMC *Modular Optical Metro-Core.*

MON *Metropolitan Optical Networks.*

MP *Muxponders.*

MPLS *Multiprotocol Label Switching.*

MSTM *Multi-Step Trigonometric Model.*

MW-SBVT *Multi-Wavelength Sliceable Bandwidth Variable Transceivers.*

NFV *Network Functions Virtualization.*

NoTPS *Node-Oriented Traffic Prediction and Scheduling.*

NP *Non-Deterministic Polynomial Time.*

NS *Network Slicing.*

NS-BVT *Non-Sliceable Bandwidth-Variable Transponder.*

NWDM *Nyquist Wavelength-Division Multiplexing.*

OA *Office Area.*

OaaS *Optimization-as-a-Service.*

OADM *Optical Add and Drop Multiplexer.*

ODU *Optical Data Unit.*

OEO *Optical-Electrical-Optical.*

OF *Optical Filter.*

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing.*

OLS *Optical Line Systems.*

OLT *Optical Line Terminal.*

OM *Optical Modulator.*

ONOS *Open Network Operating System.*

ONS *Optical Network Simulator.*

ONU *Optical Network Unit.*

OOFDM *Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing.*

OOK *On-off keying.*

OPEX *Operational Expenditure.*

OPU *Optical Channel Payload Unit.*

OSaaS *Optical Spectrum-as-a-Service.*

OSNR *Optical Signal to Noise.*

OTDM *Orthogonal Time Division Multiplexing.*

OTN *Optical Transport Network.*

OTTM *Onion Tidal Traffic Model.*

OTU *Optical Transport Unit.*

OXC *Optical Cross-Connect.*

P2MP *Point-to-Multipoint.*

P2P *Point-to-Point.*

PASSION *Photonic technologies for programmable transmission and switching modular systems based on Scalable Spectrum/space aggregation for future agile high capacity metro Networks.*

PBC *Polarization Beam Combiner.*

PBS *Polarization Beam Splitter.*

PD *Pre-Detour.*

PDFA *Praseodymium Doped Fiber Amplifier.*

PDK *Pre-Detour k-Shortest Paths.*

PIC *Photonic Integrated Circuits.*

PON *Passive Optical Network.*

PoP *Point of Presence.*

PRMLSA *Power, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment.*

PS-BVT *Partially Sliceable Bandwidth-Variable Transponder.*

qNWDM *quasi-Nyquist Wavelength-Division Multiplexed.*

QoS *Quality of Service.*

QoT *Quality-of-Transmission.*

QPSK *Quadrature Phase Shift Keying.*

RA *Residential Area.*

RCSA *Routing, Configuration, and Spectrum Assignment.*

RDC *Regional Data-Center.*

RMLSA *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation.*

RMSA *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation.*

RMSCA *Routing, Modulation, Spectrum, and Core Allocation.*

RN *Remote Node.*

RnS *Ring-and-Spur.*

ROADM *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer.*

RRH *Remote Radio Head.*

RRU *Remote Radio Units.*

RSA *Routing and Spectrum Assignment.*

RSCA *Routing, Spectrum, and Core Assignment.*

RSMFSA *Routing, Space, Modulation Format and Spectrum Allocation.*

RSSA *Routing, Spatial channel and Spectrum Assignment.*

RWA *Routing and Wavelength Assignment.*

Rx *Transponder de Recepção.*

SBVT *Sliceable Bandwidth Variable Transceivers.*

SDH *Synchronous Digital Hierarchy.*

SDM *Space Division Multiplexing.*

SDMN *Software-Defined Metro Network.*

SDN *Software Defined Network.*

sFL *Semi-Filterless.*

SIMON *SDN-Like Innovative Metro-Access Optical Network.*

SLA *Service Level Agreement.*

SOI *Silicon-on-Insulator.*

SONET *Synchronous Optical Networking.*

SSS *Spectrum Selective Switch.*

SWK *Occupied-Slots-as-Weight K-Shortest Path Routing.*

TaaS *Transport-as-a-Service.*

TDGMON *Tridimensional Metro-Access Optical Network.*

TDM *Time Division Multiplexing.*

TDMA *Time Division Multiple Access.*

TF *Tunable Filters.*

TFP *Time-Frequency Packing.*

TIA *Trans-Impedance Amplifiers.*

Tx *Transponders de Transmissão.*

UC *Unidade Centralizada.*

UD *Unidade Distribuída.*

UDWDM *Ultra Dense-Wavelength Division Multiplex.*

UDWSN *Ultra Dense-Wavelength Switched Network.*

US *Upstream.*

UW *Ultra Wideband.*

vBBU *virtual Broadband Base Unit.*

VCSEL *Vertical Cavity Surface Emitting Laser.*

VNF *Virtual Network Functions.*

VPN *Virtual Private Network.*

WAN *Wide Area Network.*

WDM *Wavelength Division Multiplexing.*

WSN *Wavelength Switched Optical Networks.*

WSS *Wavelength Selective Switch.*

Capítulo 1

Introdução

A rede óptica metropolitana (do inglês, *Metropolitan Optical Networks* (MON)) tem sido desafiada com o aumento da popularidade de aplicações emergentes que requerem instantâneo aumento da capacidade em pontos críticos da rede, enquanto necessita manter os custos viáveis [7]. O modelo de infraestrutura de computação em nuvem, antes centralizado nas redes de núcleo, tem sido disseminado através da MON em dimensões reduzidas [8, 9]. Com isso, os serviços em nuvem, devido às longas distâncias entre os usuários e a infraestrutura de armazenamento/computação de dados, estão sendo disseminados ao longo de nós de nuvem de borda (*edge cloud*), na proximidade dos usuários finais, com o objetivo de reduzir a latência do tráfego transportado e, conseqüentemente, melhorar a experiência de uso para alguns aplicativos, especialmente aqueles ligados à Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things* (IoT)). Como os recursos desses nós de borda são restritos, uma grande quantidade de nós de borda é requerida [10, 11].

Dispositivos IoT como as lâmpadas inteligentes, câmeras de segurança inteligentes, sensores de ambiente e de movimento, bem como dispositivos de rastreamento baseados em sistemas de posicionamento global (do inglês *Global Positioning System* (GPS)) estão tornando-se cada vez mais comuns e fazendo parte da vida das pessoas. As aplicações, processos e serviços implementados nesses dispositivos requerem coleta e análise de dados gerados pelo usuário, que são enviados em tempo real para serem armazenados e processados nos nós de borda [12]. O gerenciamento desses vários nós de borda e dos seus respectivos recursos distribuídos precisa atender os requisitos das aplicações com rapidez e simplicidade, o que não é possível de ocorrer quando esses dados são encaminhados para os centros de dados em nuvem [13].

Quanto aos serviços intensivos em dados e vídeos, bem como as transmissões ao vivo pela internet (*lives streamings*), a necessidade de espalhamento desse tipo de conteúdo por meio de *caches* dispostos nos escritórios centrais (do inglês, *Central Office* (CO)) tem sido cada vez mais recorrentes, dado o comportamento dos usuários finais, especialmente

no que tange às redes sociais digitais [14]. Hoje, as pessoas acessam e consomem vídeos em qualquer dispositivo conectado à internet, a partir de ambientes que vão, desde as suas casas, em momentos de descanso, até os seus locais de trabalho, estudo e de lazer. O consumo desse tipo de mídia requer conectividade altamente dinâmica, sobretudo em ocasiões de eventos públicos [15].

As aplicações de realidade virtual e realidade aumentada constituem outra categoria de serviços disruptivos de grande popularidade, e que requerem uma grande quantidade de largura de banda para serem transmitidas, o que pode aumentar significativamente o tráfego. As aplicações de realidade virtual usam imagens 3D em tempo real para criar uma experiência imersiva para o usuário. Já as aplicações de realidade aumentada usam imagens do mundo real para inserir objetos virtuais. Tanto as imagens da realidade virtual quanto os objetos da realidade aumentada, além da quantidade de largura de banda, também requerem baixa latência [16].

Diante desse panorama, a quinta geração de redes móveis, 5G, já em uso atualmente, promete conectar pessoas e coisas por meio de redes e aplicativos inteligentes, gerando grande quantidade de dados, e com uma velocidade tão alta que poderá atender usuários domésticos de redes de fibra óptica. Toda a velocidade e redução de latência prometida pela 5G, poderá ser potencialmente melhorada com o advento das redes além do 5G, como as redes 6G, por exemplo, a ser disponibilizada comercialmente em 2030. É esperado que as redes 6G ofereça ultra-alta densidade de conexão, alcançando cerca de 100 Gb/s de taxa máxima de pico por usuário, contra 20 Gb/s, em média, prometidos pelas redes 5G [17, 18]. Porém, estes avanços requerem uma infraestrutura de rede mais densa e rica em fibras para fornecer os principais indicadores de desempenho, tais como menor latência, taxas de dados mais altas e mais dispositivos conectados [19, 20]. As redes 6G, por exemplo, serão constituídas principalmente por redes ópticas passivas (do inglês *Passive Optical Network* (PON)) devido ao baixo custo e capacidade disponível [17].

Sabe-se que o 5G pode ter uma velocidade de *uplink* de cerca de 28 Gb/s e *downlink* de até 30 Gb/s [19], e que as interfaces ópticas hoje podem atingir até 800 Gb/s [21] de velocidade. Da mesma forma, é previsto que o 6G poderá alcançar uma velocidade média de 1 Tb/s [18]. A disponibilidade de fibra óptica é então uma condição para a implementação efetiva dessas tecnologias, conforme projetadas, garantindo-lhes a conexão de alta velocidade necessária para suportar as demandas do volume de dados do crescente número de dispositivos conectados, dos aplicativos e serviços. A estratégia de investimento em redes de fibra óptica é, portanto, um fator crítico para a viabilidade das redes móveis das próximas gerações, assim como das várias aplicações mencionadas anteriormente.

Enquanto todos essas evoluções tecnológicas são inevitáveis, é sabido que nenhum avanço será possível sem redes de comunicação robustas e de grande capacidade. Atender

aos objetivos dos negócios dos provedores como transformação digital e automação inteligente, exige soluções complexas que excedem as capacidades de qualquer fornecedor, com novas soluções propostas em uma abordagem ecossistêmica [22]. Neste sentido, os desafios impostos às MONs (ou Metro), dado o nível de complexidade, podem ser visualizados em duas perspectivas distintas: *i*) do ponto de vista **arquitetural** da infraestrutura, e *ii*) do ponto de vista da **engenharia de tráfego**. Este trabalho discorre sobre ambas as perspectivas.

Sobre a perspectiva *i*), a principal necessidade é promover escalabilidade da capacidade dentro de uma margem reduzida de custo [20]. Como é sabido, a infraestrutura da Internet pode ser dividida em três níveis. O nível mais alto, que compreende a infraestrutura nacional e internacional de longa distância, e interconecta grandes centros de dados, e é definido como as redes de transporte de núcleo, fornecendo “ultra-alta” capacidade de transporte. O nível mais baixo é constituído por redes de acesso, interligando os usuários finais aos seus provedores locais de Internet. A ponte entre as redes de núcleo e as redes de acesso são as redes metropolitanas de transporte [23]. Dentre esses três níveis, é o nível de rede metropolitana o mais desafiado na nova era de aplicações disruptivas [12]. Isto ocorre porque, para permitir maiores granularidades de transmissão de dados agregados nas redes de núcleo e maior capilaridade nas redes de acesso, as redes metropolitanas precisam ampliar a cobertura geográfica, que deve ser expandida para alcançar áreas rurais e remotas, garantindo a igualdade de acesso à tecnologia. Esse objetivo perpassa pela necessidade de escalabilidade da infraestrutura [24].

A escalabilidade das MONs pode ocorrer com a adição de mais fibras ópticas, pela atualização dos equipamentos da rede, bem como implementando-se tecnologias avançadas de rede, como rede definida por *software* (do inglês *Software Defined Network (SDN)*) e virtualização das funções da rede (do inglês *Network Functions Virtualization (NFV)*), que podem eliminar a necessidade de *hardware* físico adicional [25]. A atualização dessas redes pode ocorrer de maneira gradual, aumentando a capacidade ao longo do tempo e sob demanda. Podendo ser planejada para ocorrer em etapas de tempo menor. O processo de escalar a infraestrutura é complexo e requer o planejamento correto e uma combinação adequada de investimentos, tecnologias, e atividades regulatórias e de mercado, em áreas onde a infraestrutura disponível ainda é insuficiente para suportar a crescente demanda de conectividade e de alta largura de banda. Tal processo pode transformar completamente a forma como os serviços de rede são entregues, uma vez que a nova infraestrutura ampliada irá apoiar a implantação dos nós de computação em borda distribuídos [26, 27].

Quanto à perspectiva *ii*), da engenharia de tráfego de dados para redes metropolitanas, aspectos relacionados à localização dos serviços têm sido cada vez mais explorados devido à transformação incorrida sobre os serviços consumidos pelos usuários. Soma-se a isso a

grande variedade e distribuição bidirecional de tráfego assimétrico nessas redes, capaz de anular completamente os esforços de escalabilidade da infraestrutura física se uma política adequada de uso dos recursos não é aplicada [28]. Atualmente, a mudança contínua na localização dos sistemas de armazenamento e/ou computação em direção à borda da rede têm impactado o perfil de tráfego nas redes de transporte, deslocando a carga do nível de núcleo para o nível metropolitano [29]. Nesse ambiente heterogêneo é requerida a distribuição do tráfego entre diferentes instâncias de servidores com base na localização geográfica dos usuários, no intuito de atender aos estritos requisitos de baixa latência e alta eficiência na experiência do usuário. A otimização das rotas de comunicação entre os serviços distribuídos e os usuários, exige que sejam levadas em consideração as condições de tráfego e a localização das áreas metropolitanas, onde o custo é sensível.

Novos desafios nesse cenário incluem a necessidade de gerenciar e provisionar novas plataformas em múltiplas localizações, a interação entre os dispositivos de borda e a nuvem, além da necessidade de distribuir a carga de trabalho de forma apropriada para garantir o desempenho ideal. Os possíveis problemas ligados ao tráfego de dados nessa infraestrutura são principalmente a latência, instabilidade, atrasos na conectividade e interrupções no serviço. Esses problemas geralmente ocorrem nos pontos em que a demanda de tráfego é maior do que a capacidade da rede, causando congestionamento e impactando a qualidade dos serviços de rede [30, 31]. Problemas com o tráfego de dados podem se intensificar com o tempo, à medida que a demanda por serviços de rede cresce e as tecnologias de rede se tornam cada vez mais complexas [20].

Os fatores que levam a esses problemas são, principalmente, a grande distância entre os pontos na rede, o que gera atrasos na transmissão de dados (quanto maior a distância, maior será a latência), congestionamento quando a rede não é suficientemente escalável para atender as demandas de crescimento, o comprometimento e ineficiência de rotas de transmissão, falhas de *hardware* ou de *software* que podem ser originadas quando a infraestrutura é suficientemente complexa, de difícil gerenciamento, com possíveis deficiências de compatibilidade, seja por diferenças tecnológicas ou por serem de gerações distintas [32, 33]. Com a disseminação de serviços de computação e armazenamento ao longo das redes metropolitanas, e conseqüentemente, o seu menor grau de agregação de tráfego devido a sua maior proximidade com as fontes de tráfego, naturalmente o perfil de tráfego se tornará mais dinâmico e heterogêneo, impondo requisitos mais rígidos para transportar esse tráfego para os outros segmentos de rede [34]. Uma característica natural do tráfego nas MONs é a flutuação ao longo dos espaços e do tempo, o que é conhecido como problema do tráfego de marés (*tidal traffic*). Dada a sua natureza dinâmica, o tráfego de marés é o fenômeno das flutuações no volume de tráfego de dados, resultando em picos de demanda em momentos específicos do dia, e em áreas geográficas específicas, como áreas

comerciais e áreas residenciais [5].

Nas áreas comerciais, o tráfego de marés é caracterizado por períodos de intensa atividade durante o horário comercial, quando empresas, escritórios e instituições educacionais estão em pleno funcionamento. Durante esses horários de pico, a demanda por serviços de comunicação é intensa, levando a uma sobrecarga potencial da capacidade da MON e a uma redução na qualidade do serviço percebida pelos usuários. Da mesma forma, nas áreas residenciais, o tráfego de marés ocorre em momentos diferentes, como à noite, quando as pessoas estão em casa e fazem uso intensivo de serviços de *streaming* de vídeo, jogos *online* e outras aplicações de alta largura de banda. Essa concentração de tráfego pode levar a gargalos na infraestrutura existente, resultando em atrasos e interrupções na entrega de dados aos usuários finais [35].

No geral, o tráfego em todas essas áreas representa desafios sem precedentes aos operadoras de rede em termos de decisões de encaminhamento de fluxo, como o que ocorre com fluxo elefante, por exemplo, que requer métodos diferentes de engenharia de tráfego de maneira a reduzir o congestionamento [30]. Além disso, as soluções de engenharia de tráfego baseadas em algoritmos avançados de roteamento e comutação podem equilibrar a carga de tráfego de forma inteligente, direcionando o tráfego para rotas alternativas e evitando congestionamentos em pontos críticos da rede. Isso melhora a capacidade da rede de lidar com o tráfego de marés, garantindo uma experiência de usuário consistente e de alta qualidade, independentemente do horário ou localização geográfica [4].

Este trabalho busca reunir as soluções apontadas para atender as perspectivas *i*) e *ii*). Em atendimento à perspectiva *i*) são apresentadas as propostas arquitetônicas para redes metropolitanas de transporte de dados, destacadas na literatura do estado da arte recente, para então discutir suas principais características, vantagens e desvantagens. As soluções arquitetônicas são categorizadas em dois grandes grupos, sendo **arquiteturas de camada única e multicamadas**, e em seguida é apresentado um alinhamento das propostas nas perspectivas lógica e de nomenclatura, bem como uma análise comparativa entre elas. As arquiteturas de camada única têm a vantagem de serem mais ágeis e rápidas, mas alcançar a elasticidade esperada para o futuro é um grande desafio tecnológico. As redes multicamadas, com uma abordagem mais facilitada para a implementação de funções programáveis e para a agregação de tráfego, incorrem em maior latência e esforço na coordenação das camadas envolvidas.

A análise dessas novas arquiteturas possibilitou a identificação das tecnologias mais exploradas, do ponto de vista da pesquisa científica, e por essa razão, também mais maduras, o que aumenta a probabilidade de que venham a ser implantadas futuramente. Assim, selecionou-se a arquitetura Metro EON (MEON), para investigação das soluções na perspectiva *ii*) de **estratégias de engenharia de tráfego**. Este trabalho faz um

levantamento de modelos de tráfego de marés para redes ópticas metropolitanas, formulados levando em consideração as áreas de uma cidade metropolitana. Com as respectivas localizações das áreas, cujo comportamento do tráfego é conhecido, bem como dos pontos da rede mais penalizados com a exaustão de recursos disponíveis e os conhecidos horários de flutuação do volume de tráfego, é possível propor soluções de alocação de recursos que reduzam o bloqueio dos serviços. Foram destacadas as principais áreas (ou setores) que compõem a cidade, e essa informação permite identificar, de maneira associada com o comportamento das pessoas, os nós da rede mais afetados com a elevação do número de demandas, e assim possibilitar tomadas de decisão que melhorem o desempenho da rede. Neste panorama propõem-se soluções heurísticas de roteamento e alocação de espectro ciente das áreas, com as quais são exploradas as estratégias de ponderamento dos enlaces e de seleção de enlaces menos utilizados ao longo da rede. Tais soluções foram comparadas com recentes propostas da literatura com igual finalidade. Na avaliação de desempenho realizada, observou-se que as soluções propostas são até duas vezes mais eficientes na redução do bloqueio de largura de banda rede com carga de tráfego mais alta, em comparação com as heurísticas cientes das áreas, existentes na literatura.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta Tese é analisar as características das MONs tanto no aspecto arquitetural quanto de controle, e propor novas soluções de engenharia de tráfego sensíveis às estas características particulares.

São objetivos específicos deste trabalho os seguintes:

- Identificar as arquiteturas MONs propostas na literatura científica e compará-las;
- Identificar tendências tecnológicas futuras para o ecossistema metro;
- Compreender e discutir o problema de engenharia de tráfego ciente da área/regiões de instalação da infraestrutura, do ponto de vista da metro;
- Propor soluções para o problema de alocação de recursos em MONs considerando o cenário/estado da distribuição heterogênea do tráfego;

1.2 Contribuições

As principais contribuições alcançadas com este trabalho de pesquisa são as seguintes:

- Levantamento e identificação das arquiteturas para MONs multicamadas, apresentando considerações a respeito das camadas sobrejacentes ao domínio óptico (Capítulo 3);
- Análise completa das arquiteturas para MONs de camada única a partir de um exame da literatura científica mais recente (Capítulo 4);
- Proposta de avaliação de uma heurística RSA dinâmica para MONs elásticas (Capítulo 6);
- Proposta e comparação de duas heurísticas RSA cientes da área, que focam na localização das áreas e dos *clusteres* no solucionamento da estratégia de engenharia de tráfego (Capítulo 7);

1.3 Publicações Relacionadas a Tese

- SOUSA, Léia Sousa de; DRUMMOND, André Costa. ***Metropolitan optical networks: A survey on single-layer architectures***. In: *Optical Switching and Networking (OSN)*, 2022, Vol.47, <https://doi.org/10.1016/j.osn.2022.100719>.
- SOUSA, Léia Sousa de; DRUMMOND, André Costa. **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. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2022.
- SOUSA, Léia Sousa de; COSTA, Lucas R.; DRUMMOND, André Costa. **Política de Roteamento Ciente das Áreas e dos Clusteres em Redes Ópticas Metropolitanas**. In: Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2023.

1.4 Demais publicações

- SOUSA, Léia Sousa de; DRUMMOND, André Costa. **Provendo Múltiplas Transferências de Dados em Massa com Roteamento e Alocação de Espectro Ciente da Aplicação em Redes Ópticas Elásticas**. In: Anais do XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2017 . ISSN 2177-9384.
- SOUSA, Léia Sousa de; DRUMMOND, André Costa. **Políticas de Escalonamento para Transferências de Dados em Massa Inter Centro de Dados**

utilizando Roteamento e Alocação de Espectro. In: Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019.

- MIRANDA, Maurílio; SOUSA, Léia Sousa de; COSTA, Lucas R.; DRUMMOND, André Costa. **Transferências de Dados em Massa Sensíveis ao Consumo Energético em Redes Ópticas Elásticas.** In: Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019.

1.5 Organização da Tese

O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos relacionados às redes ópticas metropolitanas e o sistema de transmissão das redes ópticas elásticas. São abordados ainda tópicos relacionados à caracterização do tráfego nessas redes, definindo-se o tráfego de marés. Ao final, uma discussão sistemática adicional é apresentada sobre as tendências das tecnologias para as MONs.

O Capítulo 3 apresenta as principais arquiteturas MONs que são compostas de camada eletrônica sobre camada óptica presente na literatura. Destacam-se desde arquiteturas legadas até propostas mais recentes de arquiteturas, cuja camada eletrônica é baseada em OTN, Ethernet e IP.

O Capítulo 4 apresenta arquiteturas de camada única para redes ópticas metropolitanas identificadas na literatura. É proposta uma classificação das arquiteturas apresentadas, bem como uma análise das principais tópicos de pesquisas sobre tais arquiteturas.

O Capítulo 5 apresenta uma revisão sistemática da literatura das principais soluções para o problema RSA voltado às redes MONs, destacadas e categorizadas.

O Capítulo 6 propõe o algoritmo *Area Link Weighted Aware with Complete Sharing* (ALWAcs), focando especificamente no roteamento e alocação de recursos em MONs baseadas em EON, aproveitando as informações das áreas metropolitanas nas decisões de rotas.

O Capítulo 7 propõe e compara dois algoritmos cientes das áreas geográficas da rede metropolitana e clusters de área, denominados solução de roteamento ciente da área (*Metro Area Aware Routing Solution* - MAARS) e dos *clusters* metropolitanos (*Metro Cluster Aware Routing Solution* - MCARS).

O Capítulo 8 encerra este trabalho com as considerações finais. Apresenta-se um breve resumo dos resultados alcançados, os temas em aberto e um mapeamento das linhas que poderão ser seguidas em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Este Capítulo apresenta os principais conceitos relacionados às redes ópticas metropolitanas e o sistema de transmissão EON. Na Seção 2.1 são destacadas as principais características das MONs, os sistemas de transmissão empregados, os diferentes componentes arquiteturais, as classificações das arquiteturas com relação à utilização de filtros e as principais topologias. Na Seção 2.2 são apresentados os fundamentos das EONs, especialmente sobre a arquitetura, componentes e o problema fundamental RSA. Já a Seção 5.1 conceitua o tráfego de marés característico das redes metro, destacando as diferenças de mudanças do tráfego no sentido do tempo e do espaço.

2.1 Redes Ópticas Metropolitanas

Esta seção aborda os principais sistemas de transmissão de dados em MON, ou seja, as principais configurações do espectro óptico definidas para o transporte de tráfego, bem como os principais equipamentos envolvidos. As redes metropolitanas são formadas por uma camada eletrônica e uma camada óptica subjacente. Essa organização permite dividir a complexidade do projeto de redes em vários níveis e interligá-los, para que, assim, os dados possam ser empacotados e agregados na camada eletrônica e, conseqüentemente, transportados ponta a ponta (do inglês *Point-to-Point* (P2P)) pela camada óptica [36, 37]. Normalmente, na camada eletrônica, a comutação de pacotes de dados é realizada. Nesse processo, os dados a serem enviados são divididos em pequenas unidades e não requer o estabelecimento prévio de um caminho para o envio desses pacotes. A comutação de circuitos predomina na camada óptica, na qual um caminho ou circuito óptico de P2P é estabelecido, reservando uma parte da largura de banda do espectro óptico. Os dados na forma de pulsos de luz são enviados através deste circuito [38, 39, 40].

O objeto de estudo deste trabalho são as redes ópticas metropolitanas e, portanto, as discussões a seguir estarão concentradas neste domínio de rede. Em geral, essas redes

ópticas podem ser classificadas como opacas, transparentes ou translúcidas [41]. As redes transparentes comutam e transmitem o sinal exclusivamente no meio óptico e, portanto, os dispositivos Óptico-Elétrico-Óptico (OEO), não são necessários. Se a conversão do sinal for necessária em todos os nós da rede, essa arquitetura é dita opaca, porém, podem haver arquiteturas que combinem nós opacos e transparentes, e essas são chamadas de translúcidas. Esse processo de conversão aumenta o custo e o atraso nas operações da rede [2, 42].

As MONs são projetadas com enlaces de curta e média distância, medindo menos de 200 km, geralmente dentro do limite de um único segmento óptico sem amplificação (cerca de 80 km) [43][44]. No entanto, distâncias maiores e segmentos menores (*multi-spans*) também são possíveis, exigindo alguma regeneração de sinal enquanto impulsiona a tendência “pague conforme você cresce” [11, 45]. Para essas redes, existe uma variedade de sistemas de transmissão que podem ser utilizados, bem como diversos tipos de elementos de *hardware* como *building blocks*, que podem ser organizados de diversas formas para compor a topologia da rede. Na Subseção 2.1.1 destaca-se o conjunto de métodos de transmissão em redes ópticas, com especial ênfase para redes EON, visto que grande parte dos trabalhos que serão discutidos foca nesta tecnologia de transporte. Em seguida, na Subseção 2.1.2, enfatiza-se os papéis dos diversos tipos de nós na infraestrutura, bem como os equipamentos ópticos fundamentais para a composição dessas infraestrutura. Na sequência, a Subseção 2.1.3 destaca as classificações das arquiteturas e nós com relação à utilização de filtros do espectro óptico. de Adicionalmente, as principais topologias de MON são descritas na Subseção 2.1.4, visto que este é um fator preponderante para o planejamento da infraestrutura, sendo determinante para a escolha dos elementos de rede a serem implementados.

2.1.1 Sistemas de Transmissão nas Redes Ópticas Metropolitanas

O espectro óptico nas fibras ópticas é dividido em várias janelas ou bandas para melhor aproveitamento das regiões com menor atenuação. Durante a transmissão óptica ocorre naturalmente a perda do sinal de transmissão em diferentes comprimentos de onda na fibra óptica. Essa perda é causada por diferentes fatores, incluindo a atenuação da fibra óptica, dispersão cromática e dispersão modal, uma vez que as fibras ópticas não são perfeitamente transparentes para a luz e diferentes comprimentos de onda viajam a velocidades ligeiramente diferentes [36].

A Figura 2.1 mostra a perda de potência de transmissão óptica, medida em decibéis por quilômetro (dB/k). A perda de potência varia de acordo com o comprimento de

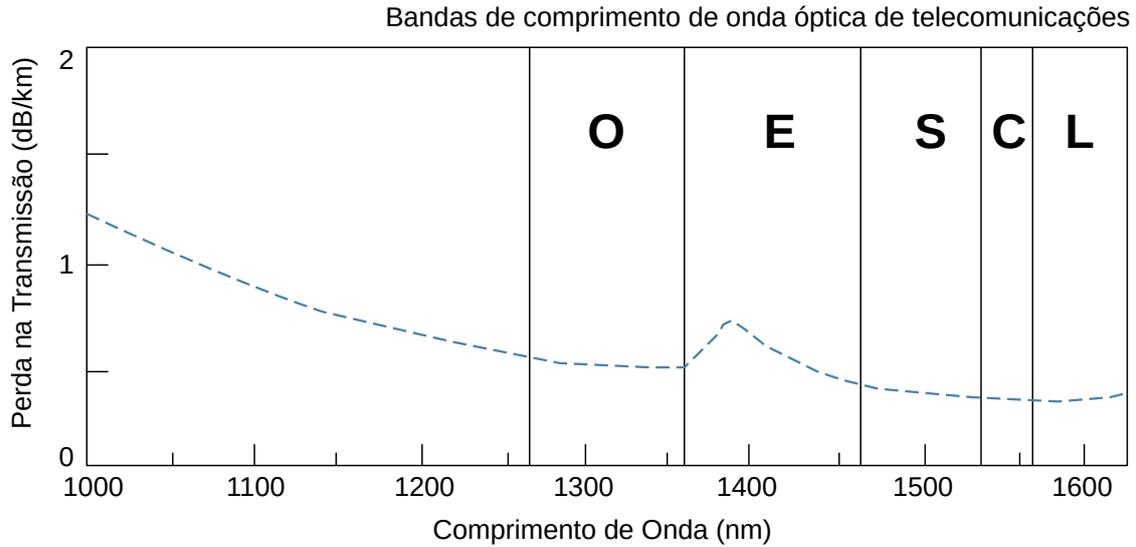


Figura 2.1: A perda de diferentes comprimentos de onda na fibra óptica, adaptado de [1].

onda da luz escolhida e a composição do material de propagação. A menor perda ocorre no comprimento de onda de 1550 nm, dentro da banda C, que é comumente usada para transmissões de longa distância, seguida pela banda L. A banda O foi uma das primeiras a ser usada para telecomunicações, enquanto a banda S é uma alternativa para comunicações de rede passiva. Cada faixa de transmissão possui restrições particulares e exige equipamentos específicos para sua adoção [36].

As bandas de transmissão óptica são importantes porque permitem que a transmissão de informações por fibra óptica seja feita com a menor perda de sinal possível, o que ajuda a aumentar a capacidade de transmissão, alcance e qualidade do sinal. A escolha da banda de transmissão óptica é o ponto inicial para definição dos sistemas de transmissão e fabricação dos equipamentos que serão implantados na rede, e assim, é fundamental para garantir que o sistema de comunicação por fibra óptica seja otimizado para as necessidades específicas de transmissão de dados [46].

Assim como nas redes de núcleo, as tecnologias de transporte óptico para redes metropolitanas destacadas na literatura são subdivididas em duas categorias principais: rede fixa e rede flexível. Em termos de tecnologia de rede fixa, o *Wavelength Division Multiplexing (WDM)* [47] é a principal alternativa em uso hoje. Duas modalidades de sistema WDM estão disponíveis: *Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)* padronizado pela União Internacional de Telecomunicações - Setor de padronização em Telecomunicações (do inglês, *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)*) G.694.2 [3] e *Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)*

padronizada pela ITU-T G.694.1 [48]. Ambos são utilizados em conjunto em redes metropolitanas e de acesso, sendo que o DWDM costuma oferecer maior número de canais, utilizando menos enlaces e é recomendado para distâncias maiores que o CWDM, porém com custo mais elevado. Para mudar de CWDM para DWDM, basta que o provedor troque alguns equipamentos para suportar muitos canais com menos granularidade [48, 49]. Além disso, o DWDM é especialmente usado em redes sem filtro (*Filterless (FL)*) [50, 51].

A ITU propôs um conjunto de padrões para definir o uso do espectro óptico. Em um desses padrões, o da grade fixa, adotado pelo WDM, o espectro óptico é dividido em partições com largura de 50 GHz ou 25 GHz [45]. A Figura 2.2 ilustra o espectro óptico com grade fixa, na qual várias demandas de diferentes larguras de banda são estabelecidas. Cada partição, de tamanho de banda fixo no valor de 50 GHz, atende a um canal óptico, independentemente dos requisitos de largura de banda dos sinais transmitidos. Porém, existe uma limitação para acomodar sinais devido ao espaço entre os canais, e ainda por cima existe uma potencial ineficiência na utilização desses canais para acomodar taxas muito baixas, por exemplo, já que o espectro alocado é de 50 GHz, se houver uma demanda que requeira apenas 10 GHz, significa que 40 GHz do espectro óptico é desperdiçado. As demandas na cor rosa e laranja ultrapassam o limite do canal aumentando as penalidades nos filtros ópticos da rede.

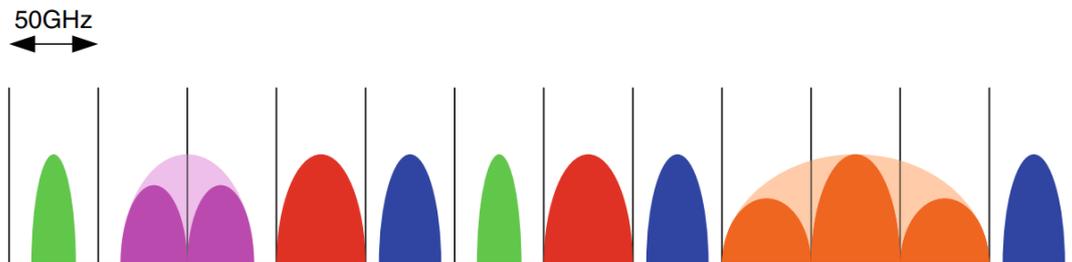


Figura 2.2: Esquema da grade fixa [2].

A ideia é separar os elementos de *hardware* e *software* da rede óptica WDM nos domínios analógico (*Analogue-Wavelength Division Multiplexing Transport Layer (A-WDM)*) e digital (*Digital-to-Wavelength-Division Multiplex Adaptation Layer (D-WDM)*). No domínio D-WDM, as funções relacionadas ao transporte desses canais analógicos são implementadas em equipamentos como ROADMs multi-grau (*Multi-degree Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer (MD-ROADM)s*), terminais de linha (*Line Terminal (LT)s*), multiplexadores e amplificadores ópticos de linha (*In Line Amplifier (ILA)*).

No domínio D-WDM, os sinais digitais do cliente são adaptados aos canais analógicos do domínio A-WDM, como é o caso dos *transponders* utilizados nas conexões P2P, *mux-*

ponders (MPs) utilizados para combinar várias sub taxas, e *switchponders* (SPs) que são placas que integram um *switch* OTN com *transponder* DWDM [52].

Para tornar possível a tecnologia de rede flexível, técnicas de processamento paralelo de sinal, como *Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OOFDM)* [53] e *Nyquist-WDM*, são implementadas para atingir taxas de transmissão além dos limites da capacidade eletrônica. Devido à multiplexação de subportadoras ópticas na forma de uma única entidade, é possível reduzir o espaçamento entre essas subportadoras e melhorar a eficiência espectral. Algumas tecnologias de transmissão flexíveis candidatas são destacadas: *Nyquist-WDM (NWDM)*[54], *quasi-Nyquist WDM (qNWDM)*[55], Redes Ópticas Elásticas (EON) [4], que será esplanada na Seção 2.2, e Redes Ópticas Elásticas Densas (do inglês *Dense Elastic Optical Network (DEON)*).

Este movimento levou à proposta de novas arquiteturas de rede com maior granularidade espectral e que implementarão equipamentos específicos [56] para suportar um ajuste de filtragem mais fino, como é esperado com a arquitetura *Ultra Dense-Wavelength Switched Network (UDWSN)* [57, 58, 59], a ser apresentado posteriormente na Subseção 3.3. A multiplexação por divisão de comprimento de onda *Nyquist* (do inglês *Nyquist Wavelength-Division Multiplexing (NWDM)*) é uma forma mais flexível de WDM que limita o espaçamento do canal à taxa de transmissão, gerando espectros quase retangulares, com insignificante *crossstalk* e interferência entre símbolos. Essa forma quase retangular se deve a pulsos intercalados em forma de sincronismo (seno cardinal) através de Multiplexação Ortogonal por Divisão de Tempo (do inglês *Orthogonal Time Division Multiplexing (OTDM)*). Ao permitir subportadoras tão próximas na composição de supercanais, o NWDM melhora a eficiência espectral com espaçamento mínimo [54]. Variações NWDM, chamadas de multiplexação por divisão de comprimento de onda qNWDM, podem ser alcançadas devido à dificuldade em se obter um espectro retangular perfeito, pois sua largura de banda é infinita e a delimitação da banda se deve as características deficientes do canal ou alocando a porção desejada para uma aplicação [55]. Essas variações de *Nyquist* surgem devido à vários fatores de *roll-off* que fazem com que o espectro se estreite ou se alargue dentro da grade. O fator de *roll-off* de *Nyquist* é uma medida da taxa na qual a resposta de frequência de um sistema decai após o limite da banda passante. Normalmente é expresso como um valor decimal entre 0 e 1, sendo que valores mais altos nesse intervalo indicam um decaimento mais rápido. Um fator de *roll-off* de 0,5, por exemplo, significa que a resposta de frequência cai para metade do seu valor inicial após o limite da banda passante [60].

2.1.2 Componentes das Arquiteturas Metro

A estrutura básica das redes metropolitanas de transporte óptico são os nós na camada de caminho óptico. Os nós desempenham várias funções do ponto de vista estrutural, no papel de *hub* de agregação de tráfego (que não gera tráfego) ou mesmo nós de borda (na fronteira entre dois níveis/camadas de rede diferentes) [47]. Do ponto de vista físico, cada nó possui um conjunto de equipamentos necessários para o estabelecimento de caminhos ópticos fim-a-fim, incluindo conexões de *bypass*. Ambas as perspectivas serão apresentadas nas próximas seções.

Perspectiva Estrutural

No segmento de rede metropolitana, os nós de rede também podem ser definidos sob uma perspectiva estrutural, com terminologias que se referem aos papéis que esses nós representam em cada segmento de rede, bem como a funcionalidade desses segmentos. Este ponto merece destaque por alinhar diferentes expressões utilizadas para nomear uma mesma região de interesse dentro da estrutura de redes de transporte óptico, tanto para áreas da indústria quanto para atividades de pesquisa[29, 42]. Por se tratar de um dos segmentos de rede mais heterogêneos, tanto em termos de características arquitetônicas quanto de tráfego, essas definições são úteis para identificar pontos em que determinadas implementações precisam ser realizadas de forma mais imediata ou em um determinado intervalo de tempo, ou ainda, para definir a localização para alocação dos dados, onde tarefas e dados na rede precisam estar próximos, principalmente devido ao surgimento de novos paradigmas computacionais, tais como virtualização de recursos físicos e programabilidade de equipamentos [61].

Na Figura 2.3 os nós da rede de núcleo com a letra C são representados como círculos pretos, o segmento metropolitano é dividido em dois níveis, sendo os nós da rede metropolitana-*core* com as letras MC representadas como círculos azuis, e a rede metropolitana de acesso nós com letras MA representadas por círculos verdes. Além disso, o segmento de nós da rede de acesso, com a letra A, é representado por círculos preenchidos em bege. A letra G entre parênteses identifica o nó que é o *gateway* para a rede principal. Os nós cinzas totalmente coloridos desempenham o papel de agregador de tráfego para um determinado nível de rede imediatamente abaixo.

Os nós de comutação nas redes metropolitanas são os nós Metro-*Core* (MC) e estão localizados em Pontos de Presença (PoPs). Os nós da rede Metro-Acesso ou Metro-Agregação (MA), como também são chamados, geralmente são onde os Escritórios Centrais (CO) estão localizados [36, 59]. Outro segmento (não detalhado na figura), que se posiciona à direita da rede de acesso, pode ser mencionado para uma visão panorâmica

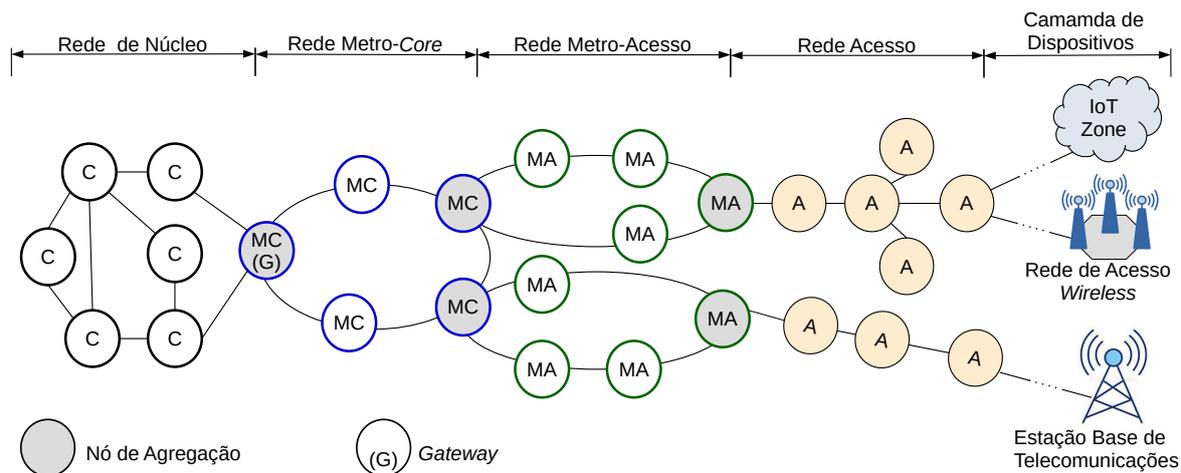


Figura 2.3: Estrutura de Redes de Transporte Óptico

dessas interligações. Este segmento diz respeito à camada de dispositivos usada para agregar clientes finais e/ou aplicação do paradigma IoT [8].

A representação da Figura 2.3 é adotada no [59], que considera redes metropolitanas e de acesso em sua arquitetura. Em [62], os nós MA da Figura 2.3 são chamados por nós metro, e os nós MC são bordas metro-core. Somente nesses nós ocorre a agregação de tráfego.

Muitas vezes a arquitetura da rede metropolitana e da rede de acesso é apresentada como uma única arquitetura, numa perspectiva fim a fim do ponto de vista da transmissão, pois tanto a tecnologia quanto a topologia escolhida para a rede de acesso determinam os pontos de decisão em outros segmentos da rede [29, 59]. Em tais ambientes, os servidores de borda, normalmente facilitados por esses mini-DCs ou um pequeno *cluster* de servidores, geralmente se conectam a pequenas estações base para compartilhar cargas de computação de dispositivos móveis e IoT e fornecer uma alta qualidade de serviço (do inglês *Quality of Service* (QoS)) para usuários finais. Portanto, os servidores de borda são os componentes críticos no ambiente de computação de ponta. As novas perspectivas de organização da infraestrutura de rede têm, cada vez mais, derrubado a visão segmentada e seguido uma concepção unificada da rede, uma vez que os nós de borda na rede de acesso tendem a se tornar tão robustos e complexos quanto os nós da rede metropolitana [23].

A identificação desses pontos principais nas infraestruturas MON também é essencial para o planejamento estrutural das redes 5G para oferta de novos serviços. Em alto nível, a rede 5G é formada por três entidades principais denominadas Unidades Remotas de Rádio (*Remote Radio Units (RRU)*), Unidade Distribuída (*Unidade Distribuída (UD)*) e Unidade Centralizada (*Unidade Centralizada (UC)*). Todas estas entidades estão inter-

ligadas por uma rede de fibra óptica. Nas margens dos nós da rede de acesso estão as RRUs para coletar o tráfego móvel. O tráfego é transportado para o UD para ser processado. Devido à densidade de RRUs, várias UDs são necessárias como forma de melhorar a latência do serviço. A UC é responsável por concentrar o tráfego de várias UDs em uma região, bem como encaminhar o tráfego para a *edge cloud*. A nuvem de borda se conecta diretamente com a nuvem central [62, 63]. Como comparação ilustrativa e simples, essa infraestrutura necessária para redes 5G poderia ser mapeada com redes metropolitanas e ópticas de acesso da seguinte forma: UC e UD estão localizados em nós MA, com alguns pontos UC e nuvens de borda (*edge cloud*) em nós MC.

Para redes 6G, com latência e requisitos de processamento mais rigorosos, a ideia é diluir ainda mais os níveis de distribuição dos nós de computação, levando à implementação de computação de nuvem e de borda em muitos níveis distribuídos com transporte óptico em taxas de dados mais altas[64] .

Para o segmento de interesse deste trabalho, a borda de rede refere-se, em um nível superior, aos dispositivos de rede de primeiro salto que as aplicações usam para se conectar à rede (como roteadores de acesso, placas de interface de rede, comutadores virtuais e estações base na rede móvel) e dispositivos. A mesma entidade administrativa pode gerenciar diferentes partes da rede metropolitana, ou pode se concentrar em oferecer seus serviços em apenas parte desse segmento, como: (i) um operador de centro de dados pode controlar os servidores de borda e *switches (core)* no centro de dados; (ii) um provedor de serviços de Internet pode controlar os roteadores de ponta e os roteadores de núcleo dentro do mesmo sistema autônomo [61]; (iii) um operador de centro de dados pode concentrar seus negócios em uma área do núcleo da rede metropolitana, que é chamada de rede regional, e consiste em vários centros de dados distribuídos que formam a infraestrutura de um mega centro de dados [51]. Para agregar recursos computacionais dos dispositivos na borda da rede, existem nós de computação de nevoeiro (do inglês *fog computing*) para realizar cálculos críticos sensíveis aos dados, com informações da parte da análise enviadas diretamente para a nuvem, para posterior processamento, já que os nós de nevoeiro tradicionais possuem capacidade limitada de computação e armazenamento [8].

Geralmente, os centros de dados nos nós centrais da rede metropolitana são de menor infraestrutura e complexidade, sendo por isso chamados de micro DCs (mDC ou μ DC.). Essa configuração ganhou destaque recentemente pela maior facilidade de gerenciamento e escalabilidade, além do custo reduzido e menor latência na oferta de serviços aos clientes [42]. Por outro lado, no segmento MA, tem havido uma integração constante de plataformas de computação de borda, com infraestruturas mais simples e menos onerosas, comparativamente ao mDC, com a missão de fornecer uma arquitetura distribuída que

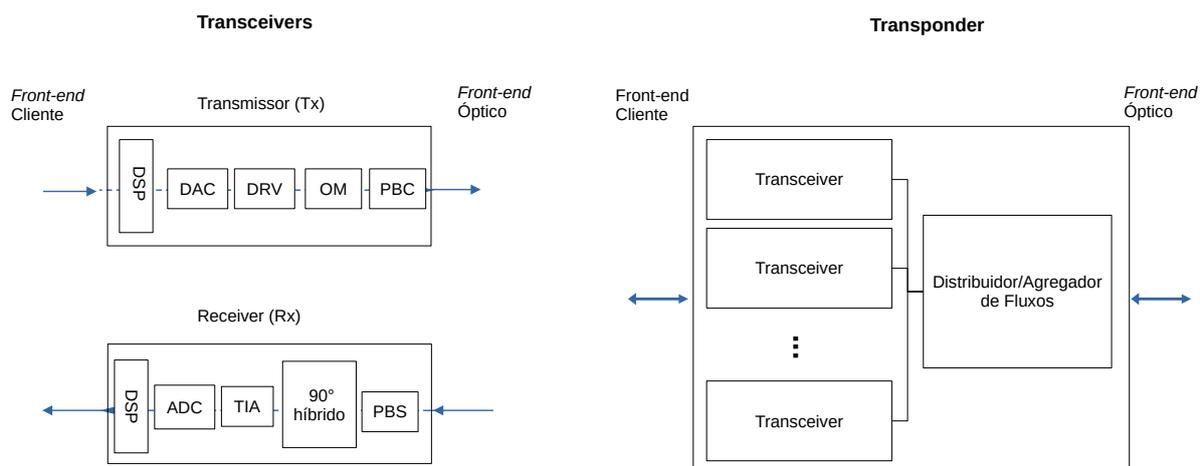


Figura 2.4: Exemplo esquemático de um transponder óptico.

aproxime os serviços de computação e armazenamento do usuário final [8]. Todas essas questões tem levado a maiores possibilidades de topologias de rede, conforme será visto a seguir.

Perspectiva Física

Esta subseção inicia com a definição de alguns equipamentos-chave para a construção de arquiteturas de redes ópticas, que, em geral, são empregados independentemente do sistema de transmissão escolhido. Esses elementos são *switches/comutadores*, multiplexadores/demultiplexadores, transmissores/receptores, amplificadores, elementos passivos e o meio de transmissão, ou seja, a fibra óptica. Dentre eles serão destacados à seguir os transponders, os elementos passivos e os comutadores.

Transponders: Transponders são conversores de sinal do domínio óptico para o domínio eletrônico, ou vice-versa. Em cada porta de entrada existe um dispositivo receptor de tráfego (Rx) e em cada porta de saída existe um dispositivo transmissor de tráfego (Tx) [65]. Na literatura, esses dispositivos são receivers [66] e transceivers [67]. Um esquema de transponder é mostrado na Figura 2.4.

Os blocos de construção desses elementos foram sintetizados a partir de [59, 68, 69] e são mostrados na Figura 2.4. No transmissor, o sinal é processado no Processamento Digital de Sinal (*Digital Signal Processing* (DSP)) em um processo capaz de melhorar sua eficiência. Este sinal é convertido em sinais analógicos usando quatro conversores digital-analógico (*Digital-to-Analog Converters* (DAC)) e modulado nos *drivers* do modulador (*Drive Responsible Vehicle* (DRV)) para evitar a degradação da qualidade. Em seguida, o sinal é modulado por modulador óptico (OM), componentes em fase e em quadratura,

por exemplo, e seus componentes são combinados por combinador de feixe de polarização (*Polarization Beam Combiner* (PBC)) para serem transmitidos no domínio óptico. No receptor, o divisor de feixe de polarização (*Polarization Beam Splitter* (PBS)) divide o sinal em componentes que são enviados para 90° híbridos para divisão de potência. Em seguida, o sinal é amplificado com amplificadores de transimpedância (*Trans-Impedance Amplifiers* (TIA)) para garantir a estabilidade enquanto torna o sinal passível de ser convertido e digitalizado, passando então para um Conversor Analógico-Digital (ADC). Na sequência, o sinal é enviado ao DSP para adequar a taxa de dados esperada. Os transponders são formados por alguns módulos transceptores e são capazes de combinar e converter comprimentos de onda [68, 69].

Em termos de Tx e Rx, tanto os blocos DSP mais simples quanto os mais complexos podem ser usados, ou seja, transponders coerentes (*Coherent Transponder* (CT)) e de detecção direta de modulação de intensidade (*Intensity-Modulation Direct-Detection* (IMDD)), são bem aceitos em arquiteturas de redes metropolitanas [59, 70]. Como a infraestrutura de fibra óptica com rotas longas é cara de implementar, e como as operadoras desejam tirar o máximo proveito dessa infraestrutura enviando o máximo de informações possível sobre cada fibra, o CT permite vários formatos de codificação de sinal com modulações especiais que aumentam a eficiência espectral por meio de constelações de sinal com vários bits por símbolo. Essas características levam a maiores taxas de transmissão de dados e maior alcance de transmissão, embora sejam mais caras [26]. As soluções IMDD são tecnologias de baixo custo, geralmente utilizadas em segmentos de rede com menor alcance de transmissão, porém, necessitam de métodos de compensação de dispersão (DCM) para tolerar perdas de sinal durante a transmissão, devido ao problema de dispersão cromática (CD). Esse problema ocorre porque diferentes comprimentos de onda da luz viajam em diferentes velocidades na fibra óptica, o que gera uma mistura de luzes [39].

Outra variedade de Tx e Rx que será adotada no âmbito das redes metropolitanas são os Transponders de Largura de Banda Variável (*Bandwidth Variable Transponder* (BVT)s) [53]. Este tipo de equipamento é responsável por garantir a propriedade de flexibilidade de transmissão devido à sua capacidade de operar dinamicamente a largura de banda, taxa e alcance de transmissão. Para explorar toda a largura de banda disponível, os BVTs devem ser operados até um valor máximo de largura de banda de transmissão, referente a um canal. Uma solicitação de tráfego inferior à largura de banda máxima de transmissão do BVT resulta em uma operação com taxa de transmissão abaixo de sua capacidade máxima, resultando no desperdício de parte da largura de banda disponível. Para superar o problema de largura de banda desperdiçada e fornecer um maior grau de flexibilidade, foram propostos transceptores de largura de banda variável fatiável (*Slicea-*

ble Bandwidth Variable Transceivers (SBVT)s) ou transponders multi-fluxo. Os SBVTs permitem que múltiplos fluxos ópticos sejam enviados para diferentes destinos, inclusive simultaneamente, com sinal pré-selecionado através de diversos parâmetros de transmissão, como formato de modulação, codificação e faixa de transmissão [66]. A arquitetura de rede metropolitana apresentada em [40], adequada para suportar serviços móveis de 5G, prevê a implantação de SBVTs em sua infraestrutura para permitir configuração dinâmica de caminhos ópticos, prover serviços de baixa latência e restauração dinâmica.

Através do projeto *Photonic technologies for programmable transmission and switching modular systems based on Scalable Spectrum/space aggregation for future agile high capacity metro Networks* (PASSION) foi desenvolvido um dispositivo SBVT [45] com capacidade de até 8 Tb/s de transmissão, baseado na tecnologia VCSEL (*laser* emissor de superfície de cavidade vertical) para agregar todos o volume de dados esperado para o futuro da MAN (*edge*, 5G, HD-TV). Os SBVTs podem receber duas classificações diferentes de acordo com o tipo de fonte portadora óptica utilizada na arquitetura. São classificados como SBVT Multi-*Laser* (ML-SBVT), modelo que utiliza mais do que um *laser* convencional, e SBVT Multi-Comprimento de Onda (MW-SBVT), que utiliza um único *laser* como fonte de vários comprimentos de onda para gerar os diversas transportadoras. Os MW-SBVT são mais vantajosos por não exigirem o uso de banda de guarda entre os canais na criação dos supercanais, mas os ML-SBVTs possuem maior liberdade, pois cada laser pode ser ajustado de forma independente para sintonizar uma determinada frequência em um *slot* específico sem o espaçamento da portadora é necessariamente igual [71]. Também se destaca na literatura um modelo de SBVT denominado módulo centralizado flexível de portadora óptica (do inglês *Centralized Flexible Optical Carrier Source Module* (Flex-OCSM)) [72] que é baseado em um controlador centralizado, responsável por fornecer portadoras ópticas a todos os transponders de um dado nó, permitindo assim o compartilhamento de portadores entre SBVTs implantados, o que não é possível no caso de ML-SBVTs e MW-SBVTs.

Divisores, Acopladores/Combinadores e Bloqueadores: Divisores (*splitters*), acopladores/combinadores (*Couplers/Combiners*) e bloqueadores (*blockers*) são elementos passivos comumente usados em MON principalmente devido ao baixo custo e simplicidade [57, 58]. O divisor óptico divide o sinal óptico para mais de uma fibra. A potência de saída do sinal em cada uma das fibras ramificadas dependerá da taxa de divisão do sinal para cada saída. Acopladores ópticos combinam dois ou mais comprimentos de onda na mesma fibra ou distribuem a força do sinal de uma fibra sobre várias outras fibras [73]. Bloqueadores são usados em conjunto com acopladores e divisores para limitar a passagem de certos comprimentos de onda, garantindo que apenas o sinal necessário seja

transmitido [74].

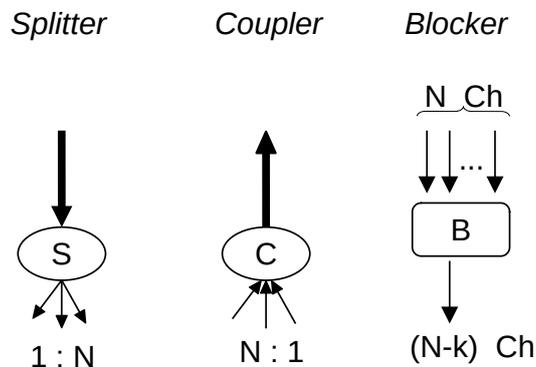


Figura 2.5: Dispositivos passivos: *Splitter*, *Coupler* (ou *Combiner*) e *Blocker*.

Na escolha desses dispositivos deve-se levar em consideração o tipo de banda de operação e o modo de fibra que serão utilizados, pois os dispositivos de fibra monomodo são diferentes dos dispositivos de fibra multimodo. [10]. Um exemplo de uso será mostrado na Figura 2.8, bem como em mais detalhes na Figura 2.5. Quando acopladores, divisores e bloqueadores são usados em vez de filtros, alguns efeitos colaterais podem ser detectados. Entre eles está a redução na disponibilidade de comprimento de onda, a menor faixa de sinais devido ao excesso de ruído e taxa de erro de *bit* (*Bit Error Rate* (BER)), e o acúmulo de ruído fora de banda gerado por transmissores ópticos e possíveis interferências em canais adjacentes [10, 29, 59, 65, 75].

Comutadores e Filtros Ópticos: Neste tópico, serão destacados os principais elementos de comutação utilizados nas MONs, que são os comutadores da rede de transporte óptico (*Optical Transport Network* (OTN)) e Multiplexador Óptico de Adição e Remoção de sinal (*Optical Add and Drop Multiplexer* (OADM)). Os dois tipos principais de OADM que serão abordados são Multiplexador Óptico Fixo de Adição/Remoção (*Fixed Optical Add/Drop Multiplexer* (FOADM)) e Multiplexador Óptico Reconfigurável de Adição/Remoção (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer* (ROADM)). Os OADMs possuem importantes componentes que realizam a seleção dos comprimentos de onda, chamados de filtros. Assim, serão destacados dois tipos de filtros utilizados nos comutadores, denominados Grade de Guia de Onda (*Arrayed Waveguide Gratings* (AWG)) e Comutador Seletivo de Comprimento de Onda (*Wavelength Selective Switch* (WSS)).

Do ponto de vista físico, as primeiras arquiteturas MONs foram construídas de forma híbrida, ou seja, com uma mistura dos dispositivos eletrônicos e dispositivos ópticos. Nos

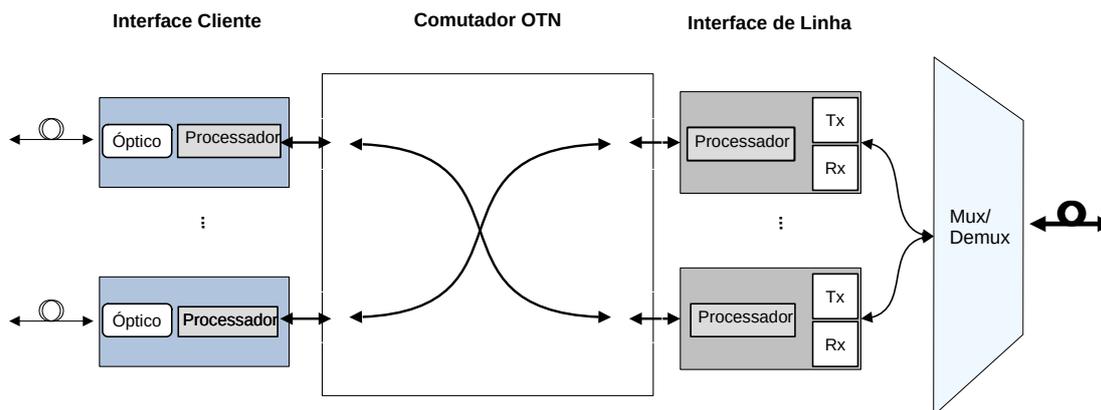


Figura 2.6: Nó OTN e suas conexões.

nós, foram utilizados comutadores eletrônicos baseados no padrão OTN ITU-T *G.709* com enlaces ópticos baseados em WDM [37]. Essa padronização define o formato de encapsulamento, multiplexação, comutação, gerenciamento, supervisão e capacidade de sobrevivência dos canais ópticos que transportam o fluxo de dados. Um cartão/placa cliente (no lado do cliente) e um cartão/placa de linha (no lado da linha óptica) são como interfaces de conexão, mostrados na Figura 2.6. Tanto na placa do cliente quanto na placa de linha existe um processador que é responsável por gerenciar as funções de mapeamento do quadro de dados. O tráfego proveniente do lado do cliente é agregado e mapeado, no respectivo cartão do cliente, para um quadro Unidade de Carga Útil de Canal Óptico (*Optical Channel Payload Unit (OPU)*). No comutador, o quadro da OPU é mapeado para um contêiner denominado Unidade de Dados de Canal Óptico (*Optical Data Unit (ODU)*), que é então mapeado para a Unidade de Transporte de Canal Óptico (*Optical Transport Unit (OTU)*) na placa de linha. Na placa de linha, o padrão OTN realiza o encapsulamento digital (*Digital Wrapper*) de vários fluxos de dados eletrônicos em comprimentos de onda de cada um de seus nós e é necessário um procedimento de conversão OEO por meio de transponders (Tx e Rx) [37, 76]. No nível do comprimento de onda, o tráfego é multiplexado para ser transportado por um caminho óptico ou desmultiplexado para algum contêiner ODU de nível inferior. A multiplexação e demultiplexação é realizada por filtros ópticos, que serão destacados mais adiante.

Um avanço tecnológico imediato para a implementação de nós OTN em redes metropolitanas foi a introdução de mais elementos ópticos na construção e estabelecimento do nó. O nó apresentado na Figura 2.6 é implementado com base no modelo de nó OTN independente, uma vez que o comutador OTN na camada eletrônica e os elementos da camada óptica são conectados por fibra óptica de curto alcance, o que gera muitas interconexões de fibras reversas. Este modelo evoluiu para o modelo de implementação de nó integrado, no

qual as interconexões de fibra reversa são removidas e as interfaces ópticas (Mux/Demux) são acopladas no mesmo chassi do sistema OTN que fornece a funcionalidade de comutação [77]. Em sistemas WDM o dispositivo utilizado como multiplexador/demultiplexador é o OADM.

Desde a segunda geração de redes ópticas, as redes metropolitanas deixaram o formato híbrido e passaram a ser totalmente ópticas. Os nós de roteamento e comutação óptica foram constituídos por dois tipos de OADM, denominados FOADM e ROADM [78]. O ROADM também é chamado por conexões cruzadas ópticas (*Optical Cross-Connect* (OXC)s). Como OXC é uma maneira mais genérica de se referir a um dispositivo de comutação óptica, ambas as formas, ROADMs / OXC são frequentemente usadas de forma intercambiável na literatura [65, 79].

Embora o principal bloco de construção dos ROADMs seja o WSS, o FOADM pode ser baseado no AWG [80]. Ambos são filtros ópticos [81], mas é o AWG [3, 82] que pode ser usado como alternativa para reduzir custos de rede [83]. O FOADM permite que um comprimento de onda seja removido localmente e reutilizado, além de permitir que o mesmo comprimento de onda seja adicionado para ser transportado na direção oposta. O ROADM permite que qualquer comprimento de onda individual ou comprimento de onda múltiplo seja redirecionado para outro local, adicionado e/ou descartado em um local e ajuste ou altere a configuração de adição/remoção se ocorrerem alterações no tráfego. FOADM permite alocação estática de comprimentos de onda, ROADM permite alocação dinâmica. A configuração do FOADM é realizada manualmente no local onde o *hardware* está implantado, e os mapeamentos das portas de entrada e saída são estabelecidos por um tempo considerável. O ROADM, por ser mais flexível, permite que as configurações de *hardware* sejam feitas via software remotamente. Além disso, com ROADMs dinâmicos, muitos outros recursos podem ser implementados, incluindo proteção e restauração na camada óptica [29]. Em ecossistemas com um sistema de transmissão EON, os nós ROADM ou OXC são geralmente referidos como OXC de largura de banda variável (BV-OXC) [79] ou BVXC [84].

O WSS é usado para alocar dinamicamente comprimentos de onda para diferentes canais ópticos, permitindo o uso eficiente dos recursos da rede e maior capacidade de largura de banda. A Figura 2.7 mostra como funciona o WSS. O WSS recebe todas os comprimentos de onda da fibra através da porta de entrada comum. Os comprimentos de onda são separados, encaminhados para um transponder para serem convertidos para a camada eletrônica, ou permanecem no meio óptico, sendo encaminhados pela fibra até outros nós. Na figura, é mostrado um WSS $1 \times N$ e um acoplador passivo, ($N = 5$). Múltiplos comprimentos de onda recebidos do nó de rede *upstream* são amplificados e direcionados para a porta de entrada do comutador seletivo de comprimento de onda.

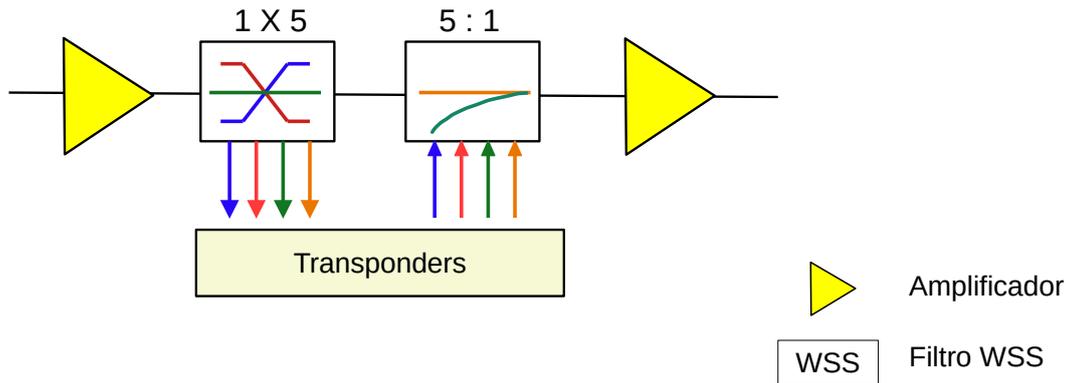


Figura 2.7: Esquema simplificado de um comutador seletivo de comprimento de onda (WSS).

O *switch* pode selecionar até quatro dos comprimentos de onda e passar cada um para qualquer uma das quatro portas de remoção. Comprimentos de onda não descartados são passados para a porta de passagem. Os comprimentos de onda são adicionados com um WSS idêntico empregado em reverso ou com um simples acoplador de fibra passiva do tipo N:1 [85].

Como o mais importante é manter a integridade do sinal de tráfego, para garantir que ele continue para o próximo nó em seu caminho, apenas uma pequena parte da potência do sinal de entrada é direcionada para cada porta WSS, com o restante direcionado para o fibras de rede. Além disso, geralmente há amplificação em um nó, para ajudar a mitigar a perda de divisão. Várias arquiteturas ROADM baseados em WSS para redes ópticas metropolitanas são apresentadas em [65, 82] e [86]. Muitas outras configurações de ROADMs com WSS são possíveis, pois este é o equipamento responsável por definir o grau do nó ROADM. No contexto de redes flexíveis, os ROADMs são implementados usando outros componentes ópticos específicos, como Comutador Seletor de Espectro (*Spectrum Selective Switch* (SSS)s), Comutador *Multicast* (*Multicast Switch* (MCS)s) e diferentes configurações de transponder. Os MCSs são implantados em multiplexadores ópticos de adição/remoção reconfiguráveis incolores, sem direção e sem contenção (*Colorless, Directionless and Contentionless Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers* (CDC-ROADM)s). No CDC-ROADM, qualquer comprimento de onda da porta de entrada pode ser comutado para qualquer porta de saída, e isso ocorre porque o MCS fornece a cópia do sinal. O MCS pode ser visto como uma espécie de WSSs NxM devido ao número de conexões, mas é composto por uma série de divisores/acopladores. Outras variações com menor grau de flexibilidade são o *Colorless* ROADM (C-ROADM) e o *Colorless and Directionless* ROADM (CD-ROADM) [20].

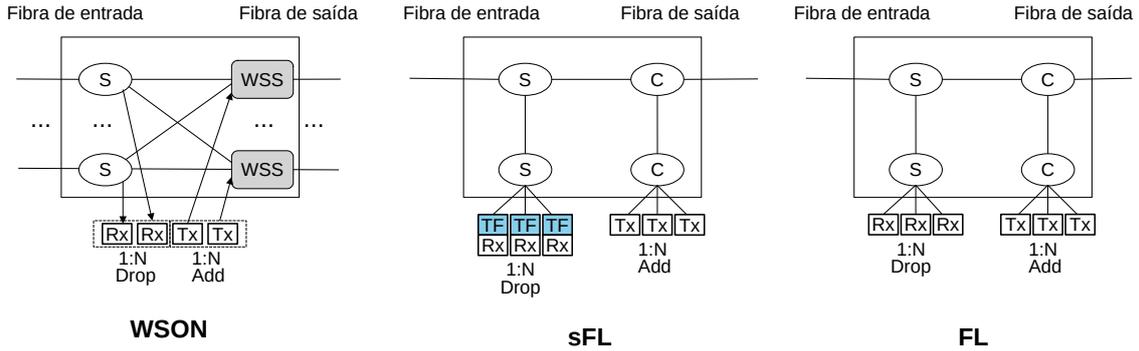


Figura 2.8: Alguns tipos de nós ópticos: WSON (A), sFL (B) e FL (C)

2.1.3 Classificação de Redes com Respeito à Utilização de Filtrros

Com base na presença e tipos de filtros na composição de um nó de comutação, pode-se dizer que esse nó possui arquitetura com comutação de comprimento de onda (do inglês, *Wavelength Switched Optical Networks (WSON)*), sem filtro (do inglês, *Filterless (FL)*) ou semi sem filtro (do inglês *Semi-Filterless (sFL)*). Estes conceitos são exemplificados na Figura 2.8 através de 3 nós. No exemplo A) o nó é um ROADM com arquitetura *Broadcast-and-Select (BnS)*, composto por N divisores passivos (S) que conectam as N fibras de entrada (lado esquerdo da figura), que direcionam o sinal para cada um dos N Filtros WSS no lado direito da figura. Dessa forma, um sinal que entra no nó por uma fibra de entrada da rede pode ser enviado para várias fibras de saída. Neste exemplo, S está realizando a transmissão, enquanto o WSS está selecionando ou filtrando o sinal para otimizar o desempenho. Embora o divisor passivo transmita cada sinal recebido, ele normalmente não divide a energia uniformemente entre as portas WSS.

No exemplo B) é mostrada uma arquitetura de nó sFL [87]. Nesse caso, os sinais são transmitidos em todas as saídas de elementos passivos, isto é, o acoplador óptico, que combina os sinais dos outros nós e os sinais adicionados localmente da porta de adição de sinal (*Add*), através dos Txs. Os Rxs correspondem a uma porta de remoção de sinal (*Drop*) para canais pré-definidos. Embora não haja WSS implantado, um tipo de filtro sintonizável (do inglês *Tunable Filters (TF)*) de baixa complexidade é integrado ao transponder, usado para atenuar com limitações os efeitos de cascata geral do nó. Este modelo de filtro é mais simples, geralmente chamado de “*lite*”, e é responsável por tornar cada Rx viável para médias distâncias, de forma que as funções de processamento digital de sinais sejam ajustadas para redução de custos e consumo de energia [67].

Já no exemplo C), de um nó de arquitetura FL [87], um acoplador apenas divide o sinal em múltiplas saídas, causando conseqüentemente uma redução na potência [88], e

não há qualquer tipo de filtro presente. Tanto o exemplo *B)* quanto o exemplo *C)* possui arquiteturas *Drop and Waste* (DnW) [10]. Nesta arquitetura, o sinal removido se propaga de forma a ocupar todo o espectro na direção posterior ao local do estágio de remoção. As arquiteturas de rede que empregam esses dois tipos de nós geralmente possuem ROADMs nas extremidades. Assim, para transmissão, os sinais se propagam até chegarem aos ROADMs, mas algum sinal óptico pode se perder ou se tornar inútil, devido ao acúmulo de ruído.

Como a arquitetura dos nós fica mais simples devido à eliminação de alguns elementos implantados, seu CAPEX e OPEX também tendem a ser reduzidos. Isso ocorre porque os elementos eliminados são equipamentos ativos, isto é, funcionam com alimentação elétrica, além de possuírem maior custo de aquisição [10, 87].

2.1.4 Topologias de Rede

Na Figura 2.3 é possível observar algumas características quanto à topologia da rede. Enquanto em redes core e metropolitanas são esperadas topologias em malha e anel, que são relativamente mais complexas, em redes de acesso é comum a organização de nós em topologia em cadeia, estrela ou árvore. Alguns tipos de topologias que serão destacados nesta seção são mostrados na Figura 2.9.

Na Figura 2.9, essas topologias consideradas mais complexas fornecem melhor conectividade, um número mais significativo de rotas e, conseqüentemente, mais recursos, o que possibilita reduzir a latência para a prestação dos serviços. Os nós metropolitanos em malha são geralmente mais simples do que os de *backbone/core* de malha porque na metro, apesar de existirem mais nós, esses nós têm um menor grau de conectividade [85]. Por outro lado, são complexos devido às limitações de desempenho físico que impactam na transmissão de sinais ópticos em distâncias maiores, levando à necessidade de implementação de mais equipamentos na rede para tratar o sinal e melhorar a qualidade da transmissão. Outro reflexo direto das topologias mais complexas é o alto custo de planejamento e operação, tanto pelo custo do equipamento quanto pelo consumo de energia deste equipamento quando em operação. As redes malha também são muito complexas de gerenciar. Nesse tipo de rede, um esforço computacional mais significativo é necessário para determinar caminhos não conflitantes que atendam às restrições do serviço, enquanto as limitações da camada física diminuem a qualidade da transmissão [89]. Hoje, o modelo em anel amplamente adotado contrasta com a tendência de implantação da topologia malha [25]. O principal motivo dessas mudanças é a necessidade de adequar a infraestrutura para lidar com o aumento do tráfego e a oferta de novos tipos de serviços, como aplicativos de inteligência artificial e serviço 5G, por exemplo, e também com o aumento do número de assinantes e com a taxa de dados desses assinantes nas redes

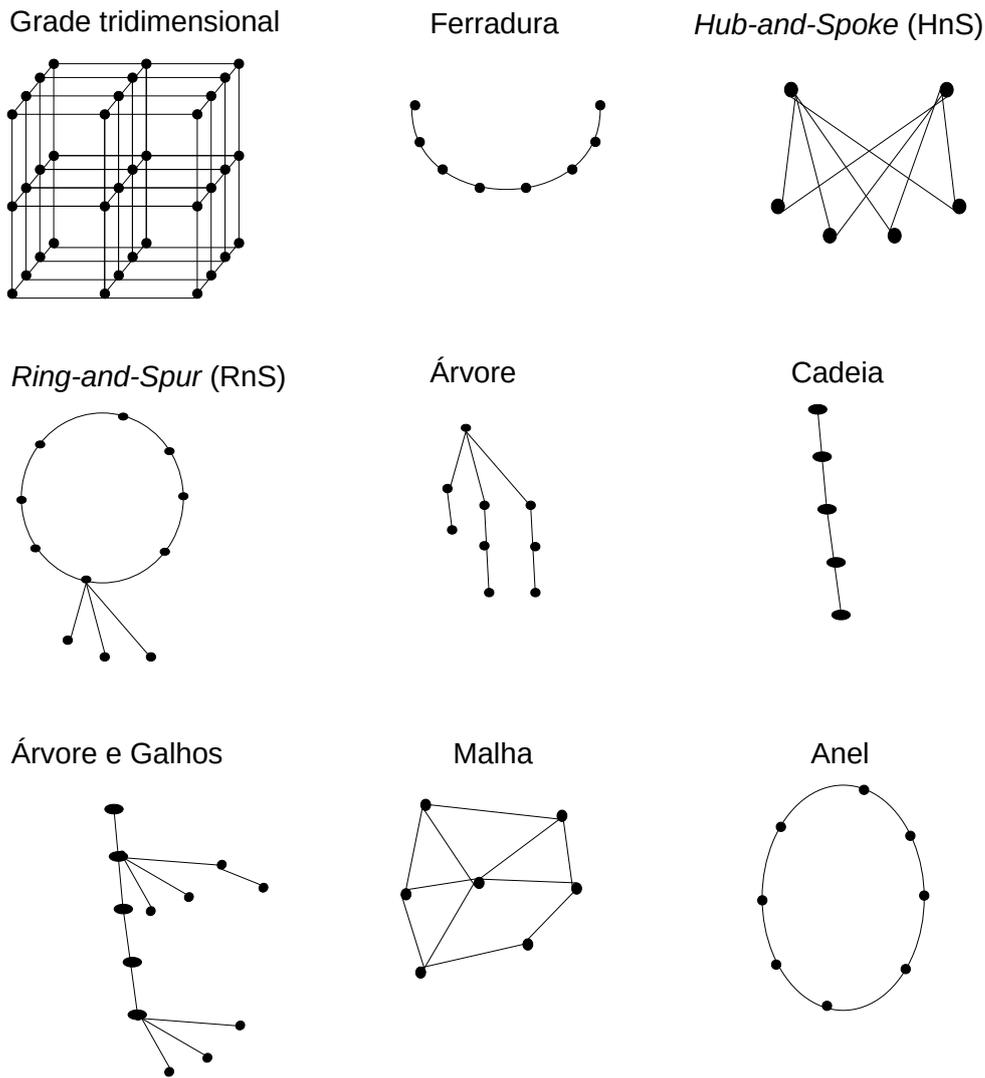


Figura 2.9: Exemplo de tipos de topologias de rede.

de acesso [4]. Recentemente, a topologia de grade tridimensional para rastreamento de acesso metropolitano foi apresentada em [3]. Nesta topologia de rede, cada nó se conecta a dois nós vizinhos ao longo de uma ou mais dimensões. Por razões de redução do custo de implantação e operação, destaca-se a existência de topologias em cadeia e semi-anel ou anel quebrado, em particular, ferraduras, como é o caso da *Croatian Telecom* [75].

No entanto, a topologia física não é a única questão discutida entre as tendências arquitetônicas para redes metropolitanas. De olho na funcionalidade estratégica para o tráfego de novos serviços, a literatura tem mostrado que os segmentos metro e acesso têm sido planejados em conjunto [6, 57, 90]. A topologia lógica *Hub-and-Spoke (HnS)* [91] é uma proposta na qual alguns nós são designados como *hub* e funcionam como um veículo de comunicação e como agregador entre os outros nós, que são então designados

como *spoke*. Nesse caso, os nós de *hub* são representados por nós de metro-agregação que se associam aos nós *spoke* representados como nós de acesso. A principal vantagem de adotar uma topologia lógica é que, independentemente da topologia física, novas políticas e reconfigurações de operação podem ser implementadas sem adicionar novos equipamentos à infraestrutura de rede subjacente. Além disso, do ponto de vista de tráfego e serviços, o fluxo direto de comunicação entre os nós de acesso e os nós da rede metropolitana ocorre com baixa latência, mesmo que a topologia física da rede metropolitana seja em malha. No entanto, essa vantagem também é uma restrição em relação à escalabilidade da topologia lógica. Da mesma forma, falhas na infraestrutura física podem comprometer o funcionamento da topologia lógica, levando a falhas de comunicação.

Essas tendências para novas topologias de rede também impulsionam a evolução das redes de acesso. No passado, as topologias mais comuns eram topologias em árvore e em cadeia (Figura 2.3). Recentemente, a topologia em anel, *Ring-and-Spur (RnS)*, tem sido proposta para distâncias superiores a 100 km em redes de acesso [92]. Em contraste, a topologia de árvore e galhos, ou árvore ramificada, antes considerada uma topologia fraca porque requer muitos amplificadores e divisores, hoje pode ser pensada como uma nova forma de aproveitar a quantidade mais significativa de canais ópticos disponíveis desde que a tecnologia EON levou à redução do espaçamento da grade do espectro óptico. Portanto, essas topologias são essenciais na hora de escolher qual arquitetura de rede adotar. Além disso, enquanto as topologias de árvore ou cadeias, topologias mais tradicionais, requerem amplificadores, divisores e combinadores ópticos para estender a árvore, as topologias de malha requerem elementos de comutação fotônica, como ROADMs ou OXC, tanto para sintonizar a potência do canal de transmissão quanto para gerenciamento extensivo de largura de banda. Em [93], são destacadas as principais restrições para o uso de arquiteturas sem filtro, por exemplo: (i) é o alcance do sistema de transmissão utilizado que vai decidir a distância máxima entre a raiz e uma folha, no caso da topologia em árvore, ou a distância máxima entre as duas extremidades no caso das topologias em cadeia; (ii) como a transmissão é do tipo *broadcast-and-select* entre todos os nós, a capacidade do sistema limita o número máximo de comprimentos de onda por fibra; (iii) limite de reutilização de comprimento de onda na arquitetura “*drop-and-continue*” do sistema de linha, que leva ao acúmulo de Emissão Espontânea Amplificada (ASE) e cria canais não filtrados. Como esses problemas estão mais presentes em sistemas de longa distância, a literatura tem mostrado que no ambiente de rede metropolitana, e com a implementação de tecnologia coerente, tem sido possível alcançar soluções mais eficientes e de baixo custo.

Muitas das novas arquiteturas apresentadas recentemente na literatura foram pensadas como forma de reduzir o custo e melhorar o desempenho do sistema como um todo. Porém, com os diversos tipos de serviços e aplicações sendo oferecidos nas redes metropolitanas,

a tendência é que o número de nós MA aumente consideravelmente para proporcionar maior capilaridade de rede às diversas conexões para usuários finais, bem como a migração massiva de estruturas de redes de DCs para nós MC no segmento metropolitano, sendo oferecidos na forma de *fog* ou μ DC [42].

Assim, as próximas gerações de redes metropolitanas precisam de novas soluções para lidar com os novos requisitos, e tais soluções podem ser investigadas tanto no campo da engenharia de redes quanto no campo da engenharia de tráfego. No campo da engenharia de redes, são propostas novas arquiteturas de rede, bem como novos equipamentos capazes de fornecer maior capacidade de banda com tecnologia consistente e uso eficiente do espectro óptico. Destacam-se as arquiteturas de rede metropolitana mais recentes nos Capítulos 3 e 4.

2.2 Redes Ópticas Elásticas

Rede Óptica Elástica (EON) é um tipo de rede óptica que permite a alocação dinâmica de largura de banda e dimensionamento de redes ópticas. É um tipo avançado de rede óptica WDM e tecnologias de comutação óptica. A EON permite o compartilhamento de largura de banda entre vários serviços, permitindo o uso eficiente dos recursos de rede.

O sistema de transmissão EON é proposto como uma solução para problemas de aproveitamento de espectro, para superar o uso ineficiente de recursos. Com EON o espectro óptico é dividido em porções de 12,5 GHz e um comprimento de onda portadora de 6,25 GHz de acordo com a recomendação ITU-T G.694.1 [85, 86, 94]. Essas porções formam um canal ou *Frequency Slot Units* (FSUs), que representa a banda mínima possível de ser configurada no equipamento. Quando a conexão óptica requer uma largura de banda maior que 12,5 GHz, ela pode se espalhar por várias FSUs. Uma única conexão pode ocupar várias FSUs adjacentes, criando assim um supercanal para transmissão [53]. Por outro lado, a granularidade mínima é útil para atender requisições de baixa velocidade, muito comuns em alguns serviços presentes em redes metropolitanas, porém com considerável desperdício espectral para demandas abaixo de 1 Gb/s [57]. EON usa OOFDM como uma técnica de multiplexação espectral.

A OOFDM é uma técnica de modulação usada em redes ópticas que permite a transmissão de vários fluxos de dados simultaneamente em uma única fibra óptica. Com OOFDM o espectro óptico disponível é dividido em vários canais, sendo cada um dos quais modulado por um sinal individual. Isso permite a transmissão de múltiplos sinais na mesma fibra, aumentando a capacidade da rede [79]. As configurações OOFDM são implementadas nos transmissores e receptores para a devida conversão do sinal.

A alocação de recursos na EON é realizada resolvendo o problema de Roteamento e Atribuição de Espectro (RSA) [83]. Quando a arquitetura possui fibras multinucleadas, o problema que precisa ser resolvido é o de Roteamento, ajuste do Canal Espacial e Atribuição de Espectro (*Routing, Spatial channel and Spectrum Assignment (RSSA)*) [95].

Como EON é uma evolução do sistema DWDM [54], o termo DEON está sendo proposto neste trabalho como uma versão especializada de EON que inclui o uso de espaços espectrais (FSUs) mais estreitos que o usual 12,5 GHz, considerado até agora como o menor espaçamento possível de acordo com a recomendação ITU-T *G.694.1* [94]. Na literatura é possível observar experimentos na tentativa de reduzir o tamanho da FSU [57, 58, 79, 83, 96], principalmente em redes ópticas metropolitanas, para proporcionar melhor adequação das taxas de dados praticadas neste segmento com o que é disponibilizado de recursos, o que aumenta consideravelmente o número de canais disponíveis para transmissão.

2.2.1 Arquitetura EON

A implantação de uma arquitetura EON requer a instalação de alguns equipamentos de *hardware* capazes de operar conjuntamente a largura de banda espectral com ajuste mais fino. Os nós na rede são interligados por fibra óptica, conectados usando uma variedade de topologias, como malha ou anel. A Figura 2.11 mostra a composição da arquitetura EON, formada por comutadores ópticos *Bandwidth Variable Optical Cross-Connects (BV-OXC)*, transmissores/receptores de largura de banda variável denominados *Bandwidth Variable Transponder (BVT)*, por fibra óptica e amplificadores quando necessário.

A partir de recomendações oriundas da ITU-T, o espectro da fibra óptica é subdividido em fatias denominadas *slots* de frequência (FS) ou unidades de *slots* de frequência (do inglês, *Frequency Slot Units (FSU)*). Mesmo que exista a vantagem de poder realizar agregação óptica para a criação de um supercanal, isto é, a aglutinação de uma sequência de canais consecutivos na forma de uma entidade única, com grade fixa ocorre com frequência a subutilização de um canal, o que representa uma desvantagem. Para a EON, a largura de banda é tipicamente 6,25 GHz ou 12,5 GHz, representando uma menor granularidade se comparado com o padrão adotado atualmente nas redes WDM (Figura 2.10) [2]. Devido a essa nova divisão do espectro, é possível realizar alocações na grade flexível de acordo com as demandas dos usuários e reduzir o desperdício no canal, visto que muitas das demandas ocupam completamente um FS. Devido ao sistema OOFDM, no qual se baseia essa nova grade, é possível alcançar maior eficiência de recursos espectrais e fazer uso de diferentes formatos de modulação para suportar canais flexíveis e escalonáveis de

super-comprimento de onda (como 150 GHz, por exemplo) e sub-comprimento de onda (a exemplo de 25 GHz, mostrado na Figura 2.10) [97].

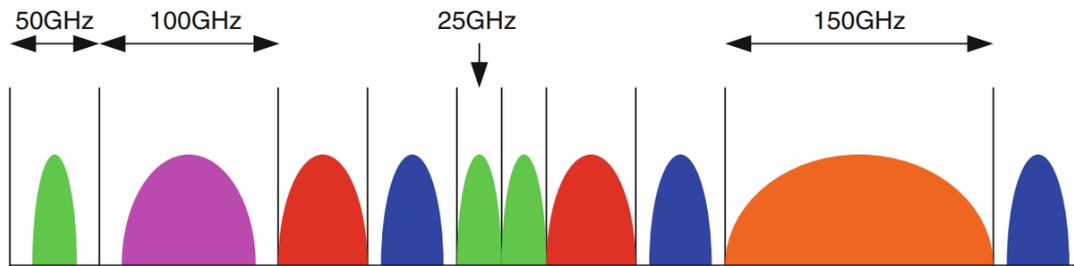


Figura 2.10: Ilustração da grade flexível [2].

Sabendo que a largura de banda base de um FS, representada como BB é de 12,5 GHz, se um determinado formato de modulação de M_i bits por símbolo for atribuído em uma dada alocação, a capacidade do FS é dada pela Equação $C = M_i * BB$, em Gbs [2].

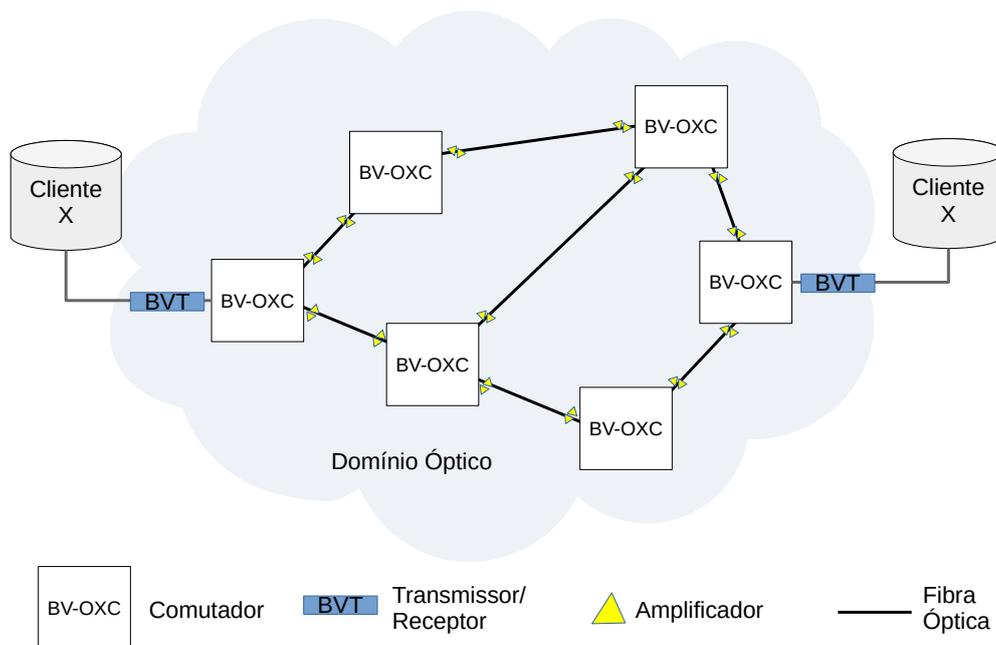


Figura 2.11: Arquitetura das Rede Ópticas Elásticas (EON).

Para que dois clientes distintos se comuniquem, os BVTs configuram a frequência (janela espectral) de transmissão de acordo com a demanda requisitada, enquanto os BV-OXC têm o papel de estabelecer o caminho óptico fim-a-fim em grade flexível. A transmissão ocorre através da fibra óptica conectada a estes equipamentos. Os amplificadores podem ser empregados em algumas situações onde a distância de transmissão é um impeditivo para a boa detecção do sinal, mas este problema tem sido minimizado

em EON devido a maior adaptabilidade dos BVTs. A seguir, serão apresentados mais detalhes sobre estes equipamentos.

Transmissor/Receptor BVT

Um BVT é utilizado em EON para o estabelecimento de um caminho óptico, alocado ao longo de uma mesma fatia ou conjunto de fatias espectrais que satisfaçam as restrições de transmissão [98]. A evolução do BVT é o também flexível *Sliceable Bandwidth Variable Transceivers (SBVT)*, um *transponder* multifluxo que simultaneamente é capaz de rotear vários fluxos em diferentes destinos mantendo a qualidade da transmissão. Esses *transponders* são normalmente empregados na transmissão em redes de longa distância e metropolitanas, como também de redes *data center* [53]. Os *transponders* SBVT podem ser usados em combinação com amplificadores ópticos, como os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFAs), para estender o alcance do sinal óptico. De acordo com [53, 99], há três classificações típicas para os BVTs de acordo com o seu nível de “fatiabilidade”, as quais são não fatiável (NS-BVT), totalmente fatiável (FS-BVT) e parcialmente fatiável (PS-BVT). O NS-BVT compreende o BVT monofluxo mencionado na definição, enquanto que o FS-BVT compreende o SBVT com máximo grau de liberdade em termos de multifluxos simultâneos. Já os PS-BVT representam o meio termo onde a divisão de fluxos é provida de maneira lógica e limitada em termos de quantidade de subportadoras, formatos de modulação e taxas de transmissão [99]. A Figura 2.12 mostra, de forma simplificada, a arquitetura de um SBVT. O dispositivo SBVT representa uma interface entre a camada eletrônica contendo o cliente e camada óptica. O SBVT conecta uma fonte de N subportadoras (com os sinais dos clientes) igualmente espaçadas, um módulo para processamento eletrônico (DSP), um comutador eletrônico, um conjunto de N circuitos fotônicos integrados (*Photonic Integrated Circuits (PIC)s*) e um multiplexador óptico já na rede óptica. As N subportadoras são geradas por uma única fonte (vários *lasers*, por exemplo) de vários comprimentos de onda. O sinal vindo do cliente é processado/filtrado no domínio eletrônico, em seguida é roteado pela matriz de comutação em direção a um PIC específico. As portadoras geradas são igualmente espaçadas de acordo com os requisitos espectrais e a técnica de transmissão adotada [100]. No BVT o tráfego que chega é encaminhado para um único destino ou MUX. Já no SBVT, é possível encaminhar o tráfego para múltiplos destinos simultaneamente.

A OOFDM gera os sinais combinando modulação de campo linear em amplitude, bem como em banda lateral única. Já na recepção do sinal, o sinal óptico pode ser recuperado com detecção direta (*Intensity-Modulation Direct-Detection (IMDD)*) [44] ou coerente (CO-Rx) [26]. O Rx do tipo IMDD é de mais baixo custo devido a sua simplicidade. Um receptor desse tipo funciona variando a intensidade da luz (*laser*, geralmente externo) para

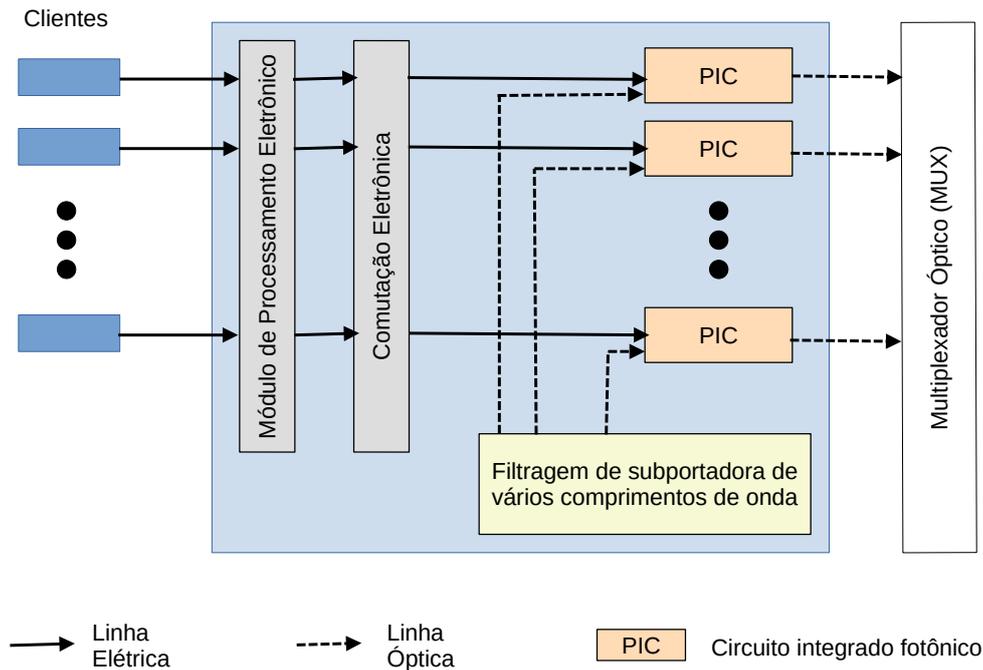


Figura 2.12: Arquitetura do SBVT.

codificar informações. A fonte de luz é modulada por um sinal elétrico e a intensidade da luz sofre as variações. Assim, o receptor detecta a essa variação da intensidade da luz e a converte de volta em um sinal elétrico. Já no caso do receptor coerente, o custo é mais alto devido ao ajuste fino que implementa para manipular o sinal. Devido ao mais avançado módulo de processamento eletrônico, o *transponder* coerente é capaz de receber, tratar, amplificar e retransmitir com grande precisão e perdas mínimas o sinal óptico. Assim, esse *transponder* pode utilizar formatos de modulação de alta ordem e operar em alta taxa de transmissão. Devido a isso, o *transponder* coerente é fortemente indicado para longas distâncias por reduzir as perdas do sinal, assim como é ideal para redes metro devido a melhor eficiência na transmissão e recepção do sinal [82].

Entretanto, um BVT coerente é limitado pela largura de banda e efeitos da não linearidade do sinal, como por exemplo o aumento da intensidade do sinal, que precisa ser controlada. Este é um dos motivos pelos quais a arquitetura EON requer o uso de filtros digitais para mitigar tais efeitos [69].

Estes conceitos apresentados até aqui sobre BVTs serão citados nos próximos capítulos desta *Tese* para caracterizar arquiteturas de redes metropolitanas. Em geral, adota-se a nomenclatura BVT ou *transponder* para referir-se a qualquer tipo genérico de transmissor/receptor, salvo situações onde a literatura explicita o tipo específico de *transponder*, quando será mencionado da forma como identificado na literatura de referência.

Comutador Óptico BV-OXC

Os comutadores ópticos do tipo BV-OXC's são os dispositivos de *hardware* que estabelecem os caminhos ópticos fim-a-fim com a adequada largura de banda requisitada pela demanda, que foi então configurada por meio dos BVTs [100]. A flexibilidade do BV-OXC é demonstrada pela capacidade do comutador óptico expandir ou reduzir a largura de banda do caminho óptico. O BV-OXC é o ROADM da EON [36]. A Figura 2.13 ilustra um exemplo de BV-OXC, no qual são posicionados divisores ópticos (*Splitters*) na entrada e comutadores seletivos de comprimento de onda (WSSs) nas portas de saída. Os divisores ópticos são componentes utilizados para dividir um sinal óptico em dois ou mais sinais menores. Eles são usados para distribuir o sinal em várias direções, permitindo que um único sinal possa ser compartilhado por vários usuários. Já os WSSs são comutadores ópticos do tipo $1 \times N$, também chamados de filtros, fornecem espectro de transmissão continuamente sintonizável e variável. Essa combinação de equipamentos na composição do BV-OXC permite o encaminhamento de canais com larguras espectrais arbitrárias para portas de saída arbitrárias, além das funcionalidade de adicionar e remover.

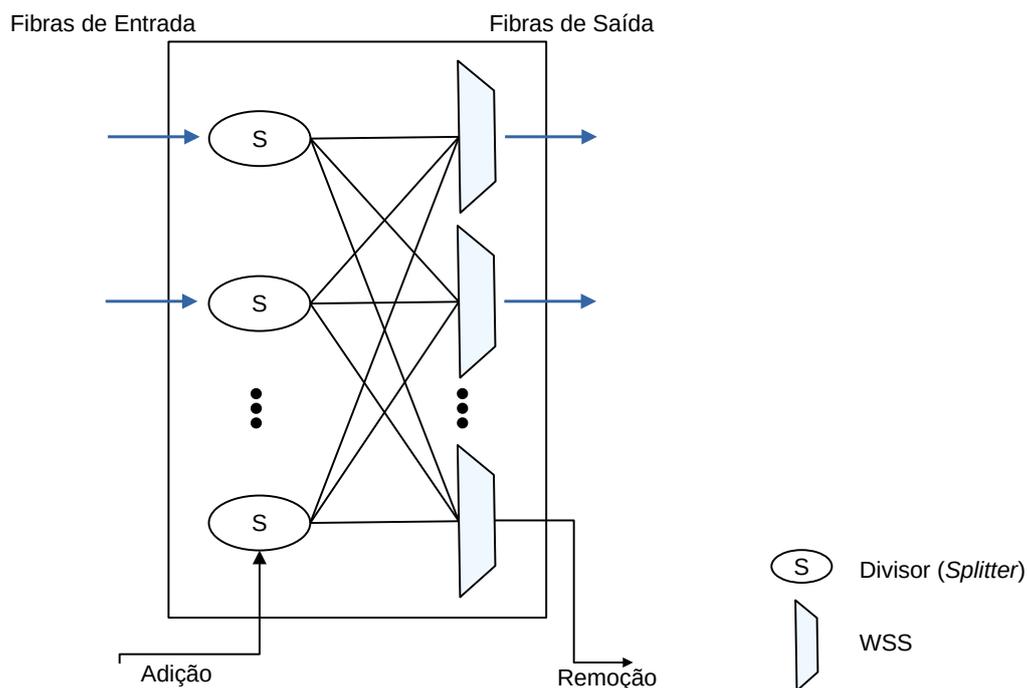


Figura 2.13: Arquitetura do BV-OXC.

Os BV-OXC's recebem diferentes nomes na literatura e podem ser de diferentes tipos de arquiteturas. As diferenças entre essas arquiteturas de comutadores ópticos é dada pelo custo, complexidade e sofisticação tecnológica.

2.2.2 Roteamento e Alocação de Espectro

Para atender as demandas de tráfego em uma rede metropolitana com tecnologia EON, um caminho óptico deve ser estabelecido entre a origem e o destino da requisição. Para criação desse caminho óptico é necessário escolher a rota a partir dos enlaces de fibra óptica disponíveis, que consiste na etapa de roteamento. Nesses enlaces selecionados, aloca-se uma porção de espectro óptico para transferir os dados. Esse processo é chamado de RSA [5, 101].

Quando uma requisição chega na rede, um caminho óptico precisa ser fornecido como rota entre a origem e o destino da conexão. No caso de mais de uma requisição, é preciso separá-las com FS livres entre elas para impedir interferência de sinais. Esse espaço livre recebe o nome de banda de guarda. A largura de banda para atender essa requisição equivale a um dado número de FS contíguos que varia de 1 até o limite da fibra, incluindo-se nesse cálculo a banda de guarda, e considerando-se que um FS é a menor unidade possível de ser alocada, equivalendo a 6,25 GHz [102] ou 12,5 GHz [4, 84]. Por exemplo, em [103] os autores definem que cada fibra possui um espectro total de 4,475 THz, o que resulta em 358 FS de capacidade base 12,5 GHz. Assim, o número de FS contíguos suficientes, N , para a requisição de acordo com um dado formato de modulação com M bits por símbolo e uma capacidade C por FS nessa respectiva modulação (da Equação ??) é calculado como na Equação 2.1 abaixo:

$$N = \left\lceil \frac{BW}{M * C} \right\rceil + GB \quad (2.1)$$

Em um sistema de grade flexível, *slots* de frequência com diferentes larguras são alocados para diferentes canais de acordo com a taxas de *bits* e formatos de modulação, ou seja, as larguras de banda de sinal reais dos canais, aumentando assim a eficiência espectral e a capacidade do sistema. Para um *slot* de frequência de rede flexível, ITU-T G.694.1 define sua frequência central nominal, f_{nom} (em THz) como [94], também mostrado na Figura 2.14:

$$f_{nom} = 193,1 + n \times 0,00625 \quad (2.2)$$

onde n é um número inteiro positivo ou negativo, incluindo o 0, e 0,00625 é a granularidade de frequência central nominal em THz. A largura do *Frequency Slot Units* (FSU), W , é definida como:

$$W = 12,5 \times m \quad (2.3)$$

onde m é o número inteiro positivo, enquanto 12,5 GHz é a granularidade da FSU.

O problema RSA é formado por dois subproblemas menores que podem ser resolvidos separadamente ou em conjunto. Há várias generalizações desse problema na literatura,

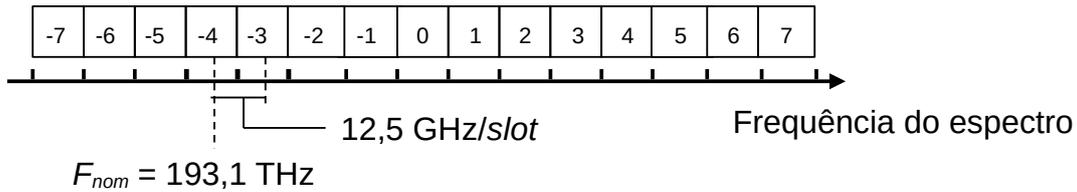


Figura 2.14: Abordagem de *slot* de frequência para redes ópticas elásticas.

cuja principal diferença é o número de subproblemas que precisam ser resolvidos, como será mostrado à seguir. Como exemplo, a Figura 2.15 apresenta uma topologia de rede composta por quatro nós e 4 enlaces, na qual duas requisições de conexão são estabelecidas: D_1 solicita largura de banda equivalente a 3 FS, tendo como origem o nó 2 e como destino o nó 3; e D_2 , que solicita largura de banda equivalente a 2 FS, tendo como origem o nó 1 e como destino o nó 4. Ambas as conexões acabam utilizando o enlace 1 na rede e para atendê-las, o problema RSA precisa ser resolvido respeitando-se as seguintes restrições, de acordo com a Figura 2.16: (i) restrição de continuidade, uma vez que os mesmos *slots* de frequência devem ser alocadas em cada enlace do caminho. A conexão D_1 utiliza o seguimento de slots [2, 3, 4] em todos os enlaces do caminho estabelecido, assim como D_2 utiliza o seguimento [6, 7]; (ii) restrição de contiguidade, porque no caso da alocação de mais de um *slot*, estes devem ser consecutivos. Como mostrado na figura, os seguimentos de *slots* definidos para as conexões D_1 e D_2 são compostos por *slots* adjacentes; (iii) restrição de banda de guarda suficiente, que exige alguns *slots* disponíveis entre quaisquer duas conexões estabelecidas para garantir que o sinal transmitido seja corretamente detectado no destino. As conexões D_1 e D_2 são separadas pelo *slot* livre de índice 5; (iv) não sobreposição de espectro, que garante que duas conexões não ocupem simultaneamente a mesma porção do espectro óptico [103]. Qualquer *slot* já ocupado pelas conexões D_1 e D_2 , bem como os *slots* de banda de guarda não podem ser utilizados momentaneamente por já estarem em uso.

Para a alocação dos FSU algumas políticas podem ser seguidas para realizar a busca no sentido da frequência. Essas políticas serão discutidas a seguir.

Tanto o RSA quanto suas variantes são complexos de serem resolvidos devido as restrições envolvidas. Uma generalização do problema RSA [104] é o problema de roteamento, atribuição de nível de modulação e espectro (do inglês, *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation (RMSA)*) [105] que, após realizar o roteamento, utiliza dados da distância do caminho para definir a eficiência espectral mais adequada para transmissão observando-se os formatos de modulação OOFDM mais adequados para diferentes distâncias da transmissão do sinal.

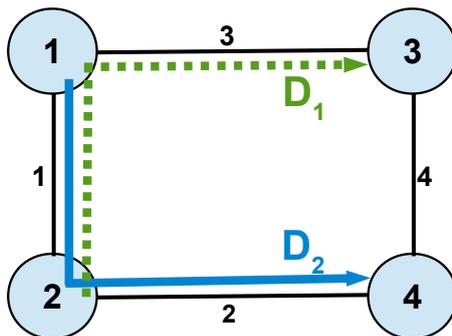


Figura 2.15: Rede composta de 4 nós e 4 enlaces e duas duas requisições de conexão, D_1 e D_2 .

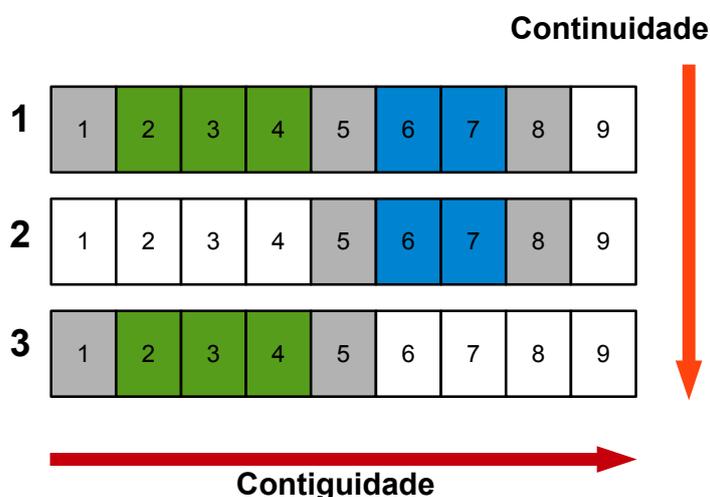


Figura 2.16: Restrições do problema RSA no atendimento das conexões D_1 e D_2 .

Em redes SDM, esses problemas precisam ser tratados também na dimensão do espaço, considerando restrições adicionais relacionadas as fibras MCF. Assim, o problema de roteamento e alocação de núcleo e espectro (o inglês, *Routing, Sctrum, and Core Assignment (RSCA)*) [86] ou o problema de roteamento e alocação de formato de modulação, núcleo e espectro (o inglês, *Routing, Modulation, Spectrum, and Core Allocation (RMSCA)*) [106], ou ainda, roteamento, alocação de espaço, formato de modulação e de espectro (o inglês, *Routing, Space, Modulation Format and Spectrum Allocation (RSMFSA)*) [107].

Outra generalização do problema de alocação de recursos em EON, com foco em limitação na camada física, é o problema que trata informações relacionadas à qualidade da transmissão do sinal e efeitos não lineares no roteamento e alocação de largura de banda, denominado problema a ser explorado é o de roteamento, energia, alocação de nível de modulação e espectro (do inglês, *Power, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (PRMLSA)*) [108].

Esta seção se concentra no problema RSA em particular para apresentar algumas técnicas utilizadas na resolução do problema, entretanto, todas essas técnicas podem ser empregadas indistintamente em qualquer variante deste problema.

O problema RSA pode ser classificados em problema *online* ou *offline*, de acordo com diferentes cenários de aplicação [27, 38, 103, 109]. Essa categorização é válida indistintamente para qualquer outra variante do problema RSA. Quando se trata de um RSA *online*, a resolução do problema ocorre em um cenário dinâmico de chegada de requisições, sem que haja qualquer conhecimento sobre outras demandas futuras. Já no problema *offline* toda a matriz de tráfego entre nós é fornecida com antecedência.

Considerando o subproblema do roteamento, existem três principais formas de resolvê-lo: roteamento fixo, roteamento fixo-alternativo e roteamento adaptativo. No roteamento fixo [110] apenas um caminho é computado para atender uma requisição. Caso este caminho não possua largura de banda suficiente para o atendimento, a requisição é imediatamente bloqueada. No roteamento fixo-alternativo [110] computa-se vários caminhos entre um par de nós de origem e destino e busca-se reservar largura de banda em algum deles fazendo a busca sequencial em todos até que seja encontrada disponibilidade de recursos. Se depois da busca em todos os caminhos não for encontrado recursos suficientes, a requisição é bloqueada. Já no roteamento adaptativo [33], quando a requisição chega o caminho é pesquisado dinamicamente de acordo com o estado dos enlaces da rede, mutável após cada chegada ou partida de requisição.

Além disso, quanto ao problema de alocação de FS para atender a demanda, as principais políticas de atribuição empregadas são: designação aleatória conhecida como *random-fit*; alocação ordenada em sentido ascendente do índice dos FS, conhecida como *first-fit*; alocação inversa do *first-fit*, denominada *last-fit*, isto é, no sentido descendente dos FS; na alocação do FS *least-used*, os blocos de *slots* disponíveis são listados e os blocos ocupados são mapeados para determinar os índices/posições menos ocupadas. Feita essa detecção, a requisição é alocada no FS disponível menos utilizado; política de alocação do FS *most-used*, ocorre como no caso do FS menos utilizado, entretanto, o mapeamento detecta as fatias correspondentes mais utilizadas e, em seguida, atende a requisição nestas fatias de espectro; a atribuição *First-Exact-Fit*, na qual o primeiro segmento de FS disponível é utilizado para o atendimento da requisição; Já na atribuição *First-Last-Fit*, o segmento de FS é divididas em várias partições. A política *Last-Fit* é usada em partições ímpares, enquanto a política *First-Fit* é adotada em partições pares [111, 112, 113].

Alocações adaptativas de espectro também têm sido recentemente apresentadas na literatura em EON. Uma política adaptativa depende do conhecimento a priori sobre as requisições ou condições da rede. Em [114] é descrita uma abordagem adaptativa da política *first-last-fit* de atribuição de FS no mais alto formato de modulação, que tem início

com a busca de *slots* disponíveis por meio da política *last-fit* e tenta atender a requisição nesse bloco com o primeiro mais robusto formato de modulação possível. Já em [113] conexões com caminhos disjuntos são alocadas com a política *first-exact-fit*, enquanto que as conexões com caminhos não disjuntos são alocadas com a política *last-exact-fit*. Em geral, o objetivo das políticas de alocação adaptativas é reduzir a dispersão das conexões alocadas e o bloqueio de requisições por meio do oferecimento de critérios adicionais de pesquisa.

A menor distância de um caminho óptico nem sempre é o critério utilizado na roteamento, em buscas feitas pelo menor ou menores caminhos. Outras políticas diferentes podem ser empregadas, podendo ser exploradas como único critério ou como um critério adicional em problemas reunidos. A abordagem *soonest completion*, da mais rápida conclusão do serviço, procura os menores caminhos disponíveis e que tenham mais recursos para aumentar as chances de sucesso. A abordagem do menor uso de espectro (do inglês, *Least Spectrum Resource Usage (LSRU)*), seleciona o menores caminhos e nestes, realiza uma nova seleção em busca do menor bloco contíguo de espectro que seja suficiente para atender a requisição[103].

2.2.3 Padrões, Classes e Perfis de Tráfego

Enquanto os modelos de tráfego de marés para MONs ainda são poucos, as características desse tráfego podem ser observadas sob diferentes perspectivas. Conforme visto, as diferentes combinações de comportamento do tráfego ao longo do espaço e do tempo resultam na caracterização de padrões. Além de padrões, o tráfego na metro pode ainda ser descrito na forma de diferentes classes e perfis. As classes são caracterizações dos fluxos de tráfego com base nos requisitos de QoS e níveis adequados de prioridade de atendimento. Por exemplo, três exemplos de classes de tráfego com atediamentos diferentes são apresentados em [115], no contexto de rede EON definida por *software*, denominadas classes A, B e C. A classe A reúne requisições de mais alta prioridade, e que não podem ser interrompidas quando o atendimento é estabelecido, como ocorre com aplicações de Vídeo sob demanda e teleconferência. A classe B categoriza as requisições que não podem ser interrompidas mas podem sofrer redução na qualidade da transmissão sem afetar a qualidade de experiência do usuário, como as transmissões de vídeo pelo *YouTube*. Já a classe C concentra as requisições de aplicações que podem ser transmitidas com certos níveis de atraso e por isso, detém menor nível de prioridade, como é o caso das aplicações de *backups* de dados. Já os perfis de tráfego representam as característica de uma coleção de tráfego dentro de um recorte no tempo [116]. Diferentes perfis de tráfego são considerados como entrada para os estudo de soluções de engenharia de tráfego em [63, 117, 118, 119]. O exemplo de perfis de tráfego apresentado em [117], no qual são considerados perfil A e B, apresentam

diferentes proporções por tipo de requisição. As requisições de 10 e 40 Gbps representam 62.5% do tráfego no perfil A para 25% no perfil B. As requisições de 100 e 120 Gbps representam 25% do volume no perfil A enquanto no perfil B representam 62.5%. Já as requisições de 160 e 200 Gbps representam 12.5% em ambos os perfis de tráfego.

Com a distribuição desigual do tráfego, algumas políticas são definidas para o atendimento das demandas, dentre as quais pode-se citar:

- *Longest Distance First (LDF)*: as demandas cujo caminho entre origem e destino é o maior, são atendidas primeiro [120].
- *Highest Line Rate First (HLF)*: as demandas com as maiores taxas são atendidas primeiro [120].
- *Most Demanding First (MDF)*: nesta política inicialmente é estabelecida uma métrica calculada como o valor do produto do comprimento do caminho pela taxa da requisição. A requisição que resulta no maior produto é atendida primeiro [120].

Atualmente, é de grande relevância para os provedores de rede o mapeamento dessas áreas e a descoberta de padrões percebidos em cada uma delas. Essa informação é utilizada em projetos de rede regional/metropolitana para o planejamento de uma eficiente transição do modelo de grandes centro de dados centralizados (*Mega Data-Center (MDC)*) para um modelo granular distribuído, como têm ocorrido nos últimos anos [63].

Os provedores de rede têm o objetivo de manter presença de computação e armazenamento o mais próximo possível dos clientes, de uma maneira eficiente. Assim, um dos modelos de transição praticado é o de MDC para centros de dados regionais (*Regional Data-Center (RDC)*), criando a presença regional. O RDC é uma instalação em um campus, composta por vários edifícios de centros de dados que são interconectados por fibra óptica. Esses prédios assumem o papel de *gateway* para a troca de tráfego entre diversas outras regiões [51]. Com essa infraestrutura é possível dar suporte a determinadas áreas geográficas oferecendo os recursos com menor latência.

A difusão cada vez mais frequente de redes de distribuição de conteúdo (do inglês *Content Delivery Networks (CDN)*) tem sido uma das tendências de implantação dos centros de dados de menor porte e altamente distribuídos (*edge cloud*). É também por meio dessa estratégia que os operadores tem implementando o modelo de miniaturizar os centros de dados movendo-os para os CO [121]. Outras possíveis estratégias a serem implementadas são destacadas à seguir como tendências futuras.

2.3 Tendências Futuras

Esta subseção destaca as tendências, identificadas na literatura recente, que têm motivado as principais transformações digitais, especialmente no que se refere à MON. Tal como acontece com as redes de núcleo, nas redes metropolitanas [97] a tendência será fornecer soluções para adaptar as várias tecnologias presentes na sua infra-estrutura devido à existência de várias ilhas de equipamentos de diferentes gerações. Além disso, novas tecnologias recentemente investigadas para implantação em infraestruturas de rede de longa distância, agora estão sendo exploradas para redes metropolitanas. Essa é uma inferência mais geral que pode ser feita com base nos vários estudos apresentados que investigam novas soluções de baixo custo enquanto continuam a alavancar a infra-estrutura legada. No entanto, o custo ainda é uma questão proibitiva. Consequentemente, o desenvolvimento deste tema à luz dos resultados obtidos até agora, apresenta uma série de questões ainda não resolvidas. Além disso, por se tratarem de arquiteturas muito recentes, várias questões podem ser levantadas como objeto de pesquisa.

Considerando a urgência dessas questões, e observando as principais semelhanças/parâmetro de questões não respondidas entre todas as novas arquiteturas, é possível concluir com tal análise as tendências de pesquisa a seguir, que oferecerão soluções para as demandas dos provedores.

As arquiteturas multicamadas citadas nesta Seção, serão abordadas no Capítulo 3. Elas são formadas basicamente por camada óptica de grade fixa ou flexível, enquanto na sua camada sobrejacente são encontradas tecnologias baseadas em rede OTN, Ethernet e IP. A camada OTN está presente nas arquiteturas OTN Pura, OTN/DWDM e *Ultra Dense-Wavelength Switched Network* (UDWSN). Já a camada Ethernet está presente nas arquiteturas *Hub-and-Spoke* (HnS)/WDM e *Modular Optical Metro-Core* (MOMC), enquanto que a camada IP está presente na arquitetura *Self-Adjusting Unified Metropolitan and Access Network* (ARMONIA). Já o Capítulo 4 irá apresentar em detalhes as arquiteturas de camada óptica DWDM, *Metro Elastic Optical Network* (MEON), *SDN-Like Innovative Metro-Access Optical Network* (SIMON), *Tridimensional Metro-Access Optical Network* (TDGMON), *Filterless Metropolitan Network* (FMN), *Dual Fibre Network* (DuFiNet), *Drop-and-Waste* (DnW) e Metro-Haul, com suas respectivas características destacadas a partir de fontes recentes da literatura.

A respeito dessas arquiteturas de rede, pode-se destacar como prováveis tendências os seguintes pontos:

Perspectivas para OTN

- **Flexibilidade:** Espera-se que a OTN se torne mais flexível, permitindo que as operadoras aloquem dinamicamente a largura de banda com base na demanda de tráfego. Isso exigirá o desenvolvimento de redes definidas por *software* e tecnologias de virtualização de funções de rede, simplificando a programabilidade das redes multicamadas [122, 123].
- **Automação:** a automação será outra tendência significativa na OTN. As operadoras de rede usarão cada vez mais inteligência artificial () e aprendizado de máquina () [124] para otimizar o desempenho da rede, detectar e responder a anomalias de rede e reduzir custos operacionais.

Eficiência energética: as redes OTN continuarão a se concentrar na redução do consumo de energia para melhorar sua eficiência energética. Isso envolverá o desenvolvimento de componentes com maior eficiência energética e a implementação de recursos de economia de energia, como modos de suspensão, bem como a implementação de estratégias de reconhecimento das restrições da rede e classificação/organização das demandas de solicitação baseadas na detecção do padrão de comunicação [125].

- **Segurança:** a segurança continuará sendo uma consideração crucial para as redes OTN no futuro. Os sistemas OTN precisarão implementar medidas de segurança robustas, como criptografia e protocolos de autenticação, e a literatura já propõe novas soluções algorítmicas cientes da segurança, bem como novas metodologias de encriptação [126].
- **Convergência:** Com a crescente popularidade do 5G e IoT, espera-se que as redes OTN convirjam com outras redes de comunicação, como redes Ethernet, redes sem fio e de micro-ondas [127]. Isso permitirá conectividade perfeita e melhorará o desempenho geral e a confiabilidade da rede [123, 127].
- **Edge Computing:** A tecnologia OTN irá oferecer suporte a essa tendência, fornecendo conectividade de baixa latência e alta largura de banda entre dispositivos de ponta e *data centers*, com um custo menor [13, 19].
- **Fatiamento de rede:** O fatiamento de rede é uma técnica que permite aos operadores de rede particionar uma rede física em várias redes virtuais. A tecnologia OTN precisará oferecer suporte ao fatiamento de rede para permitir que as operadoras forneçam serviços de rede personalizados para diferentes clientes [19]. Uma tendência futura é a adoção de novas ferramentas de alocação de recursos em múltiplas

fatias de rede, mantendo o controle dos indicadores desses recursos, como é o caso do planejador de recursos de rede multi-site denominado ADRENALINE [128].

- *Cloud-Native OTN*: *Cloud-native OTN* é uma nova arquitetura que traz os benefícios da computação em nuvem para redes OTN [122]. Isso inclui recursos como virtualização, automação e orquestração, que permitem que as operadoras de rede gerenciem suas redes com mais eficiência e economia.

Essas tendências mostram que a tecnologia OTN está evoluindo rapidamente para atender às demandas das redes de comunicação modernas. Como a rede continua a crescer em complexidade e escala, novas tecnologias e técnicas serão necessárias para garantir a confiabilidade, desempenho e segurança da rede.

Com relação à camada de rede Ethernet, as principais tendências que se destacam são:

- *Tecnologias orientadas a Ethernet*: A indústria de telecomunicações espera um maior crescimento na adoção de tecnologias de rede como WAN definida por software, IPv6 e o padrão de segurança sem fio WPA3, especialmente em virtude do custo reduzido da infraestrutura envolvida [30, 129]. As redes móveis também se beneficiarão com o uso de Ethernet [64]. Além disso, muitas empresas de telecomunicações atualmente consideram que a conectividade Ethernet é mais relevante do que a OTN porque é a mais difundida nos seus negócios [127].
- *Maior velocidade*: Vários novos padrões têm sido desenvolvidos recentemente para apoiar o aumento de velocidade e densidade da Ethernet [40]. Alguns exemplos são o padrão *802.3cu*, 100G e 400G em fibra monomodo a 100G por comprimento de onda visando oferecer maior eficiência energética para Ethernet, e as interfaces elétricas *P802.3ck*, 100G, 200G e 400G baseadas em sinalização de 100G que possibilitará aumentar a densidade da Ethernet [130].
- *Arquitetura de rede elástica multicamada*: Flex Ethernet (FlexE) é uma tecnologia que possibilita que as redes de transporte e metro sejam previsíveis e com latência extremamente baixa. FlexE pode ser implementada sobre EON, composto a arquitetura *FlexE-over-EON*, capaz de oferecer maior eficiência no uso de recursos e na relação custo-benefício [131].

De maneira semelhante, as tendências para a comunicação IP são principalmente as seguintes:

- *Aplicação em redes móveis*: Redes ópticas MC definidas por *software* são uma tendência para o provimento de redes em fatias para comunicação móvel. A infraestrutura dessas redes será fortemente baseada em camada IP [132].

- Implantação com redes EON: Enquanto a arquitetura ARMONIA, apresentada anteriormente, demonstra a implementação conjunta de camada óptica elástica baseada em WDM *Nyquist*, que é uma solução elástica do domínio óptico, outras soluções da literatura tem explorado IP/EON. Neste sentido, há duas correntes contrárias, sendo uma delas a que discorre sobre a adoção de IP/EON em virtude das vantagens relacionadas a SDN para aumentar a programabilidade da rede [53, 133, 134] enquanto outra defende a redução do uso de camada IP como medida para otimizar o consumo de energético [135].

Sistema de Transmissão Elástico

A MAN óptica em operação hoje é uma mistura de gerações de tecnologias, operando estaticamente com canais estabelecidos para operar por meses. O sistema WDM passou por atualizações, e mesmo uma versão flexível já foi considerada uma alternativa de implantação com razoável complexidade e baixo custo [44]. No entanto, toda a infraestrutura elástica já instalada ou pronta para implantação em campo é totalmente estática, não sendo possível ainda explorar todo o potencial das funcionalidades elásticas. A EON é a solução ideal para reduzir o uso de amplificadores na metro, pois oferece diversas possibilidades de taxas com alta eficiência espectral, visto que a faixa de transmissão não é um fator tão relevante em pequenas e médias distâncias tipicamente encontrados neste ecossistema. É então necessário propor e desenvolver um novo plano de controle inteligente para que todas as possibilidades da EON sejam amplamente exploradas [40]. O sistema de transmissão elástica do futuro deve fornecer controle dinâmico e programável e gerenciamento de instalações para manipular a infraestrutura implantada no campo de forma eficaz.

Ecossistema Misto

Espera-se que a rede metropolitana seja personalizável implementando vários nós com arquiteturas heterogêneas formando um ambiente com várias gerações de tecnologias, separadas principalmente por segmento de rede. Como foi demonstrado nas arquiteturas metropolitanas multi segmentadas, sejam elas integradas ou combinadas com outras arquiteturas, o aumento do número de níveis/hierarquias é uma possibilidade de gerenciar gargalos de tráfego onde não é possível implementar equipamentos modernos e caros. Assim, múltiplos domínios e plataformas tecnológicas irão compor um ambiente diversificado e transparente para o provisionamento do fatiamento de rede [136]. Embora esta solução seja custosa do ponto de vista dos requisitos de latência, haverá ilhas de nós sem filtro, principalmente no segmento MA [59], que terá maior capilaridade e, por isso, precisará ser de baixo custo. No segmento MC, parte dos nós poderá manter *switches* eletrônicos,

em especial *switches* OTN, para realizar agregação de tráfego e melhor aproveitamento dos recursos das redes ópticas. Como estes equipamentos já existem e se encontram em funcionamento há algum tempo, muitos serão retirados de pontos onde a velocidade é fator essencial mas continuarão a operar em locais específicos definidos de acordo com o desenho da rede e respectiva topologia. A principal razão por trás dessa adaptação é a necessidade de reduzir o consumo de energia. Além disso, a coexistência de diferentes sistemas de transmissão será uma realidade a longo prazo até que haja uma substituição total das tecnologias de rede fixa pela rede flexível, o que é inevitável considerando os requisitos rigorosos das aplicações mais modernas. Além disso, a implantação de recursos de TI espalhados pela rede metropolitana promoverá a convergência de tecnologias para a introdução de computação de borda e computação de nevoeiro, entre outras, com a implementação de μ DCs e DCs regionais [56].

Além disso, a coexistência de tecnologias coerentes e não coerentes (detecção direta) no mesmo ambiente será uma realidade. Receptores e outros equipamentos coerentes irão lidar com grandes quantidades de dados de forma eficiente, principalmente em WAN e segmentos inter-DC com maior CAPEX e consumo de energia. No entanto, esta tecnologia está também a ser introduzida em segmentos de curta distância, como o metro e as redes de acesso, tendo sido recentemente disponibilizadas comercialmente pelo menos sete soluções coerentes de processamento digital de sinais [9, 26, 82, 97]. O que é uma justificativa para associar tecnologias coerentes com arquiteturas FL e sFL [70, 93]. Portanto, a detecção direta continuará sendo uma alternativa para as operadoras que desejam manter os custos baixos, desde que essa tecnologia atenda aos requisitos de desempenho da rede. Especialmente em redes de média e longa distância, como redes metropolitanas, onde a agregação de dados pode ser utilizada para melhor aproveitamento dos recursos e onde é necessário hardware com baixa complexidade de implementação e operação [44, 137, 138].

Convergência de Serviços/Produtos entre Operadoras de Rede e Provedores de Conteúdo

As operadoras de rede enfrentarão o desafio de manter as redes de telecomunicações funcionando de maneira otimizada, com expansões de infraestrutura planejadas por pelo menos 15 anos para atender às novas demandas de conteúdo. Por outro lado, os provedores de conteúdo vão escalar cada vez mais suas infraestruturas, incluindo novos servidores, de forma distribuída e balanceada, o que pode ocorrer a cada dois ou três anos, para acompanhar o crescimento do tráfego [12]. A convergência entre os dois negócios pode ocorrer por meio da virtualização de infraestrutura e recursos, que unirá provedores em torno de um único objetivo, criando novos segmentos de mercado e oferecendo novas cadeias de serviços agregados como inovação disruptiva.

Fatiamento de Rede

Não só a infraestrutura física será redesenhada, mas também seus recursos na forma de *software*. As redes flexíveis permitem maior liberdade para a virtualização dos recursos ópticos [12], e a virtualização deve ser a principal lei para beneficiar a criação de novos serviços verticais em um ambiente físico misto [139]. Através deste processo, um mesmo equipamento na rede pode ser a estrutura para o planejamento e implementação de diversas redes lógicas, totalmente isoladas e independentes entre si, estabelecidas de acordo com o perfil de cada negócio, e principalmente desocupando recursos dedicados quando não forem necessários [52]. O fatiamento da rede (do inglês *network slicing* (NS)) beneficiará vários negócios de comunicação porque integrará um guarda-chuva de serviço que pode ser construído sob demanda para cada tipo de serviço. No entanto, os principais desafios relacionados com estas tendências são a gestão de recursos coletivos e a integração entre diferentes arquiteturas que requerem várias camadas de software, desde ferramentas de planejamento e otimização de recursos, passando por algoritmos de alocação dinâmica de recursos [128]. Esse conceito de garantir que vários clientes explorem os mesmos recursos físicos simultaneamente pode garantir não só a geração de receita como também uma redução considerável de CAPEX/OPEX. A MEON é a arquitetura proeminente em que o potencial para NS foi investigado [140].

Rede Metro Definida por Software (SDMN) ou Plano de Controle Inteligente

Este conceito de rede metropolitana propõe transparência para tecnologias de comutação de rede. A comutação óptica, de pacote ou de rajada, é combinada na infraestrutura com caixas brancas para fornecer uma plataforma capaz de funções de rede distribuída para serviços de virtualização inter-DC [132, 128]. Essa ideia de conectividade disruptiva e virtualizada favorecerá as tendências de computação de borda e o fatiamento da rede, instanciando recursos e serviços para vários clientes individualmente. A SDMN é controlada por meio de gerenciadores de infraestrutura de WAN (), como *OpenDaylight* ou sistema operacional de rede aberta (ONOS), um sistema operacional de código aberto com abstração de topologia convergente, no qual várias camadas e tecnologias de rede são apresentadas como um único grafo lógico.

Redes Desagregadas

O conceito de redes desagregadas rompe com o cenário de infraestrutura de rede óptica fechada com hardware e controle do mesmo proprietário. Permite a adoção de diferentes elementos dos mais diversos fabricantes na composição da arquitetura de rede com uma interface de controle personalizável [12, 45, 52, 80, 141]. Isso é possível graças aos novos

modelos de dados desenvolvidos para lidar com diversos elementos de redes ópticas que permitem o controle e gerenciamento via SDN, com gerenciamento padrão via ONOS (sistema operacional de rede aberta). A principal vantagem dessa abordagem é a redução do CAPEX e OPEX das redes metropolitanas com base no *hardware* mais barato que é utilizado, tanto com a redução de restrições e aquisição de componentes fechados do mesmo fabricante, quanto com a abertura para uso e integração de *hardware* legado. Existe então a possibilidade de oferecer muitos outros serviços, como componentes desagregados, por exemplo, vBBU (*virtual Broadband Base Unit*) e vRouter (*virtual Router*), que conseqüentemente resultam em menores custos em outras camadas da rede, e, além disso, permitem maior programabilidade. Em redes ópticas, uma das principais iniciativas nesse sentido é o Projeto *Open ROADM Multi-Source Agreement* (MSA) [142], que propõe um *switch* óptico, *transponders* e óptica conectável, na forma de caixas brancas com interface de gerenciamento aberta e modelo de dados *Yet Another Next Generation* (YANG) [136]. Além disso, equipamentos como estes foram avaliados no projeto ADRENALINE *testbed* [56, 80, 143], uma rede de transporte óptico com tecnologia WDM de grade fixa/flexível, que implementa SDN/NFV e plataforma de nuvem de borda e núcleo para oferecer serviços de ponta-a-ponta, para atender redes 5G e aplicações IoT de última geração em todos os segmentos de rede.

Inteligência Artificial para Transporte Óptico

Soluções tecnológicas ágeis e programáveis para redes elásticas exigirão o desenvolvimento de recursos automatizados que possam ser rapidamente empregados. Além disso, o nível de automação esperado irá fornecer um ambiente favorável para explorar a análise de dados, que tem se mostrado um campo de pesquisa de inteligência artificial para redes ópticas, sendo empregado tanto na engenharia de redes quanto na engenharia de tráfego. Em termos de operação de rede, autômato de aprendizagem foi proposto para decidir a alocação de recursos que resulte em menos bloqueio e maior eficiência energética [144]. Além disso, no projeto *Metro-Haul*, o aprendizado de máquina foi usado na alocação de recursos que atendem a diferentes serviços com tráfego dinâmico [27]. Por outro lado, para soluções de engenharia de tráfego, redes neurais recorrentes têm sido usadas para prever o tráfego em diferentes áreas da rede metropolitana [63], enquanto técnicas de retro propagação têm sido usadas para prever tendências de mudanças na carga de tráfego [7]. Recentemente, o paradigma de rede baseada em intenção [145] tem ganhado destaque devido às diversas possibilidades de antecipar ações de configuração na rede a partir de objetivos (intenções) previamente especificados. Técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina estão contribuindo com um maior nível de agilidade e programabilidade. Com intervenção humana mínima, as redes avançarão para outro nível de

automação, denominado rede com contato zero (*Zero-Touch Networking - ZTN*), investindo na rede global e em soluções de orquestração de recursos de TI [146]. Desta forma, surgem novas oportunidades para explorar soluções de inteligência artificial em redes desagregadas e redes de comunicação para 5G, tirando partido do controle centralizado e otimizando as operações nestas redes [141].

Assim, espera-se que as soluções facilitem o controle, gerenciamento e monitoramento de diversos parâmetros de configuração de rede, que contribuam para uma tomada de decisão rápida para que o desempenho de todo o sistema seja melhorado. No entanto, é necessário considerar que a elaboração de modelos de para resolver problemas em um ambiente de tráfego dinâmico incorre em enormes gastos de energia e requer muito poder computacional dedicado.

Novas Demandas de Negócios

Com a implementação de tecnologias de transporte de grade flexível e sua consequente grade de espectro óptico de baixa granularidade, o número de canais no espectro óptico aumenta consideravelmente. Com isso, o aluguel de espectro é uma tendência de mercado que pode se popularizar em meio a um cenário de implantação de computação de borda e de nevoeiro, geo-distribuídos na rede metropolitana [59, 147]. O serviço de aluguel de espectro óptico como serviço (*Optical Spectrum-as-a-Service (OSaaS)*) [59] é semelhante ao serviço de aluguel de fibra apagada oferecido por várias operadoras hoje, mas com um custo menor, pois o cliente não precisa necessariamente manter e operar o equipamento necessários para lidar com recursos de fibra. A manipulação da fibra óptica isoladamente representa uma complexidade extra devido à maior responsabilidade pela manutenção e monitoramento de outra camada de tecnologia. Em vez disso, o cliente adquire o direito de usar uma parcela fixa do espectro óptico, representando alguns canais de acordo com sua demanda, ou adquirir uma parcela dinâmica no espaço e tempo de frequência (diferentes *slots* de tempo) que pode ser compartilhado com outros clientes que também são usuários do mesmo serviço.

O transporte como um serviço (*Transport-as-a-Service (TaaS)*) [12] será criado a partir da necessidade de aumentar o número de camadas ópticas em níveis hierárquicos para compartilhamento de rede. A otimização como serviço (*Optimization-as-a-Service (OaaS)*) para arquiteturas de rede desagregadas poderá fornecer soluções sob demanda para alocação de recursos, engenharia de tráfego, implementação de novas interfaces e até monitoramento do sistema como um todo. Além disso, a quebra de paradigmas por meio de sistemas fechados e proprietários permitirá ao cliente desses serviços implementar suas soluções de software para maior controle personalizado [27].

Dadas essas novas tendências reunidas a partir da literatura científica mais recente, o Capítulo 3 e Capítulo 4 apresenta várias arquiteturas MAN recentemente propostas, as quais podem atender os requisitos dessas novas tendências futuras no cenário das redes de comunicação, bem como impulsionar novos modelos de negócios e serviços.

2.4 Resumo Conclusivo

Este Capítulo apresentou os principais conceitos básicos relacionados ao desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, destacou-se na Seção 2.1 sobre MONs como conceito delimitante da área de pesquisa. A respeito desse segmento de rede, abordou-se os sistemas de transmissão implementados nas metros, bem como os principais componentes arquiteturais necessários para a implantação da infraestrutura das metros. Ademais, apresentou-se as classificações das MONs quando à proporção de elementos de filtragem implementados nessas arquiteturas. Tal classificação pode indicar um comparativo de infraestruturadas com relação ao custo, por exemplo. Também destacou-se os principais tipos de topologias de rede, que podem indicar, entre outras coisas, o grau de proteção contra falhas que uma dada infraestrutura pode implementar.

Já a Seção 2.2 abordou em detalhes o sistemas de transmissão EON, sua arquitetura, bem como o problema fundamental RSA. A EON têm sido bem mais abordada em redes de núcleo, e recentemente começou a ser foco também nas MONs, conforme será visto nos demais capítulos deste trabalho. A menor granularidade que a EON possibilita, associada à flexibilidade em alocar múltiplos canais consecutivos, tornam este sistema de transmissão adequado para o segmento metro, onde há vários níveis de agregação de tráfego que podem se beneficiar do sistema de transmissão elástico.

A Seção 5.1 discorreu sobre o conceito de tráfego de marés, uma característica especialmente impactante para as redes metropolitanas, devido ao qual os provedores de redes e serviços precisam de adaptar as suas políticas de rede para continuar atendendo aos serviços com bloqueio reduzido. O tráfego de marés é abordado na dimensão do espaço e do tempo. São apresentados modelos utilizados para geração de tráfego com essas características, assim como são abordados ainda os conceitos de padrões, classes e perfis, empregados para categorizar o tráfego capturado pelo efeito das marés. Como o objetivo da pesquisa, no que tange à engenharia de tráfego, é propor soluções cientes das áreas, estes três últimos conceitos não são explorados nas soluções propostas porque o estudo da ciência do tráfego está fora do escopo deste trabalho.

Por último, a Seção 2.3 destaca as principais tendências tecnológicas esperadas para o panorama das MONs. São essas tendências que têm impulsionado o surgimento de novas

arquiteturas de rede, assim como indicado a possíveis estratégias para manter baixo o custo da infraestrutura enquanto possibilita o aumento da capacidade.

Capítulo 3

Arquiteturas das Redes Ópticas Metropolitanas de Múltiplas Camadas

Este Capítulo apresenta as principais arquiteturas MON que são compostas de camada eletrônica sobre camada óptica. Para a seleção das arquiteturas de múltiplas camadas que serão discutidas, inicialmente foram realizadas buscas por arquiteturas dessa natureza, citadas em trabalhos publicados entre 2013 e 2020. Foram relacionados, neste sentido, veículos de publicação tais como as bibliotecas digitais *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Xplore*, *Springer Nature*, *Society of Photographic Instrumentation Engineers (SPIE)* e *International Federation for Information Processing (IFIP)*. Para classificar os artigos científicos de interesse e composição da base de dados da pesquisa, utilizou-se como critério a identificação de trabalhos que explicitamente propõem novas arquiteturas para redes metropolitanas, bem como a identificação das arquiteturas legado, utilizadas nos comparativos com as novas arquiteturas propostas.

As arquiteturas de redes ópticas podem ser classificadas em duas classes principais, as quais são multicamada e camada única, conforme proposto em [36]. A classificação de arquitetura multicamada enquadra as arquiteturas de rede cuja camada de transporte é composta por uma camada eletrônica sobre uma camada óptica. Por outro lado, as arquiteturas de camada única são arquiteturas exclusivamente ópticas.

As arquiteturas da classe multicamada são OTN Pura [37] apresentadas na Subseção 3.1, OTN sobre DWDM (OTN/DWDM) [77] citada na Subseção 3.2, UDWSN [57] na Subseção 3.3, além da HnS/WDM[148] na Subseção 3.4, ARMONIA [90] na Subseção 3.5, e MOMC[149] na Subseção 3.6, que não são baseadas em OTN.

No Capítulo anterior foram apresentados os conceitos básicos sobre MONs, discorrendo-se sobre os sistemas de transmissão, os componentes ópticos utilizados na construção da

infraestrutura, as fundamentações a cerca da estrutura e dos papéis desempenhados pelos nós, assim como tendências tecnológicas que motivam o uso futuro dessas arquiteturas que serão apresentadas. Uma arquitetura de rede de comunicação refere-se ao projeto estrutural de uma rede, que inclui os componentes necessários para sua constituição (seja de *hardware* ou *software*), e seus procedimentos de comunicação que permitem que a rede transmita dados. Com base nessas concepções, este capítulo discorrerá sobre as principais arquiteturas MONs destacadas na literatura, e que são baseadas nesses componentes ópticos. Enquanto este Capítulo apresenta uma abordagem mais geral sobre redes ópticas de múltiplas camadas, o Capítulo 4 apresentará arquiteturas MON de camada única, isto é, arquiteturas puramente ópticas. Uma rede óptica transparente permite que a luz passe com o mínimo de perda ou distorção, sem a necessidade de amplificadores ou regeneradores ópticos intermediários, embora ocorra um maior acúmulo de ruído com a distância quando não há regeneração. Ainda assim, os sinais podem percorrer longas distâncias sem serem significativamente degradados. Em uma rede óptica transparente, a qualidade do sinal permanece alta e não há necessidade de regeneração ou conversão de sinal dentro de um limiar do alcance. Por outro lado, uma rede óptica de múltipla camada tende a ser translúcida ou opaca, uma vez que usam nós intermediários que podem amplificar ou regenerar o sinal. Em tal rede, os sinais sofrem alguma perda e distorção, o que requer amplificação ou regeneração em intervalos regulares [36].

A Figura 3.1 mostra como as arquiteturas multicamadas podem ser classificadas quanto ao grau de conversão OEO, destacando que apenas duas dessas arquiteturas permitem que o sinal óptico seja comutado sem sair do domínio óptico através de *switches*, embora eles estejam presentes, isto é, arquiteturas com comunicação E2E. É importante mencionar as referidas propostas de arquitetura para estabelecer uma relação entre as suas características, vantagens e desvantagens, especialmente do ponto de vista do operador da rede metro.

Uma característica comumente sobressalente tanto nas arquiteturas de camada única quanto nas multicamadas é a tendência de projeção de arquiteturas para múltiplos segmentos simultaneamente. As arquiteturas multi camadas podem requerer investimentos menores para o projeto e implantação, porque a camada superior pode aproveitar equipamentos de *hardware* legado [52]. Enquanto a OTN Puro e a OTN/DWDM têm *switches* eletrônicos em todos os nós, na UDWSN apenas alguns nós ópticos são definidos para implantação de *switch* sobreposto ao OTN. Por possuírem essa característica em comum, essas três arquiteturas são comparadas na literatura, como será destacado adiante. Além disso, OTN Pura e OTN/DWDM foram arquiteturas disponíveis comercialmente por algum tempo, enquanto UDWSN foi proposta recentemente e ainda não está disponível comercialmente. Dessa forma, pode-se inferir que a tendência para o futuro é reduzir o

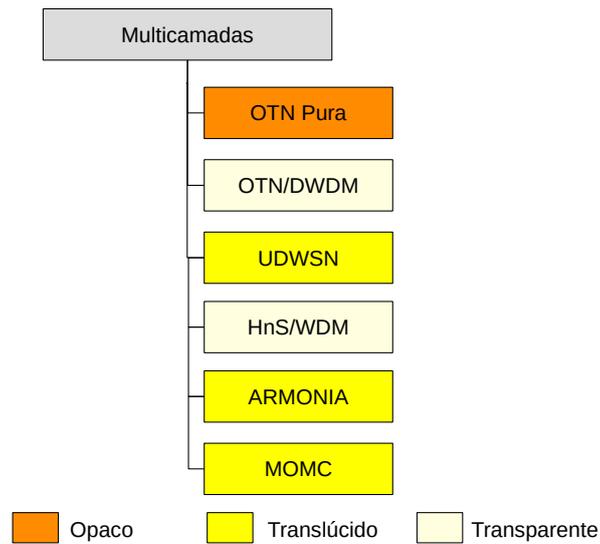


Figura 3.1: Classificação das arquiteturas metro ópticas multicamadas.

uso de equipamentos OTN na camada de transporte e ainda empurrá-los para a borda da rede, posicionando-os em pontos de comunicação que reduzam o número de saltos para comunicação, como por exemplo, a borda da rede na camada *fronthaul* das redes móveis. Outra possível tendência é o estreitamento dos canais de comunicação, com grade flexível e comunicação ponta a ponta. Essas alternativas podem contribuir para a redução da latência no estabelecimento de caminhos ópticos, tornando a tecnologia capaz de atender aos requisitos dos novos serviços disponibilizados na borda da rede.

3.1 Arquitetura OTN Pura

Composição e Funcionamento

As redes metropolitanas com arquitetura *Pure Optical Transport Network (OTN)*, ou OTN Pura, padronizadas pela ITU-T G.709 [37], possuem nós OTN eletrônicos, e seus enlaces e interfaces são ópticos, sendo a comunicação ponto a ponto. Versátil, permite a construção de diversas topologias diferentes, desde cadeia até malha [36]. A Figura 3.2 mostra uma representação da arquitetura OTN Pura com seu segmento metro-core (Subseção 2.1.2) e topologia tipicamente em anel (Subseção 2.1.4). Cada nó é representado por um comutador OTN que opera na camada eletrônica. Junto do *switch* OTN são empregados os *muxponders*, que combinam/separam os comprimentos de onda, provenientes da camada óptica. Diferente do *transponder*, o muxponder é capaz de mapear várias interfaces de cliente de sub-taxa na camada eletrônica diretamente na interface de

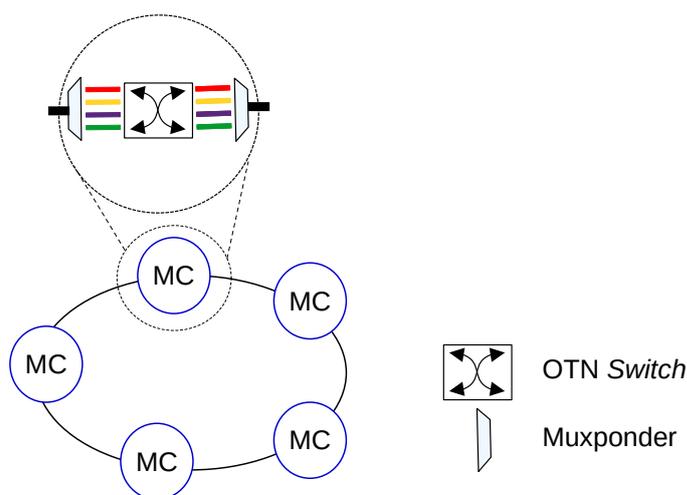


Figura 3.2: Arquitetura de rede OTN Pura

linha. Neste ponto prepara-se os sinais de dados de sub taxa na forma de canais de taxa de dados mais alta.

Vantagens

A arquitetura OTN pura é amplamente utilizada em redes legadas devido à facilidade de atualização e baixo custo de implementação, garantindo a agregação de tráfego no domínio óptico e reduzindo o desperdício de comprimentos de onda. Por esse motivo, embora seja uma das arquiteturas mais antigas em uso, ainda é uma alternativa viável de solução para a rede metropolitana, pois permite multisserviço a taxas baixas, como sub-10 G/s [150]. A OTN Pura é citada em vários trabalhos recentes [58, 59, 83] para comparação com as tecnologias mais atuais e que serão discutidas posteriormente nas próximas seções. Outra grande vantagem dessa arquitetura é a facilidade de virtualizar as operações usando SDN e suportar novos tipos de tráfego de granularidades variadas devido à sua propriedade de encapsulamento [83].

Desvantagens

A OTN Pura ainda é uma das arquiteturas que mais acarreta em aumento de custos relacionados ao consumo de energia dos equipamentos envolvidos, uma vez que cada um dos *muxponders* operam realizando conversões OEO, que são realizadas em todos os nós da rede. Devido a isso, o roteamento é do tipo ponto a ponto. O uso extensivo de conversões OEO resulta em um aumento considerável e desnecessário na latência das conexões [59].

Aplicações

A arquitetura OTN Pura continua sendo uma arquitetura legado utilizada por alguns provedores de rede. A literatura tem destacado outra aplicação para os comutadores OTN. O grupo de estudos ITU-T *Study Group 15* (ITU-T SG15) e o *International Mobile Telecommunications Group* (IMT)-2020 (5G) têm trabalhado na construção de especificações técnicas para a implantação da rede 5G com suporte de redes ópticas [151] e melhorias nos OTNs. Essas melhorias são principalmente a inclusão de interface comum de rádio público (*Common Public Radio Interface* (CPRI)), compondo um segmento de rede denominado OTN “*full-stack*” [137], para prover comunicação às redes móveis. A partir dessa nova interface obtém-se o *Mobile-Optimized Optical Transport Network* (M-OTN), versão da OTN para suportar a tecnologia 5G, transportando o sinal do cliente na camada de comunicação *fronthaul* [20]. Neste cenário, a arquitetura é implementada principalmente com topologias em árvore, que em comparação com topologias em anel, permite reduzir a latência de acesso [152]. Algumas características da OTN Pura são destacadas na Tabela 3.1.

3.2 Arquitetura OTN sobre DWDM

Composição e Funcionamento

A rede de transporte OTN combinada com a tecnologia DWDM, definida pela ITU-T G.872, foi projetada com base na OTN Pura (Subseção 3.1). Trata-se de uma evolução para sair do modo de comunicação ponto a ponto e explorar os desvios ópticos possíveis, levando-se ao modo de comunicação fim-a-fim. Na arquitetura OTN/WDM reduz-se o uso de conversões OEO a cada salto, diminuindo ainda mais o uso de portas WDM no FOADM/ROADM. A organização estrutural da OTN/DWDM é semelhante à da arquitetura OTN pura (Subseção 3.1), conforme mostrado na Figura 3.3, mas há diferenças na organização física. A OTN/DWDM representa uma melhoria em relação a OTN Pura, reduzindo os pontos de conversão OEO para o mesmo segmento de rede. Os nós OTN/DWDM podem ser OTN autônomos ou OTN integrados com OADM.

Vantagens

A comutação do tipo E2E representa uma economia no uso de *transponders* de comprimento de onda, que são de alto custo, já que as operações OEO são necessárias apenas na origem e no destino das conexões. Além disso, outras vantagens são a potencial redução no consumo de energia e na latência da rede relacionada à conversão OEO, que potencialmente ocorrem em menor escala [77, 153]. Outro ponto importante é a facilitação

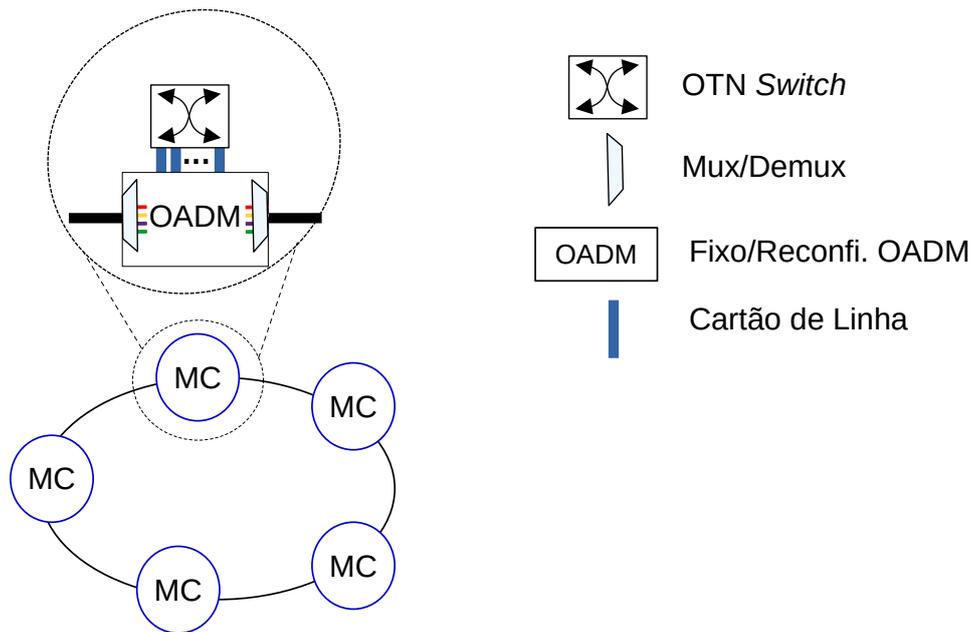


Figura 3.3: Arquitetura de rede OTN/DWDM

dade de manipulação da camada OTN ou da camada óptica separadamente, sem grandes interferências na rede. A OTN/DWDM permite facilmente arquiteturas mistas que sejam compostas de nós com OTN Pura e OTN/DWDM, especialmente para aproveitar equipamentos de *hardware* legado e implementar o conceito de arquitetura de rede desagregada [20].

Desvantagens

O custo dos OADMs reconfiguráveis (ROADMs) ainda é uma questão a ser considerada e tem levado ao estudo de novos projetos de viabilidade econômica para os nós da rede [48], bem como alternativas sem filtro para redes metropolitanas [52, 67]. Considerando o elevado número de nós na MON, o custo pode ser proibitivo. Devido à necessidade de maior número de canais para atender demandas futuras, as operadoras precisarão aumentar os investimentos em equipamentos mais robustos.

Aplicações

As conexões E2E na rede OTN/DWDM em detrimento das conexões ponto-a-ponto na OTN Pura, tornam esta arquitetura uma solução alternativa para a tecnologia 5G devido ao menor consumo de energia (menor quantidade de conversões OEO). A literatura mais recente ao nível da arquitetura OTN/DWDM tem focado na otimização da capacidade

da rede de transporte [25], na adição de *transponders* coerentes [51] e na utilização desta arquitetura para a viabilidade da implementação da tecnologia 5G [20, 37]. Quanto à otimização de capacidade, [25] propõe um modelo de otimização que cria túneis de transmissão sempre que a capacidade de tráfego entre qualquer par de nós estiver acima de um determinado limite definido pelo operador. A vantagem é que esses túneis são configurados para cada par de nós, utilizando o algoritmo *path computing* de redes de transporte multicamadas de diversas tecnologias (SDH/SONET, IP/MPLS, OTN/DWDM), resultando em otimização entre camadas, que não seria possível se cada otimização de camada ou tecnologia fosse feita de forma independente.

A relação entre redes móveis OTN/DWDM e 5G deriva do consenso da indústria para este novo setor, uma vez que a tecnologia OTN/DWDM deve servir como infraestrutura de camada física subjacente para 5G, permitindo serviços Ethernet (na forma de FlexE) mais dinâmicos [37]. Para esse fim, o 5G requer uma infraestrutura adaptável e resiliente a várias falhas de fibra, fornecendo níveis de serviço comprometidos aos usuários finais e reduzindo significativamente o custo da rede em comparação com uma rede comutada OTN tradicional. Da mesma forma, [20] descreve um modelo universal de comutação OTN, que inclui recursos de comutação completamente independentes de protocolo, agregando o tráfego quadro a quadro em todas as portas em qualquer camada do sistema. Algumas características da OTN/DWDM são destacadas na Tabela 3.1.

3.3 *Ultra Dense-Wavelength Switched Network (UDWSN)*

Composição e Funcionamento

A arquitetura *Ultra Dense-Wavelength Switched Network (UDWSN)*, proposta em [96], é um tipo especial de rede óptica elástica, uma DEON, cujo principal diferencial é a implantação em redes metropolitanas de WSSs específicos e de baixo custo, com configurações de granularidades espectrais ultrafinas, abaixo de 12,5 GHz, características de EON [59]. Assim, é possível experimentar quatro tipos diferentes de granularidade de espectro: 5 GHz, 6,25 GHz, 10 GHz e 12,5 GHz [57]. A arquitetura em questão é baseada em equipamentos ópticos de baixo custo e elementos passivos, balanceados e distribuídos com outros de maior custo ou que ainda estão sendo projetados pelos fabricantes.

A Figura 3.4 ilustra a arquitetura UDWSN. Cada nó MC nesta arquitetura consiste em ROADM baseado em WSS com largura de banda óptica de 50 GHz e *transponders* coerentes com granularidade ultrafina. Os nós MA são formados por *transponders Intensity-Modulation Direct-Detection (IMDD)* e um elemento passivo multi/demultiplexador, a ser definido de acordo com as sub topologias do resto da rede de acesso. Quando a sub topologia tem a forma de cadeia, utiliza-se *UD-blockers*. Quando a sub topologia

tem a forma de árvore, emprega-se UD-AWGs em algumas ramificações. Cada nó MC agregador possui um *switch* OTN que agrega as demandas de tráfego da parte de acesso da rede.

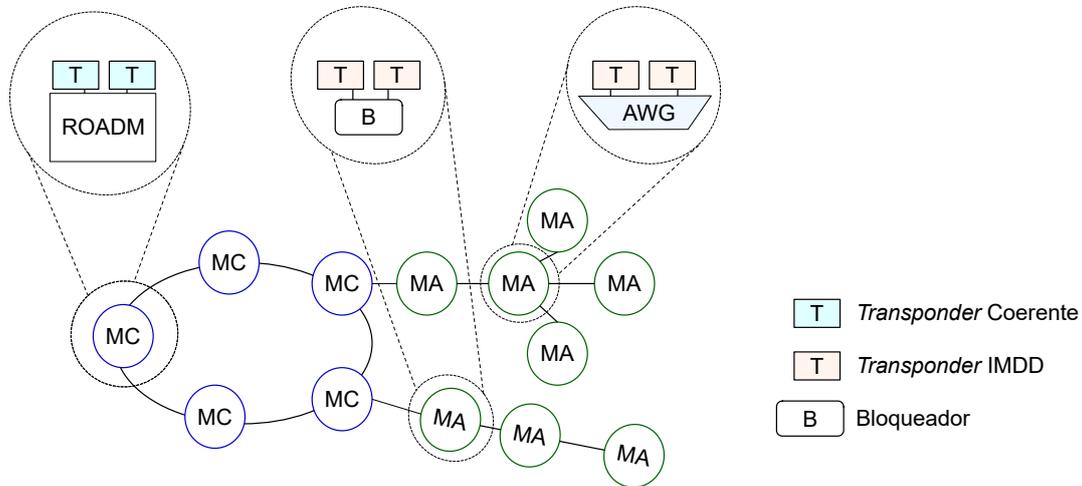


Figura 3.4: Arquitetura UDWSN com os segmentos MC e MA.

Os dois segmentos de rede também são classificados como simétrico (na parte MC), quando a velocidade do tráfego é a mesma em ambas as direções (*upstream* e *downstream*), e como assimétrico (na parte MA), quando a velocidade de transmissão de dados no *uplink* e *downlink* são diferentes. Em qualquer que seja o sentido de comunicação, o fluxo pode seguir rotas diferentes devido à possibilidade de adição/remoção de sinais locais, existentes em comprimentos de onda dedicados. Na parte simétrica também são usados *transponders* coerentes, para lidar com a maior quantidade de tráfego, que suportam muitas subportadoras transmitidas para diferentes nós MA usando OOFDM. Na parte assimétrica são empregados *transponders* IMDD para nós MA [57, 58].

Vantagens

De acordo com [57, 58, 59], as principais vantagens alcançadas com a arquitetura UDWSN são as seguintes: (i) as granularidades de largura de banda exploráveis são tão pequenas que reduzem a subutilização dos recursos do espectro óptico, uma vez que apenas espectro suficiente é alocado para atender às demandas; (ii) a arquitetura permite a comutação óptica E2E do tráfego de dados na rede, o que leva à redução do consumo de energia, devido à eliminação da necessidade de conversão OEO; (iii) também em decorrência da eliminação da conversão OEO nos nós intermediários que consumiriam frações extras de tempo, a latência é reduzida; (iv) com estreitas granularidades de espectro, uma maior quantidade de canais de comunicação pode ser disponibilizada em comparação com

outras arquiteturas metro, tornando a arquitetura UDWSN viável comercialmente; (v) as conexões podem ser estabelecidas de forma mais eficiente devido às curtas distâncias predominantes no segmento de rede metro, e aproveitando a tecnologia de transmissão coerente, com formatos de modulação mais avançados. Destaca-se ainda que, caso o operador de rede deseje trocar o projeto de rede OTN Pura ou OTN/DWDM para uma alternativa de transmissão flexível e custo relativamente baixo, esta arquitetura é uma proposta de solução mais vantajosa do que a MEON, por exemplo.

Desvantagens

Os *transponders* coerentes são equipamentos de custo alto, e devido à característica de numerosos nós nas redes metropolitanas, muitos deles podem ser requeridos, elevando consideravelmente o CAPEX. Algumas outras desvantagens notadas são: (i) mesmo que uma granularidade tão fina quanto 5 GHz possa ser adotada na metro, ainda haverá sérios desperdícios de recursos do espectro óptico, considerando que a maioria predominante das demandas de tráfego são relativamente pequenas, variando de sub-1 Gb/s à 10 Gb/s, e essa quantidade não ocupa completamente a largura de banda disponível por canal. Esse problema é agravado ao usar granularidades de 10 GHz ou 12 GHz. Assim, a agregação de dados é necessária; (ii) existem limitações tecnológicas a serem consideradas no processo de desenvolvimento de equipamentos ópticos com resolução espectral tão fina quanto 5 GHz, (iii) equipamentos WSS com largura de banda tão pequena quanto para as granularidades destacadas (5 GHz ou 6,25 GHz, por exemplo) ainda precisam ser fabricados e o custo, que depende dessas medidas de largura de banda, é relativamente alto [48]; (iv) assim como em redes de núcleo com tecnologia EON de transporte óptico, o desempenho pode ser impactado pela fragmentação do espectro óptico, com a arquitetura UDWSN, este problema pode ocorrer com maior frequência, pois a maioria das demandas nesse escopo de rede tem origem e fim na própria rede metropolitana.

Aplicação

A UDWSN é viável para implantação de redes metro e de acesso projetadas de forma integrada. A arquitetura é uma solução candidata para atender serviços de forma mais dinâmica, devido a abordagem flexível, ideal para serviços de computação distribuída na borda da rede [58]. Quando o operador de rede deseja escalar a infraestrutura da rede e ainda aproveitar os *switchs* OTN da arquitetura legado, a resposta pode vir com a implantação da UDWSN com camada de sobreposição OTN. Algumas características do UDWSN são destacadas na Tabela 3.1.

3.4 *Hub-and-Spoke* (HnS) com WDM

A arquitetura *Hub-and-Spoke* sobre WDM é mencionada em [154] e [148] como uma alternativa para ser implantada nas redes metropolitanas. De acordo com esses autores, a proposta da arquitetura tem o objetivo de manter o custo reduzido enquanto as demandas atendidas aumentam.

Composição e Funcionamento

A arquitetura *Hub-and-Spoke* sobre WDM é uma abordagem multicamada composta por *switch* Ethernet sobre rede WDM em malha. Na camada óptica todos os nós possuem ROADMs. Na camada eletrônica, caso o nó desempenhe o papel de MC, um *Ethernet Core Switch* é implementado. Um *Ethernet Edge Switch* é implementado em nós que são acesso metropolitano [148]. Enquanto o DWDM oferece independência de protocolo, para que as operadoras possam transportar qualquer tráfego de dados, fornecer serviços de armazenamento e multiplexação por divisão do tempo (*Time Division Multiplexing* (TDM)), a Ethernet garante baixas taxas de transferência que correspondem a muitos dos serviços oferecidos. A topologia lógica HnS pode ser implementada em tais arquiteturas físicas para contribuir com a melhoria do tempo de comunicação possibilitada pela redução dos níveis hierárquicos.

A Figura 3.5 é uma representação esquemática da arquitetura HnS/WDM. A topologia lógica mostra os dois nós MC que são os *hubs* de destino da rede metropolitana em que estão localizados os PoPs, e também agrega os dados do segmento MA, que são principalmente CO para os quais as operadoras de rede fornecem conectividade. Na camada óptica, caminhos ópticos E2E são estabelecidos entre os nós MC e MA, uma vez que cada MA está diretamente conectado a pelo menos um MC.

Vantagens

A arquitetura HnS/WDM é um ambiente com nós heterogêneos em termos de equipamentos empregados. Com isso, várias configurações podem ser obtidas customizando-se a rede para atender as demandas do provedor de rede, graças à topologia lógica seguindo o modelo HnS. As topologias físicas, de malha ou anel, incorrem em vários níveis de comunicação entre o segmento de acesso e o *hub* que é *gateway* na metro. Esses múltiplos níveis acabam levando a percursos mais longos e, conseqüentemente, a múltiplos saltos. A topologia lógica determina as origens e destinos das requisições, e somente nestes pontos ocorrerá a conversão OEO no caso de caminhos ópticos estabelecidos. Essa estratégia ajuda a reduzir a latência no estabelecimento de serviços. A Ethernet é especialmente

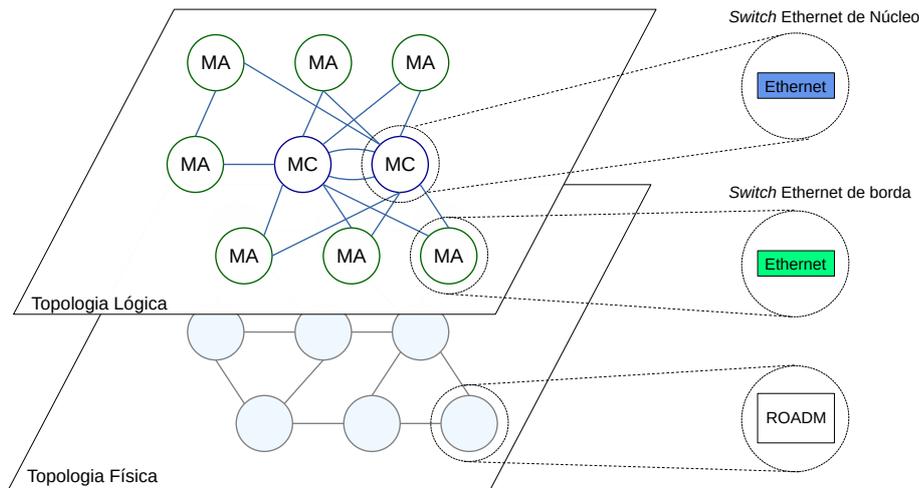


Figura 3.5: Arquitetura lógica HnS sobre WDM.

importante para atender a inúmeras solicitações de dados refinadas porque reduz o desperdício de recursos, especialmente no cenário dos COs.

Outra vantagem da arquitetura HnS/WDM é que a camada Ethernet sobrejacente é amplamente adaptável, podendo atender aplicações diferentes, desde redes domésticas até grandes redes corporativas. Além disso, podem ser facilmente escaladas para lidar com um grande número de dispositivos e grandes quantidades de tráfego de dados [154].

Desvantagens

Os quadros Ethernet associados a um serviço específico geralmente são transportados no mesmo caminho óptico, e como são fixos dessa forma, não há muitas possibilidades de caminhos alternativos. Além disso, deve-se notar que o uso de componentes óptico-elétricos necessários em uma arquitetura híbrida como HnS/WDM incorre em um aumento na latência devido ao processamento extra necessário na tarefa de traduzir informações entre as duas camadas. Adicionalmente, a arquitetura pode levar ao aumento expressivo no consumo de energia, uma vez que *switches* eletrônicos são utilizados em todos os nós, além de amplificadores que podem ser necessários em enlaces WDM.

As redes Ethernet podem ser limitadas pela velocidade de transmissão de dados, o que pode limitar sua capacidade de lidar com grandes quantidades de tráfego de dados. A velocidade mais alta atualmente suportada pelas redes Ethernet é de 800 Gigabits por segundo (Gbps) [155]. Outra desvantagem a ser citada é que à medida que as redes Ethernet crescem em tamanho, podem ocorrer conflitos de rede capazes de afetar o desempenho geral, principalmente quanto ao gerenciamento das infraestruturas em escala.

Aplicação

Os autores destacam que essa arquitetura é especialmente interessante para serviços de vídeo 4K/realidade virtual e na nuvem, tanto pela capacidade de fornecer largura de banda sob demanda, quanto pela redução dos tempos de resposta devido aos caminhos de tráfego com menos saltos em comparação com redes ponto-a-ponto [148]. Algumas características do HnS/WDM são destacadas na Tabela 3.1.

3.5 *Self-Adjusting Unified Metropolitan and Access Network* (ARMONIA)

A arquitetura *Self-Adjusting Unified Metropolitan and Access Network* (ARMONIA) foi proposta em 2020 [90] e é uma proposta de rede autoconfigurável, capaz de acompanhar sua condição dinamicamente e de otimizar sua configuração. A ARMONIA usa NFV e SDN para o controle conjunto dos equipamentos ópticos e IP utilizados nos seus segmentos de rede, acesso e metropolitano. Até o momento, nenhum outro trabalho além do artigo seminal [90] foi identificado na literatura. Por essa razão, as descrições e caracterizações à seguir são baseadas nessa única fonte.

Composição e Funcionamento

A arquitetura ARMONIA compreende a unificação do segmento *core* (com nós MC) e segmento de agregação (com nós MA) da rede metro, bem como o segmento de acesso, que é autoconfigurável devido à implementação de monitoramento com serviço de telemetria [90].

A principal estratégia dessa arquitetura é considerar a unificação desses vários segmentos para facilitar a operação dinâmica da rede, aproveitando o uso de *transponders* coerentes para transmissão de alta capacidade e obter dados sobre a transmissão, que são usados pelos agentes de telemetria. A ARMONIA pode ser implantada de maneira distribuída ou centralizada e geralmente é organizado em várias camadas. O número de camadas é definido de acordo com o tamanho da rede ou objetivos da operadora.

A Figura 3.6 mostra uma representação esquemática da arquitetura ARMONIA. O segmento do nó MC é considerado a camada superior do ARMONIA. O nó de agregação MC, colorido em cinza, é considerado como uma camada intermediária e pode ser implantado em vários níveis de agregação, de acordo com o tamanho da rede ou objetivos da operadora. O segmento do nó MA é considerado a camada inferior. As camadas de nós MC e MA são construídas com base em ROADMs e *transponder* coerente, e implementam NWDM, um sistema de transmissão flexível. Amplificadores são usados quando neces-

sário. Os serviços são prestados de ponta a ponta. O segmento de nó MA, considerado como a borda da rede, contém roteadores IP instalados para coletar e agregar o tráfego da rede de acesso (fixa e móvel) e aproveitar melhor os recursos de transmissão. Cada nó MC conecta PONs e rede móvel. Os PON possuem componentes baseados em OLT para garantir economia de custos em pontos estratégicos para oferecer suporte a serviços de computação de borda. Na Figura 3.6, alguns nós marcados por um círculo vermelho representam locais onde recursos adicionais são instalados, como recursos de computação e armazenamento. Os recursos disponíveis em algum nó MC são de maior capacidade do que os recursos disponíveis em algum nó MA.

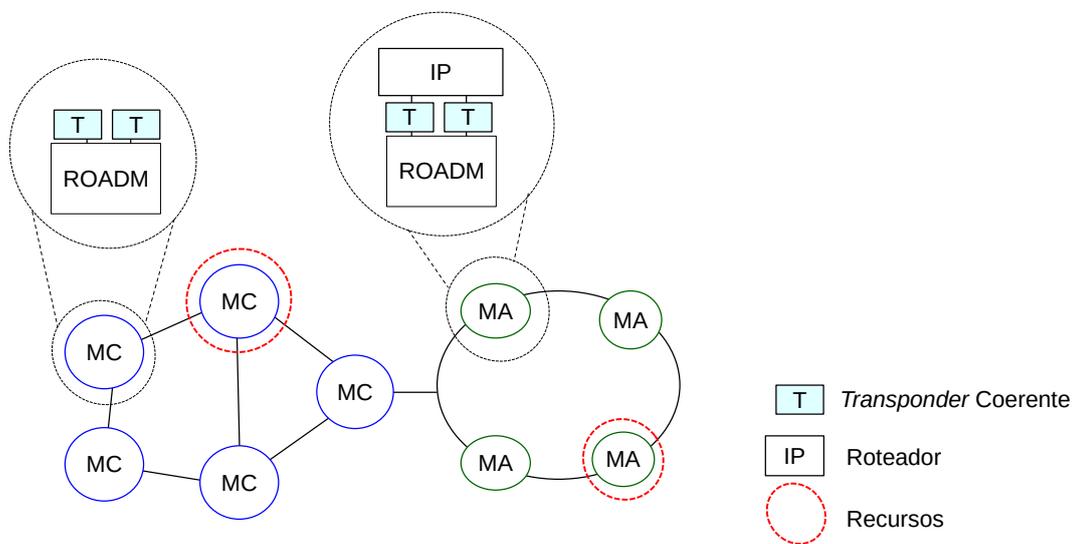


Figura 3.6: Arquitetura multicamada ARMONIA.

Além de uma infraestrutura integrada, a ARMONIA também possui controle e gestão integrados. A arquitetura ARMONIA também possui um estimador de QoT para caminhos ópticos e preditores de tráfego. O estimador QoT é baseado em regressão linear (aprendizado de máquina) e usa informações da localização dos amplificadores e enlaces implantados para analisar a validade de um caminho óptico antes de seu estabelecimento. Os preditores de tráfego são baseados em redes *Long Short-Term Memory* (LSTM), um algoritmo de redes neurais recorrentes e *Prophet*, um algoritmo de previsão de séries temporais do *Facebook*. As previsões de tráfego fornecem soluções para alocação de recursos mais eficiente e é um diferencial da ARMONIA em relação a todas as outras arquiteturas abordadas neste trabalho. As soluções desta arquitetura são projetadas principalmente para atender serviços NS e serviços de redes virtuais.

Vantagens

A abordagem flexível da arquitetura ARMONIA e a distribuição de recursos pela rede garantem maior agilidade para serviços de alta prioridade e baixa latência, especialmente para conexões intra metro. As operações unificadas nos segmentos de rede garantem o estabelecimento de caminhos de ponta a ponta na camada óptica e também contribuem para reduzir a latência. Algoritmos inteligentes que auxiliam no controle e gerenciamento da rede são ferramentas extras, úteis para melhorar a tomada de decisão do operador. A disponibilidade de recursos extras e alguns pontos de rede reduzem o custo de capital e operacional para o operador, dispensando-o de equipar todos os nós igualmente. Além disso, a quantidade de recursos pode aumentar ao longo do tempo de acordo com a demanda pelos serviços.

Desvantagens

A arquitetura ARMONIA prevê uma maior quantidade de níveis hierárquicos ao longo dos segmentos unificados para aumentar os pontos de agregação. O aumento do número de níveis representa uma maior quantidade de saltos para o estabelecimento de caminhos ópticos. Caminhos mais longos podem potencialmente aumentar a taxa de bloqueio de solicitações, além de aumentar a latência. Esta é uma questão que deve ser levada em consideração pelo operador, pois as redes metropolitanas costumam ter muitos nós. Outro grande desafio está relacionado ao controle e gestão unificada. Globalmente, manutenções e atualizações podem ser necessárias com frequência e, por isso, a operadora precisa garantir que o comportamento da rede não seja afetado.

Aplicação

A arquitetura ARMONIA atende todo o segmento de redes metropolitanas e proporciona agilidade e dinamismo, principalmente para serviços de redes móveis, redes de acesso, computação em nuvem e de borda. A tabela 3.1 resume as principais características da arquitetura ARMONIA.

3.6 Modular Optical Metro-Core (MOMC)

A arquitetura *Modular Optical Metro-Core* (MOMC) é destaque em [40, 47, 149]. A arquitetura segue o conceito modular ao ser composta por equipamentos tradicionais de rede mas que estão sendo reprojatados com otimização das suas funcionalidades e capacidade. Trata-se de uma proposta de solução para atender os serviços de tráfego e

novas aplicações que serão necessários até 2030, de acordo com as previsões atuais para as próximas décadas [149].

A abordagem modular do MOMC permite escalar a arquitetura, seguindo o conceito “*pay-as-you-grow*” e, embora seja composta por muitos níveis hierárquicos, a ideia principal é implementar cada vez mais circuitos transparentes junto a esses níveis, para reduzir a necessidade de conversão OEO e reduzir a latência na entrega do serviço. O plano de controle baseado em SDN oferece flexibilidade no ajuste de componentes, canais e consumo de energia.

Composição e Funcionamento

Um esquema de arquitetura MOMC é mostrado na Figura 3.7 de acordo com [149]. São mostrados níveis hierárquicos de rede sendo Metro-Core (MC) o nível superior e Acesso o nível mais inferior. Na porção intermediária da arquitetura são mostrados os níveis de metro-agregação, denominados Agregação 1 e Agregação 2. A MOMC é baseada na tecnologia de transporte óptico WDM e, em todos os níveis, os nós são compostos em OADMs. No entanto, existe uma diferença a respeito do tipo de comutador óptico implementado. Geralmente nos níveis Agregação 1 e Agregação 2 são implementados ROADMs de variados graus. No nível MC podem ser implantada uma menor quantidade de ROADMs, porém de maior grau do que o encontrado nos demais níveis. Exceto no nível Acesso, nos demais níveis podem ser implementados os CDC-ROADMs. Já no nível Acesso, OADMs ou AWGs são suficientes [156]. Quanto mais próximo do nível superior, maior o grau dos ROADMs. Se o custo não for uma questão, os segmentos MC, Agregação 1 e Agregação 2 podem ser formados por ROADMs de mesma arquitetura e capacidade.

Além disso são utilizados SBVTs com modulação e taxa fixa, definidas remotamente via *software*, mas que variam de capacidade em cada nível [40]. No nível MC podem ser implantados SBVTs de até 16 Tb/s por capacidade de fibra [47], enquanto que no segmento de acesso são implantados *transponders* com capacidade de até 1 Tb/s por capacidade de fibra [40]. Observa-se ainda na parte inferior da Figura 3.7 que é mostrado um mapeamento da arquitetura MOMC para segmentos de redes móveis, uma vez que essa arquitetura é uma possível candidata a ser utilizada como infraestrutura dessas redes. Fibras multinucleadas (MCF) na perspectiva SDM estão presentes para aprimorar a capacidade dos equipamentos implantados, como mais uma forma de escalar facilmente a infraestrutura.

A justificativa para esta composição variada da arquitetura MOMC é a devida adequação da infraestrutura ao papel especificado em cada nível. Os nós de nível superior, especialmente do segmento MC1, são *gateways* para WAN. Já os MC2 representam a

fronteira entre os segmentos MC-Agregação e compreende os nós que são *gateways* para serviços como Televisão por Protocolo de Internet (IPTV) e CDN, por exemplo [40].

Os papéis dos segmentos de Agregação foram pensados para distribuir melhor o custo dos equipamentos implantados. O segmento Agregação 1 trata o tráfego agregado do segmento inferior, podendo considerar estratégias e políticas de reordenação das demandas. Já o segmento Agregado 2 é responsável por agregar o tráfego da rede de acesso.

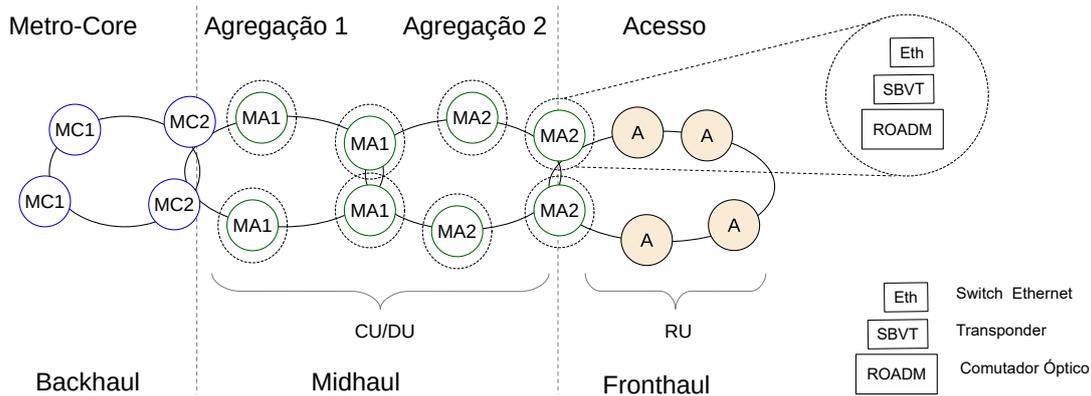


Figura 3.7: Arquitetura MOMC com SDN.

No entanto, devido ao custo e ao melhor aproveitamento das arquiteturas legado, algumas restrições arquitetônicas são impostas aos nós no segmento Agregação 2, que representam pontos críticos devido a sua maior taxa de agregação em relação aos demais níveis. A camada Agregação 2 pode encaminhar o tráfego diretamente para Agregação 1 ou MC (Figura 3.7), reduzindo a probabilidade de bloqueios. Por fim, o segmento Acesso representa a rede de acesso, onde está localizada a rede de borda com a camada de dispositivos clientes, VPN comercial, antenas de rede de telecomunicações (*Remote Radio Head* - RRH), OLTs, entre outros elementos. Um grande número de níveis foi projetado para distribuir funções entre os escopos da rede. Quanto à camada eletrônica nos segmentos citados, é implementado *switch* Ethernet em todos os níveis, porém o objetivo é tornar as conexões entre os segmentos, fim a fim, de modo que sejam reduzidas as necessidades de conversão OEO.

Conforme dito anteriormente, o mapeamento serve para indicar os locais onde os recursos mais necessários, como processamento e armazenamento, podem ser adicionados para que o custo e a latência sejam reduzidos. De acordo com [40], o segmento MC opera como *Backhaul* para a rede 5G interligando bases da Próxima Geração de redes Móveis à Unidade Centralizada (CU).

O segmento *Midhaul* é a interface entre os segmentos MC e Acesso, operando nos segmentos de Agregação, 1 e 2. O segmento *Fronthaul*, mapeado no segmento de Acesso

da rede óptica, conecta as Unidades Remotas de Rádio (RRUs). Este modelo leva em consideração a largura de banda e a latência do transporte, bem como a complexidade de processamento inerente [157]. Tais modelos não serão discutidos aqui, pois estão fora do escopo do trabalho.

Vantagens

A abordagem “pague conforme você cresce” na arquitetura permite que os componentes sejam dimensionados sem grandes interrupções nos serviços. Os elementos de alta capacidade implementados na topologia de rede fornece informação via SDN sobre o estado de cada nó. As informações permitem o estabelecimento eficiente de serviços, mesmo em um cenário de serviços de rede concorrentes. Além disso, a maioria dos níveis funciona de forma transparente, estabelecendo caminhos fim-a-fim com menor latência e menor consumo de energia.

Desvantagens

Como a maioria das operações é implementada como comutação baseada em pacotes, é necessária uma investigação mais aprofundada para determinar o consumo de energia para vários tipos de serviços, onde as conversões OEO são necessárias. As várias camadas da rede podem representar mais saltos e maior latência para alguns tipos de aplicações de alta prioridade, o que pode resultar em bloqueio do serviço. Essas questões merecem maior atenção, principalmente quando as aplicações em questão estão relacionadas a IoT e redes móveis, devido aos seus requisitos rígidos.

Aplicação

A arquitetura MOMC foi especialmente projetada para atender e compartilhar recursos para rede móvel, *Cloud Radio Access Network (C-RAN)*, *edge-cloud computing*, segmento de acesso e aplicações IoT. As principais características da arquitetura MOMC são destacadas na Tabela 3.1.

3.7 Análise Comparativa das Arquiteturas

Esta seção irá discorrer sobre as arquiteturas citadas nas seções anteriores deste capítulo de modo a estabelecer uma análise comparativa. Os critérios empregados nesta análise serão, principalmente, as características técnicas e dados quantitativos dos artigos científicos utilizados como referência. Embora esses critérios tenham sido definidos empiricamente em virtude da disparidade quanto a quantidade de referências bibliográficas

identificadas na literatura científica recente (entre 2017 e 2023), são dados como este que são referenciados como sendo de interesse das operadoras de rede em [12, 52, 158].

A Tabela 3.1 apresenta uma comparação entre as arquiteturas, onde são verificados os segmentos abarcados por cada arquitetura, os tipos de topologias possíveis para a arquitetura proposta, o sistema de transmissão empregado, o tipo de OXC empregado no domínio óptico da arquitetura multicamadas, os tipos de *transponder* utilizados, as possíveis modulações planejadas para a referida arquitetura, o espaçamento espectral da camada óptica e a quantidade de canais fornecidos na camada óptica.

Tabela 3.1: Aspectos gerais sobre arquiteturas MAN ópticas. (NM significa Não Mencionado)

Arquitetura	Segmento	Banda	Topologia	Sistema de Transmissão	SDN	OXC	Transponder	Modulação	Espaçamento	Canais
OTN Pura [150]	MC	C	Anel	WDM	Não	AWG	Line Card	NA	50GHz	96
OTN/DWDM [153]	MC	C	Malha	WDM	Não	WSS-ROADM	IMDD	OOK	50GHz	96
UDWSN [96]	MC MA	C	Malha Cadeia Árvore	DEON EON	Não	WSS-ROADM AWG-OADM	Co-BVT IMDD	QPSK OOK PAM-4	5GHz 6.25GHz 12.5GHz	800 640 320
HnS/WDM [148]	MC MA	C	HnS em malha	WDM	Sim	ROADM (múltiplos graus)	NM	NM	50GHz	88
ARMONIA [90]	MC MA A	C	Malha Anel	Nyquist WDM	Sim	ROADM	Co-Receiver BVT	DP-BPSK DP-QPSK	12.5GHz	320
MOMC [149]	MC MA A	C	Malha Anel	WDM	Sim	CDC-ROADM SDM-ROADM	IMDD	NRZ-OOK	50GHz	80

Observa-se que todas as arquiteturas contemplam o segmento MC, enquanto mais da metade preveem adicionalmente o segmento MA. Dentre as arquiteturas citadas, apenas ARMONIA e MOMC estendem-se até o segmento de Acesso. Outra questão importante a ser observada é que, quanto mais recente a arquitetura proposta, mais extensa é essa arquitetura em termos de segmentos alcançados, e para os quais não há muitos estudos com avaliações pertinentes. As arquiteturas mais antigas, isto é OTN Pura e OTN/DWDM, muitas vezes utilizadas como comparativos com as demais arquiteturas, são infraestruturas situadas no segmento MC como foram fundadas no início, quando foram propostas. Tais arquiteturas conectavam uma quantidade de nós muito menor do que o que é praticado atualmente. Além disso, a topologia de rede mais comum na ocasião do estabelecimento dessas arquiteturas é a topologia em anel.

Quanto à banda de transmissão das arquiteturas elencadas, observa-se que todas atendem a banda C, o que é esperado nesses casos nos quais a infraestrutura óptica base é formada por redes ópticas tradicionais e que já são amplamente utilizadas. A respeito da topologia dessas redes, é observado que a mais tradicional, OTN Pura e as mais atualmente propostas, ARMONIA e MOMC podem ser implementadas com topologia em anel. A topologia em anel é uma das primeiras a serem empregadas no âmbito das redes metro. Nessa topologia os dados são transmitidos em um único sentido ao longo do anel, o que minimiza a possibilidade de colisões e aumenta a velocidade de transmissão. Além disso, topologias em anel são relativamente simples de serem implementadas e gerenciadas, pois

os dispositivos são conectados em um circuito fechado e não há necessidade de configurações complexas. Entretanto, com o aumento da demanda na rede e conectividade e o crescimento no volume de tráfego, a topologia em malha, que antes era uma característica das redes núcleo, têm sido cada vez mais exigidas e cada vez mais próximas do usuário de rede metropolitana. A capacidade de sobrevivência dessas redes com um baixo custo também é um aspecto vantajoso, pois um corte na fibra óptica não desconecta a rede instantaneamente.

Sobre os sistemas de transmissão empregados nas arquiteturas de rede multicamadas, o principal é o mais tradicional WDM, mesmo para arquiteturas propostas mais recentemente. Além disso, metade das arquiteturas destacadas abordam SDN, principalmente as mais recentemente propostas. É possível justificar essas observações com o fato de que os operadores de rede anseiam por soluções elásticas e com maior capacidade para atender as demandas futuras, e a customização da infraestrutura com soluções que adotem virtualização, programabilidade e soluções por software é o caminho mais rápido.

Olhando-se especificamente para a camada óptica dessas arquiteturas multicamadas são comparados os tipos de OXC, *transponders*, sistemas de modulações, espaçamento e número de canais nas colunas seguintes da Tabela 3.1. Como demonstrado, não há grandes inovações no tipo de equipamento de comutação óptica referenciado, com exceção da arquitetura MOMC, que implementa fibras multinucleadas e equipamentos adequados para essas fibras, mas essa arquitetura utiliza transponder tradicional, modulação simplificada e possui menor número de canais. Já as demais arquiteturas recentes (UDWSN, ARMONIA), que preveem comutadores ópticos tradicionais, implementam transponders com tecnologia coerente, uma solução inovadora para as redes metropolitanas dado o nível de sofisticação e alto custo desses equipamentos. Os espaçamentos dos canais do espectro óptico são os mesmos destacados no capítulo anterior, assim como o número de canais que continua o mesmo dos sistemas de transmissão óptica mais tradicionais. Ressalta-se que, as arquiteturas UDWSN e ARMONIA, ambas arquiteturas elásticas, são as que possuem maior granularidade de número de canais, devido à menor largura de banda desses canais. Combinadas com uma camada eletrônica otimizada, essas arquiteturas podem ser ideais para atender os serviços das redes metropolitanas e de acesso, que apresentam uma grande variedade de granularidade de taxas diferentes.

3.7.1 Temas de Pesquisa por Arquitetura

Nesta seção são destacados os tópicos mais abordados na literatura identificada a respeito de cada arquitetura de rede. Os tópicos indicados aqui são infraestrutura de *hardware*, engenharia de tráfego, custos, desempenho, proteção e controle e gerenciamento, os quais são demonstrados na Tabela 3.2. A principal função desta seção é explicar quais temas

de pesquisa tem sido mais presentes da literatura científica a respeito de cada uma das arquiteturas.

Tabela 3.2: Principais tópicos abordados na literatura para cada arquitetura.

Arquitetura	Infraestrutura de <i>Hardware</i>	Engenharia de Tráfego	Custos	Desempenho	Proteção	Controle e Gerenciamento
Pure OTN			[150]			
OTN/DWDM	[44]		[150]	[39] [85] [76]	[159]	[128]
UDWSN	[26]		[58]	[58] [83]		
HnS/WDM	[44]	[132] [140] [7]	[160]	[39] [51][27]	[159]	
ARMONIA				[90]		
MOMC	[149] [56][80]			[95]		[143]

A arquitetura OTN Pura é a tecnologia mais antiga e faz parte da segunda geração de rede óptica. Ainda continua sendo utilizada por ser de baixo custo de operação, visto que muitas operadoras customizam sua infraestrutura para aproveitar equipamentos legados. Apenas um trabalho é destacado na Tabela 3.2, porque a rede OTN Pura é utilizada nas comparações em outros trabalhos, e devido a isso, um único trabalho é descrito sobre custos.

A respeito de infraestrutura, a arquitetura mais debatida é a MOMC sendo que esses trabalhos, em geral, discorrem sobre testes de capacidades de equipamentos de *hardware* em uma arquitetura modular, que cresce de acordo com a demanda. Apenas a arquitetura HnS/WDM tem sido abordada com relação às soluções de engenharia de tráfego, onde são investigadas soluções de classificação das demandas para garantir o atendimento com menor latência no estabelecimento dos serviços, além de redução na utilização de recursos.

Quanto a análise de custos, não foram identificados trabalhos na literatura sobre as arquiteturas HnS/WDM, ARMONIA e MOMC que foquem nos custos de implantação ou operação. Um trabalho específico compara os custos de operação para escalabilidade das arquiteturas OTN Pura e OTN/WDM, enquanto que, para a arquitetura UDWSN há um trabalho que faz um levantamento sobre os custos com equipamentos para a instalação da infraestrutura relacionado ao consumo energético dessa arquitetura. O desempenho é o tema mais debatido. Quase todas as arquiteturas são comparadas com relação a diferentes estratégias de alocação de recursos, de forma global, com decisões sendo tomadas de maneira integral para as duas camadas da rede, assim como de maneira local, com soluções combinadas a partir de cada domínio de rede. Alguns desses trabalhos comparam mais de uma arquitetura, sobretudo os trabalhos que propõem uma nova arquitetura.

O tópico de gerenciamento também é pouco explorado nos trabalhos identificados. Em [128] os autores fundamentam-se no *OpenStack* com o objetivo de gerenciar os componentes de múltiplas infraestruturas virtualizadas em arquitetura OTN/WDM. Já em [143] discorre-se sobre o controle, gerenciamento e monitoramento da rede sob a perspectivas de vários níveis de desagregação distintos.

3.8 Resumo Conclusivo do Capítulo

Conforme identificado nos trabalhos destacados neste capítulo, as arquiteturas multicamadas devem oferecer suporte a aplicativos emergentes, atendendo aos requisitos 5G, especialmente com o objetivo de reduzir os custos. As arquiteturas multicamadas, mesmo as não tão recentes como a OTN Pura e OTN/DWDM, estão sendo consideradas como infraestrutura base para as redes móveis.

Apesar de serem soluções consideradas para aumentar a capacidade de maneira imediata, especialmente no que se refere à agregação de tráfego em diferentes níveis, as arquiteturas multi camadas levam à grandes desafios. Um dos principais desafios é a otimização unificada entre as camadas [32]. Outro grande desafio é a grande variedade de gerações entre os equipamentos e protocolos, o que pode levar a inconsistências e maior complexidade de gerenciamento a longo prazo [32].

Capítulo 4

Arquiteturas das Redes Ópticas Metropolitanas de Camada Única

Este capítulo apresenta arquiteturas de camada única para redes ópticas metropolitanas identificadas na literatura de redes ópticas de transporte de dados. Para a seleção dessas arquiteturas foram empregados os mesmos critérios mencionados no início do Capítulo 3. É proposta uma classificação das arquiteturas apresentadas para uma discussão sistemática a respeito dos sub segmentos de rede metropolitana cobertos por cada tecnologia.

A Figura 4.1 mostra as arquiteturas de camada única que serão exploradas neste capítulo. Pela amplitude do assunto, formalizou-se uma classificação útil para comparação conceitual com base na *filtragem de sinais*, que implica na existência ou não de *Optical Filter (OF)*, identificados como WSON, FL e sFL; e conversão OEO, que representa o grau de implementação dos conversores de sinal, identificados por diferentes tons de amarelo.

Com relação à classificação da filtragem de sinal, são identificadas as arquiteturas de rede do tipo WSON, FL e sFL. Uma arquitetura WSON é composta inteiramente por nós WSON. No entanto, as arquiteturas FL são geralmente compostas por uma proporção maior de nós FL em seu núcleo e, no máximo, dois nós WSON em sua borda. Já as arquiteturas sFL, como será mostrado, podem ser estruturadas de duas formas: (i) vários nós do tipo WSON e FL, ou (ii) uma proporção maior de nós do tipo sFL e, no máximo, dois nós WSON. Uma arquitetura MAN óptica requer pelo menos alguns nós de filtragem devido ao número considerável de nós, distâncias e qualidade de transmissão, comuns neste segmento de rede, que faz a ponte entre as redes de acesso e as redes de núcleo.

Sobre a classificação de conversão OEO, uma rede óptica pode ser categorizada como transparente, opaca ou translúcida. Essa classificação é importante porque demonstra como a comunicação óptica é realizada nessas redes. Enquanto nas redes opacas a fibra é utilizada apenas como um canal de transmissão robusto e todo o trabalho de comutação é realizado no domínio eletrônico, nas redes transparentes todas as funções são realizadas

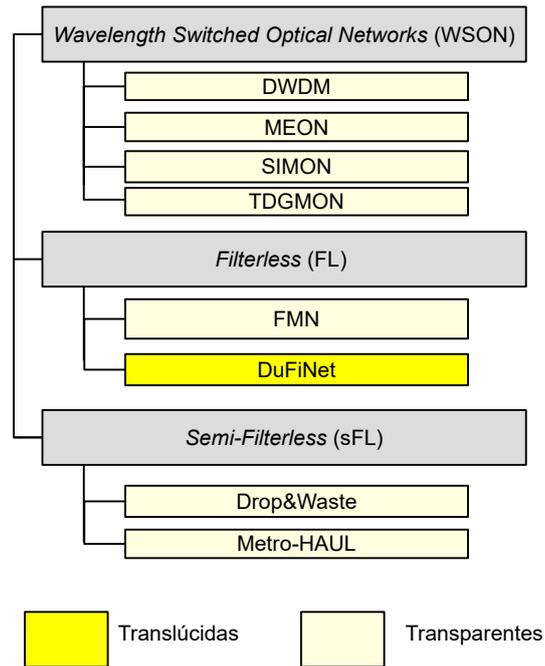


Figura 4.1: Classificação das arquiteturas metro ópticas de camada única.

exclusivamente no meio óptico. Redes translúcidas possuem pontos de opacidade e transparência [36]. Em geral, as redes transparentes têm o maior custo de implantação, mas a latência para a entrega do serviço e o consumo de energia são menores do que outros tipos de redes. Além disso, é mais fácil gerenciar o plano de controle em redes transparentes. Quanto maior o nível de transparência da rede, mais significativas serão essas vantagens [161].

Neste ponto, algumas inferências gerais podem ser feitas, quais sejam: *(i)* As redes WSON são geralmente mais caras e mais robustas que as variações FL e sFL; *(ii)* o custo reduzido de implementação e operação das variações FL e sFL é um grande motivador para operadoras de rede e pode ser uma boa alternativa para suportar redes 5G/6G e seu progressivo aumento de capilaridade, através da implementação de infraestrutura *midhaul* e *fronthaul*; *(iii)* as redes FL e sFL sofrem com a limitação no alcance óptico do sinal, devido à retirada do filtro óptico. Além disso, neste cenário, cada sinal transmitido ocupa toda a rede. Assim, ao passar pelos divisores (*splitters* ópticos), há uma perda de inserção mais significativa do que se estivessem sendo usados filtros. Além disso, o aumento do consumo de uma porção mais significativa do espectro de frequência ocorre devido à presença de sinais não filtrados; *(iv)* Finalmente, nas redes WSON, quando os sinais ópticos passam por vários desses filtros, ocorrem distorções espectrais levando a uma baixa relação sinal-ruído (OSNR), portanto, a largura de banda equivalente resultante do

canal pode ser significativamente reduzida [162].

Nas subseções a seguir, serão apresentadas as novas arquiteturas de rede metropolitana de camada única, organizadas de acordo com WSON (Subsection 4.1), FL (Subseção 4.2) e sFL (Subseção 4.3). Optou-se por manter os nomes próprios das arquiteturas em inglês para mais rápida associação com o que é praticado na literatura.

4.1 Redes ópticas comutadas de comprimento de onda

O WSON emprega OF, dispositivos que selecionam um segmento do espectro óptico enquanto bloqueiam partes indesejadas desse espectro. Esses dispositivos não requerem conversão OEO e, portanto, não incorrem em aumento no consumo de eletricidade quando o *bypass* óptico é aplicado porque não requer transceptores adicionais. As principais arquiteturas do tipo WSON apresentadas são: DWDM (subseção 4.1.1), MEON (subseção 4.1.2), SIMON (subseção 4.1.3) e TDGMON (subseção 4.1.4).

4.1.1 *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM)

Embora usadas por cerca de 20 anos, a arquitetura *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), ou multiplexação por divisão de comprimento de onda densa, ainda é frequentemente mencionada na literatura mais recente ([161, 163, 164, 165]) por ser o padrão atual do transporte óptico transparente. A pesquisa em DWDM tem concentrado-se principalmente em aumentar o número de canais nos *transponders* [166] e melhorar o aproveitamento da largura do espectro em torno da banda C [167].

Composição e Funcionamento

As arquiteturas DWDM podem transportar vários canais de informação em um comprimento de onda individual na mesma fibra. Nesta rede, os nós são compostos de OADMs (*Optical Add/Drop Multiplexer*) baseado em grades de guia de onda (AWG) ou, mais recentemente, baseado em *Wavelength Selective Switch* (WSS) em OADM reconfigurável (os ROADMs) [168]. Amplificadores *Raman* [169], amplificador Óptico à fibra dopada com Érbio (EDFAs) [167] ou amplificador de fibra dopada com Praseodímio (PDFAs) [166] para recepção ou transmissão de sinal e transponders.

O número de canais disponíveis em DWDM pode variar de 32 a 96 [161, 163, 164, 165] em banda C (1530 nm - 1565 nm), dependendo do tamanho do espaçamento da largura de banda. O aumento de canais só é possível expandindo o espectro disponível para além da banda C. Assim, adicionando a banda L (1570 nm - 1610 nm), pode-se obter uma janela de transmissão de 200 canais [163, 170].

Embora seja possível aumentar o número de canais adicionando a janela da banda L, é necessário algum esforço extra por parte do operador de rede. Alcançar a equalização de potência óptica é uma tarefa complexa. Além disso, os amplificadores EDFA de banda L mais simples para redes metropolitanas normalmente têm ruído mais alto do que os amplificadores de banda C. Este problema pode ser resolvido implementando amplificadores mais robustos e, conseqüentemente, caros [50]. Devido à adoção promissora da banda L, o laser em onda contínua para anel de fibra de comprimento de onda estável operando na banda L e o filtro *Fabry-Perot* foram recentemente aprimorados para obter comprimentos de onda mais uniformes [171].

Uma versão mais eficiente do DWDM, chamada ultra-DWDM (*Ultra Dense-Wavelength Division Multiplex* (UDWDM)), pode ser obtida subdividindo um canal DWDM em canais menores, comuns em redes Metro-Acesso. Assim como nas redes elásticas, esses canais são chamados de *slots* de frequência (FSs). Por exemplo, canais de 62,5 GHz são divididos em 5 FS de 12,5 GHz. Dentre esses canais menores, existem FSs que são definidos como *uplink* (US) e *downlink* (DS) para atender cada usuário [15]. Recentemente, a banda O tem sido investigada como uma possível alternativa de solução baseada em moduladores ópticos ultracompactos, implementados em módulos conectáveis para interconexões ópticas [164, 165].

Em redes híbridas IP-DWDM com um plano de controle unificado, o paradigma SDN pode ser explorado para gerenciar esse plano de controle. As principais vantagens são o aumento da flexibilidade da rede e ganhos relacionados à interoperabilidade e engenharia de tráfego multicamadas. No entanto, existem desafios, como o tempo de reconfiguração do equipamento, pois os roteadores têm tempos de atualização muito mais curtos do que os *switches* ópticos. A realidade é que hoje a maioria dos provedores de rede mantém essas redes otimizadas separadamente [13, 128, 161].

Vantagens

Uma das principais vantagens que pode ser destacada é a flexibilidade de capacidade da arquitetura, que pode ocorrer com pouca ou nenhuma necessidade de troca dos amplificadores e multiplexadores utilizados. Da mesma forma, é possível aumentar gradativamente a capacidade do sistema, iniciando a operação com um número menor de canais e aumentando ao longo do tempo de acordo com a necessidade, com a adição de novos equipamentos.

Desvantagens

Com as vantagens apresentadas e previsões futuras de aumento de tráfego, as redes DWDM estão sendo exploradas para aproveitar os comprimentos de onda adjacentes à

banda C, ou seja, os sistemas *Ultra Wideband DWDM* (UW-DWDM). Também existem estudos com foco na adoção da Multiplexação por Divisão de Espaço com um número mais significativo de núcleos nas fibras da rede DWDM, mas com limitações de custo proibitivas. Além disso, a agregação de muitas conexões de baixa largura de banda na rede óptica metropolitana requer mais amplificadores de linha para compensar a perda nas transmissões [163].

Aplicações

A arquitetura de rede DWDM é viável para comunicação de longa distância e redes metropolitanas [161]. As ligações E2E têm como foco a otimização da capacidade da rede de transporte [25], a adição de *transponders* coerentes [51] e a utilização desta arquitetura para a viabilização da implementação da tecnologia 5G [20, 37]. DWDM é a solução principal para o provedor de serviços, empresas de *Internet* e *Datacenter* atualmente. A Tabela 4.2 traz um resumo dos destaques da arquitetura DWDM.

4.1.2 *Metro Elastic Optical Network* (MEON)

Metro Elastic Optical Network (MEON) são redes ópticas com tecnologia de transmissão EON. MEON foi mencionado pela primeira vez em [79], em 2013, e recentemente foi destacado em [4, 5, 84, 102].

Composição e funcionamento

Enquanto OTN puro e OTN/WDM utilizam vários amplificadores intermediários em seus respectivos enlaces ópticos, para MEON o uso é dispensado sob o argumento de que as distâncias são suficientemente curtas. Os poucos amplificadores empregados estão localizados no fluxo de entrada e saída dos nós e apenas para garantir energia eficiente para as etapas de processamento de sinal nos nós [102].

Na arquitetura MEON, conforme mostrado na Figura 4.2, os nós são implantados no segmento metro-core (MC). Esses nós são baseados em *cross-connect* de largura de banda variável (ou *Bandwidth-Variable Cross-Connect (BVXC)*) [102] e vários *transponders* de largura de banda variável (ou *Bandwidth Variable Transponder (BVT)s*) [102, 138] operando em um conjunto arbitrário e contínuo de FS com granularidade de 12,5 GHz no espectro de frequência da fibra óptica. A flexibilidade exigida nesta arquitetura pode ser alcançada usando diferentes tecnologias, como *Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OOFDM), *Nyquist WDM* e *Time-Frequency Packing* (TFP) [172, 97, 147]. Enquanto a arquitetura apresentada em [79] possui uma topologia em anel, a topologia implementada em [4, 5, 84, 102], por exemplo, é em malha.

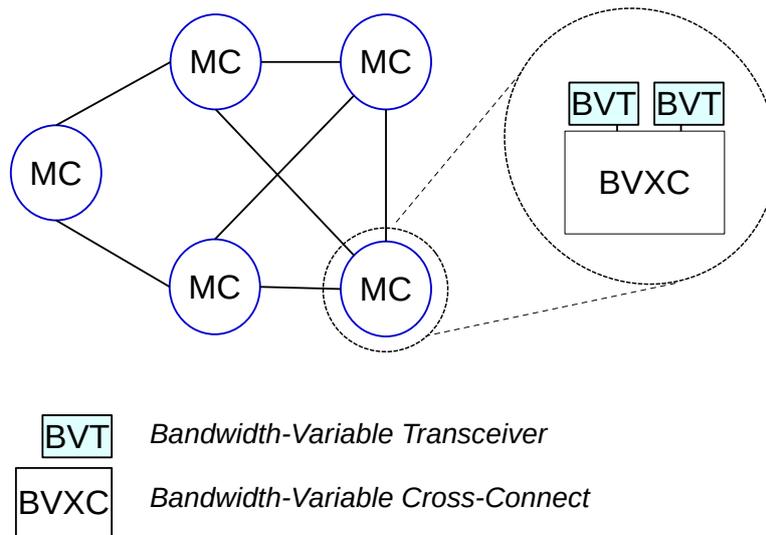


Figura 4.2: Arquitetura MEON em malha.

Tabela 4.1: Relação de valores de largura de banda por *slot* e quantidade total de *slots* .

Largura de banda FS	Nº FS	Fonte
5	De 200 a 800	[48, 57, 59]
6,25	De 160 a 640	[48, 57, 59, 79]
10	De 100 a 400	[59]
12,5	De 80 a 320	[102, 48, 55, 57, 59, 79, 97]

A arquitetura MEON é identificada com a rede óptica elástica densa ou *DEON*, que usa unidades FS mais estreitas do que os sistemas de transmissão usuais de 12,5 GHz em EON. Na arquitetura MEON apresentada em [102], os nós não possuem um *buffer* (*bufferless cross-connect*), e a largura de banda da fibra de 4 THz é dividida em 640 FSs com uma granularidade de 6,25 GHz, portanto, é uma DEON. Além disso, alguns trabalhos abordam MEON do EON tradicional com FS de 12,5 GHz, como em [5, 147, 172, 101, 133]. Uma relação de medidas de largura de banda e quantidade de slots praticados na literatura é mostrada na Tabela 4.1.

Com esta configuração, o nó terá um custo menor em comparação com o custo de equipamentos da mesma tecnologia implementados nas redes de núcleo. No entanto, devido à falta de *buffers*, uma solicitação pode ser imediatamente bloqueada por não haver FS ou BVT disponíveis, o que resulta na geração de um atraso mínimo na configuração da rede. Por outro lado, em [84], existem *buffers* nos nós da borda da rede. O transponder é alimentado por uma fila de pacotes no *buffer* de tamanho limitado no domínio elétrico, onde ocorre o processo de modelagem de tráfego. O plano de controle da rede, baseado em rede definida por *software* (SDN), realiza um processo de três estágios para configurar

o formato de modulação, a largura do espectro e a frequência central desses *transponders* para que as taxas de *bits* mais altas sejam atribuídas às distâncias de transmissão mais curtas. Observe que o domínio elétrico é considerado apenas para os nós que originam a transmissão. Já em [4] e [5], a arquitetura EON é explorada na rede metropolitana, não sendo mencionado o uso de amplificadores, sendo ainda considerados 100 FSs para enlaces com largura de banda de 12,5 GHz. Essas diferenças de atributos sinalizam que, enquanto uma arquitetura específica não é definida, muitas tecnologias podem ser testadas para análise de desempenho.

A MEON também é capaz de transmissão multibanda chamada multiplexação por divisão de banda (*Band-Division Multiplexing* (BDM)). O limite de alcance do sinal tem sido estudado, principalmente no que diz respeito à banda L, que possui a maior relação sinal/ruído, ao contrário da banda E, que possui a menor taxa. Com isso, a tendência é que as operadoras MEON atinjam um novo patamar de flexibilidade no problema de roteamento, formato de modulação e alocação de espectro (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* - RMLSA) no futuro, podendo adicionalmente selecionar a banda de transmissão [173]. Para isso, a arquitetura da rede exigirá switches ópticos multibanda (*Multi-Band Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer* - MB-ROADM) e o auxílio de algoritmos nas tarefas de monitoramento e controle das limitações da camada física. Quanto aos transmissores e receptores, o sistema OFDM utilizando detecção direta é uma solução econômica para ser empregada nesses componentes. Além disso, adicionar um OF no receptor para reduzir a dispersão cromática e usar uma banda de guarda para melhorar a detecção no receptor é uma solução para reduzir o número de elementos óptico-eletrônicos [174].

Vantagens

A grande quantidade de canais configuráveis é uma vantagem que pode representar novas oportunidades de negócios para as operadoras, pois a capacidade disponível de recursos espectrais pode superar a de outras arquiteturas. Além disso, a fina granularidade espectral é ideal para atender muitos serviços de baixa taxa de dados que são comuns em redes metropolitanas. Ao mesmo tempo, com MEON, supercanais podem ser formados para atender grandes demandas agregadas de segmentos de rede subjacentes. A latência reduzida também é esperada devido ao estabelecimento de caminhos ópticos transparentes de ponta a ponta.

Desvantagens

O maior desafio para a implementação da arquitetura MEON pode ser o alto custo relacionado à aquisição e instalação de novos equipamentos, uma vez que a tecnologia representa

uma mudança de paradigma significativa em comparação com a infraestrutura em operação hoje. Além disso, o problema da fragmentação espectral resultante da exploração ineficiente da capacidade espectral nas chegadas e partidas constantes de novas conexões, que gera buracos no espectro, pode ser mais complexo de ser resolvido em redes metropolitanas devido ao número mais significativo de serviços de conexão.

Aplicações

A MEON é projetada para o segmento metro-*core* (MC) devido à alta capacidade e capacidade de granularidade espectral [4, 5]. No entanto, é provável que a tecnologia seja aplicada em redes de longa distância, especialmente para implementar vários formatos de modulação do sinal adaptáveis à distância [175]. A Tabela 4.2 mostra um resumo dos destaques da arquitetura MEON.

4.1.3 *SDN-Like Innovative Metro-Access Optical Network (SIMON)*

Descrita em [23], a arquitetura *SDN-Like Innovative Metro-Access Optical Network (SIMON)*, com uma topologia que combina estrela e anel, também foi projetada para oferecer suporte à implantação de computação de borda.

Composição e funcionamento

A SIMON pode ser implantada para integrar o segmento de núcleo de acesso da metro. Conforme mostrado na Figura 4.3, um esquema é proposto para explicar a composição da arquitetura SIMON. O sistema de transmissão DWDM é implementado desde a borda metropolitana, nos nós MA, até a região do segmento de acesso. Todos os nós MA são baseados em ROADMS. No entanto, para equilibrar custo e capacidade, alguns desses nós são baseados em ROADMS de 3 graus e outros em ROADMS de 4 graus. Apenas nós com maior grau se conectam diretamente aos Terminais de Linha Óptica (OLT) [92]. A topologia central é um anel e possui cerca de 100 canais DWDM. Por conta disso, cada árvore composta por Unidade de Rede Óptica (*Optical Network Unit - ONU*) [176] na região de acesso criada a partir de um nó MA pode ter até 100 unidades de equipamentos ONU, em conexões transparentes ponto-a-multiponto, baseadas em rede óptica passiva orientada a DWDM (DWDM-PON), em que cada ONU corresponde a um comprimento de onda. Um controlador SDN fornece gerenciamento centralizado. O papel do controlador é atribuir canais dinamicamente à medida que as solicitações da ONU chegam para estabelecer um possível caminho óptico.

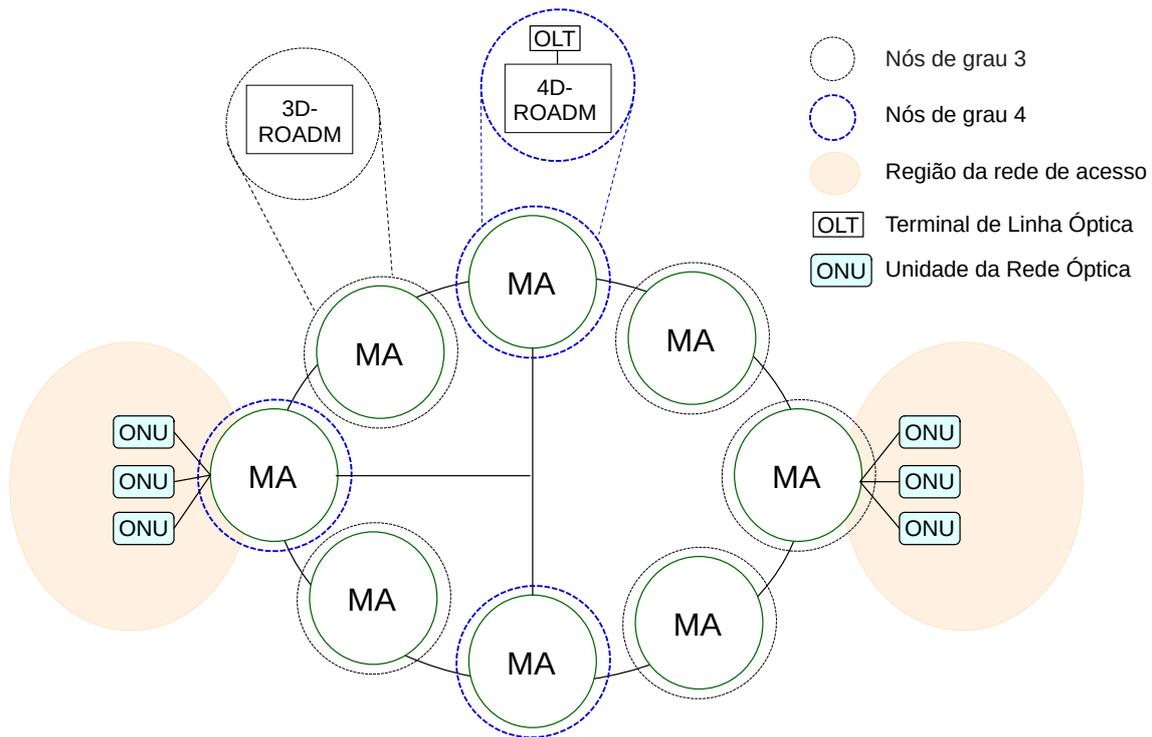


Figura 4.3: Topologia em estrela e anel da arquitetura SIMON.

Na direção *downstream* (DS), os sinais são alocados nas bandas S e C, enquanto os sinais *upstream* (US) são alocados na banda O. A taxa de *bits* que pode ser alcançada em cada canal pode ser configurada em até 10 Gb/s com um canal com largura de banda de 50 GHz e espaçamento de canal de 100 GHz.

Vantagens

A arquitetura SIMON é capaz de facilitar o gerenciamento de recursos para ambientes de tráfego dinâmico, e o controlador centralizado permite operações programáveis. Segundo os autores [23], a topologia desta arquitetura pode ser modificada para manter baixo custo. Além disso, o estabelecimento de circuitos ocorre sem a necessidade de conversão OEO. Assim, a arquitetura garante latência reduzida, principalmente para aplicações que demandam recursos no segmento de acesso, onde as distâncias físicas são curtas.

Desvantagens

O número de ONUs define o número de canais dispostos no segmento de rede em anel. Esta arquitetura é escalável para 100 canais DWDM, ou seja, 100 ONUs conectadas a um ROADM. Se o número de ONUs exceder esse limite, seria necessário um empacotamento mais denso de comprimentos de onda. Devido a esta limitação e considerando o sistema de

transmissão da rede espectral fixa, a escalabilidade do sistema a longo prazo e com custo reduzido pode ser um desafio. Desta forma, a sobrecarga do enlace pode comprometer o desempenho dos nós de menor grau. Além disso, a instalação de novas ONUs pode exigir a implantação de novas fibras sobrepostas na topologia em anel. Como pode ser percebido, a expansão da infraestrutura geral leva a um maior crescimento do CAPEX.

Aplicações

A arquitetura SIMON foi projetada para implementação de topologia em malha para redes com um custo menor. Mesmo com o alto CAPEX decorrente da implantação massiva de ROADMs, a arquitetura pode garantir o equilíbrio entre custo e eficiência alternando equipamentos de diferentes graus de conexão. Assim, essa infraestrutura pode suportar serviços e aplicações móveis e de computação de borda, uma vez que há equipamento robustos mais próximos da borda da rede. A Tabela 4.2 mostra um resumo dos destaques da arquitetura SIMON.

4.1.4 Tridimensional Metro-Access Optical Network

O trabalho [3] apresenta a arquitetura *Tridimensional Metro-Access Optical Network* (TDGMON) que inclui os segmentos metro-acesso e acesso. A ideia é ampliar o número de linhas disponíveis no segmento de acesso implementando nós em uma grade tridimensional.

Composição e Funcionamento

Conforme mostra a Figura 4.4, no nó MA, está localizado o CO, enquanto no nó A, visto como um nó remoto (RN), vários anéis transversais e longitudinais são implantados junto com as ONUs. Duas fibras óticas são utilizadas nas conexões entre os dois nós (cores vermelha e azul), sendo uma delas o enlace de proteção. No CO existem transmissores (Tx) e receptores (Rx) sintonizáveis, que utilizam o formato de Modulação por Desvio de Fase Diferencial (*Differential Phase Shift Keying* - DPSK), *switches* ópticos em configuração 1 : 2, além de circuladores ópticos, e amplificadores EDFA, multiplexadores e demultiplexadores.

O nó A é composto por multiplexador AWG $N \times N$, baseado em *Coarse Wavelength Division Multiplexing* (CWDM), conectando vários anéis com ONUs. Nas interconexões de fibra óptica entre ONUs, o espectro óptico é dividido em intervalos de espectro chamados de faixas espectrais livres (FSRs), com a alocação de comprimento de onda ocorrendo periodicamente em caminhos fixos com comunicação *peer-to-peer*. Simultaneamente, a

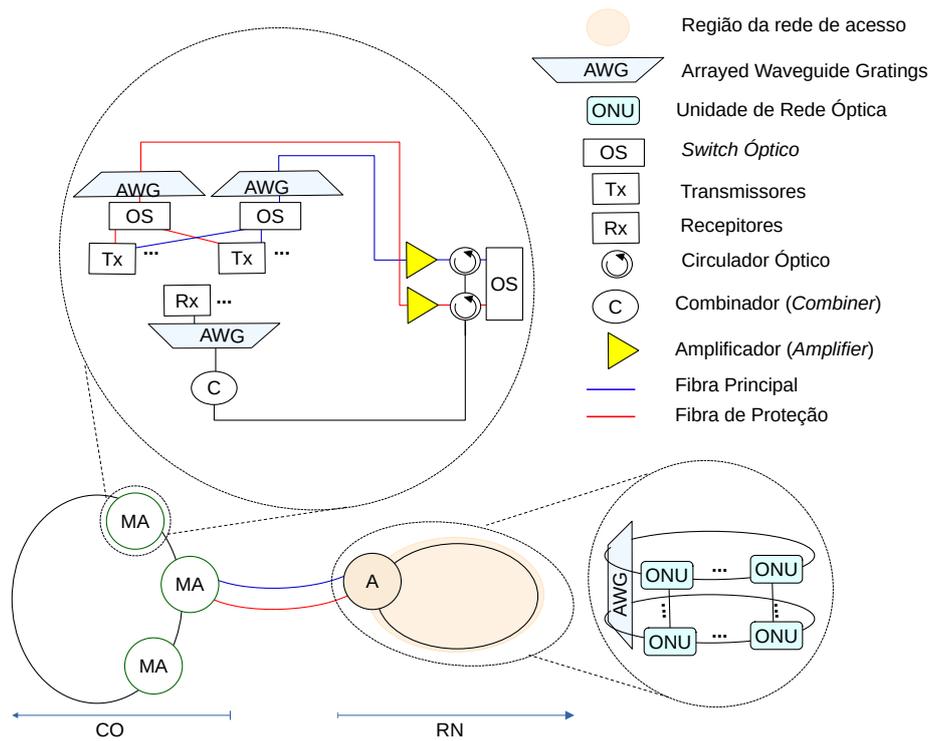


Figura 4.4: Esquema representativo da TDGMON, adaptado de [3].

transmissão do sinal pode ocorrer no sentido US (da direita para a esquerda), DS (da esquerda para a direita) e na comunicação direta nas direções transversal e longitudinal.

Vantagens

A arquitetura também implementa quatro níveis de proteção, descritos a seguir: *(i)* proteção contra falha na fibra principal (na fibra de trabalho em azul na Figura 4.4) entre CO e RN, com uma troca de porta sendo realizada no comutador óptico, e conseqüentemente a transmissão passa a ser feita através da fibra de proteção; *(ii)* Proteção contra falhas nas fibras de distribuição, isto é, nas fibras conectando o AWG aos anéis de ONUs nos RNs. O mecanismo é semelhante ao mencionado anteriormente, mas garantindo resiliência a múltiplas falhas com a transmissão ocorrendo em outro anel, mantendo a potência; *(iii)* proteção contra falha de interconexão nas fibras entre as ONUs adjacentes, no caso onde essa fibra se rompe e este ponto de falha o anel continua funcionando em modo de trabalho padrão em sentido horário, ou ainda em sentido anti horário; e *(iv)* falha nas fibras longitudinais que interconectam ONUs, que marca a existência de uma metade superior e uma metade inferior. As ONUs da metade superior do anel continuam funcionando em modo de trabalho padrão, com transmissão de sinal no sentido horário, e as ONUs da metade inferior do anel funcionam em modo de proteção, com transmissão de sinal no sentido anti-horário.

Desvantagens

Os autores [3] garantem que a arquitetura proposta pode suportar um limite teórico de até 512 ONUs e, levando em conta os quatro níveis de proteção existentes, a dimensão da infraestrutura leva ao aumento do CAPEX. Além disso, estudos adicionais são necessários, inclusive sobre o consumo de energia dessa infraestrutura.

Aplicações

A arquitetura TDGMON é apropriada para implementação de redes ópticas metro-acesso em malha. A forma como a TDGMON é organizada possibilita a interconectar redes de acesso de maiores dimensões que as tradicionais à escritórios centrais. A tabela 4.2 mostra um resumo dos destaques da arquitetura TDGMON.

4.2 Redes Ópticas sem Filtro

As soluções de rede sem filtro (ou *Filterless* - FL) são construídas com base em elementos passivos como amplificadores, divisores e acopladores que se encarregam de criar ramificações com nós ópticos e interligar enlaces de rede enquanto abrem mão de ROADMs e WSSs em nós intermediários [10] ou minimizam consideravelmente o número desses dispositivos em uso na arquitetura [177]. Esses elementos já são utilizados com frequência em redes de acesso, segmentos de transporte e redes subaquáticas [10]. As principais vantagens das redes sem filtro são o baixo custo e a simplicidade da infraestrutura e das topologias. Porém, em redes sem filtros, um número mais significativo de comprimentos de onda deve ser utilizado para comunicação em comparação com redes com filtros, pois é natural que as flutuações de potência do sinal conjugado desses comprimentos de onda ocorram ao cruzar uma cascata de amplificadores, rota na qual não há dispositivos para fornecer equalização e controle nos níveis de potência.

Recentemente, algumas arquiteturas MAN ópticas foram destacadas em [39, 10] que será descrita na subseção 4.2.1 e, em particular, uma arquitetura específica denominada *Dual Fiber Network* (DuFiNet) é apresentada em [70] (subseção 4.2.2).

4.2.1 *Filterless Metropolitan Network (FMN)*

A arquitetura *Filterless Metropolitan Network* (FMN) é apresentada em [10], e ilustrada na Figura 4.5.

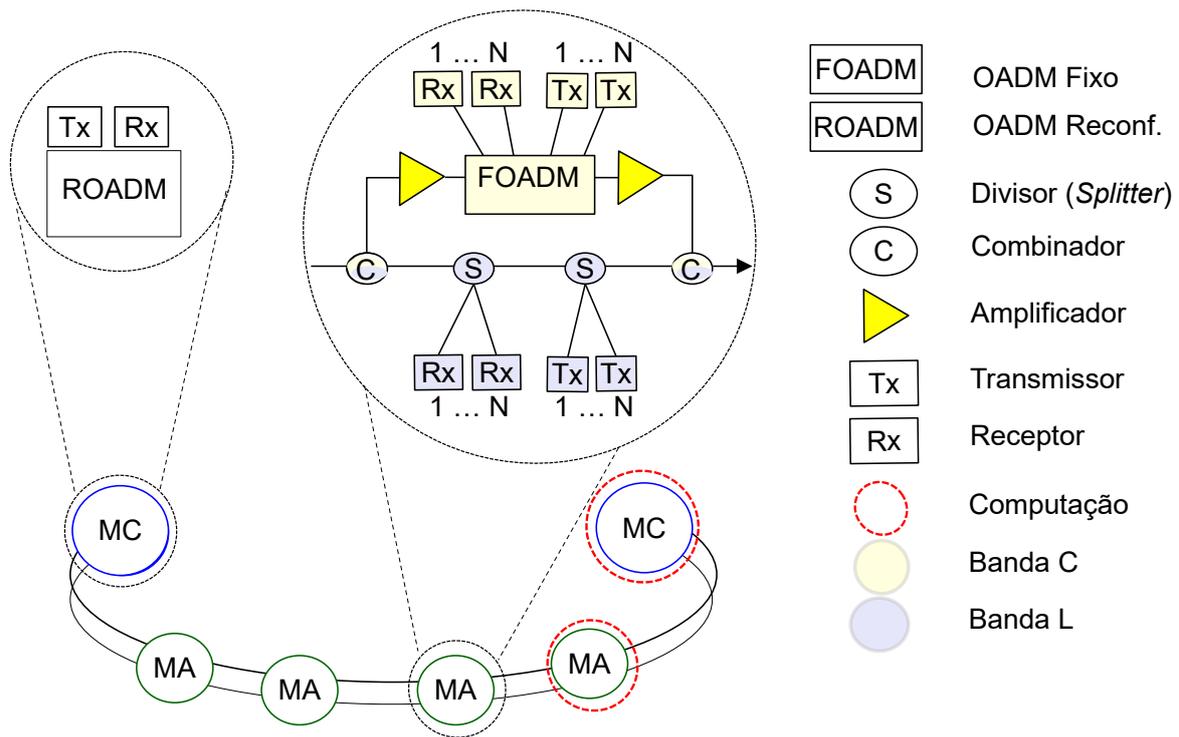


Figura 4.5: Filterless Metropolitan Network (FMN) architecture.

Composição e Funcionamento

A arquitetura FMN trabalha em duas bandas de frequência distintas: C e L. Em relação à banda L, a FMN é considerada sem filtro, mas para a banda C, a FMN é considerada uma WSON porque conta com filtro. Os nós dos segmentos MC e MA na topologia em ferradura são mostrados. Os nós MC na borda da ferradura são interligados através de duas fibras que representam caminhos para a comunicação no sentido US e DS. Em qualquer uma dessas direções, os canais fixos pré-configurados já estão em uma determinada frequência para cada nó. Além disso, *transponders* coerentes (Tx e Rx) são implementados em todos os nós, fornecendo canais com diferentes taxas de *bits*, formatos de modulação e . Os nós MC possuem propriedades de filtragem por serem ROADMs baseados em WSS, enquanto os nodos MA, considerados nodos transitórios, possuem Multiplexador Óptico Fixo de adição/remoção (ou FOADM) para banda C (em amarelo na imagem), mas não possuem nenhum filtro para a banda L (em roxo na figura).

Portanto, os acopladores são os únicos dispositivos que ambas as bandas podem compartilhar. Os nós MA também possuem divisores e amplificadores EDFA para lidar com o sinal neste ponto. Os nós MC são interfaces com a rede central (*backbone*) e possibilitam a comunicação com os nós MA. A linha pontilhada vermelha destaca que alguns dos nós na arquitetura são capazes de realizar computação de borda, uma vez que podem ser equipados com processamento adicional e recursos de armazenamento; assim, a FMN

pode lidar com serviços que requerem baixa latência.

A FMN tem forte potencial para estender a capacidade de transmissão além da frequência da banda C, aumentando o número de canais por meio da inclusão da banda L, e pode ser modelada como um conjunto de sistemas de linhas ópticas ponto a ponto (OLS). Em [10] dois tipos possíveis de arquitetura multibanda são propostos para FMN: C + L - FMN em região única e C + L-FMN em duas regiões. A principal diferença é que, como o processo de desenvolvimento dessas duas novas arquiteturas é baseado principalmente na atualização de amplificadores EDFA para atender as bandas C e L, a implantação de equipamentos dessa natureza pode ocorrer apenas em parte da rede ou na rede como um todo.

Nas arquiteturas de rede C + L - FMN em região única (*Single Region*), todos os amplificadores presentes (dos tipos *line* e *drop* EDFA) são equipamentos híbridos. Ou seja, eles operam tanto na banda C quanto na banda L, portanto permitem a transmissão do sinal na rede. Na arquitetura C + L-FMN em regiões duplas (*Dual Region*), a rede é dividida em dois domínios de recepção de banda, um com amplificadores para a banda C e outro para a banda L, possibilitando reduzir o custo total do *upgrade*. Como a carga na rede aumenta continuamente, os amplificadores híbridos são uma tecnologia promissora e são amplamente utilizados para amplificar um grande número de canais com espaçamento estreito e melhor desempenho.

Em [73], o FMN é coberto com configuração sem filtro de banda C, onde os nós MA não possuem filtros. Em vez disso, empregando transmissão bidirecional em FMN usando uma única fibra para o tráfego nos sentidos US e DS.

Vantagens

A FMN geralmente pode fornecer conexões de 100 Gb/s e 400 Gb/s a um custo reduzido. Isso ocorre porque os equipamentos são principalmente elementos passivos ou OADMs fixos, que possuem CAPEX/OPEX significativamente menor do que *hardware* mais robusto, como ROADMs de vários graus. Além disso, as arquiteturas multibanda podem fornecer um número mais significativo de canais e, portanto, podem representar soluções econômicas ao longo do tempo. Apenas os nós finais requerem ROADMs que, atuando como um *gateway*, permitem a agregação de dados dessa topologia, bem como o encaminhamento ou recepção de dados destinados a outro segmento de rede metro/*core*.

Desvantagens

A escolha de uma das possíveis configurações de FMN deve considerar o impacto de custo de atualizar totalmente a rede, implantando novos amplificadores, divisores e acopladores

híbridos ou executando essa tarefa em apenas um domínio, aproveitando os equipamentos legado restantes.

Aplicações

A arquitetura FMN atende ao segmento MC e MA, fornecendo comunicação ponto-a-ponto entre os nós MA e fim-a-fim entre os nós MA e MC (ou vice-versa). A Tabela 4.2 mostra um resumo dos destaques da arquitetura FMN.

4.2.2 Dual Fibre Network (DuFiNet)

Em [70] é proposta a arquitetura *Dual Fiber Network* (DuFiNet) com topologia em anel e comunicação ponto-a-multiponto (P2MP). É uma solução sem filtro porque as portadoras de comprimento de onda não podem ser reutilizadas.

Composição e Funcionamento

A arquitetura DuFiNet é composta por nós dos segmentos MC e MA, conectados por duas fibras (US e DS), que são necessárias na borda de seus respectivos segmentos, atuando como *gateway* e agregadores, conforme Figura 4.6.

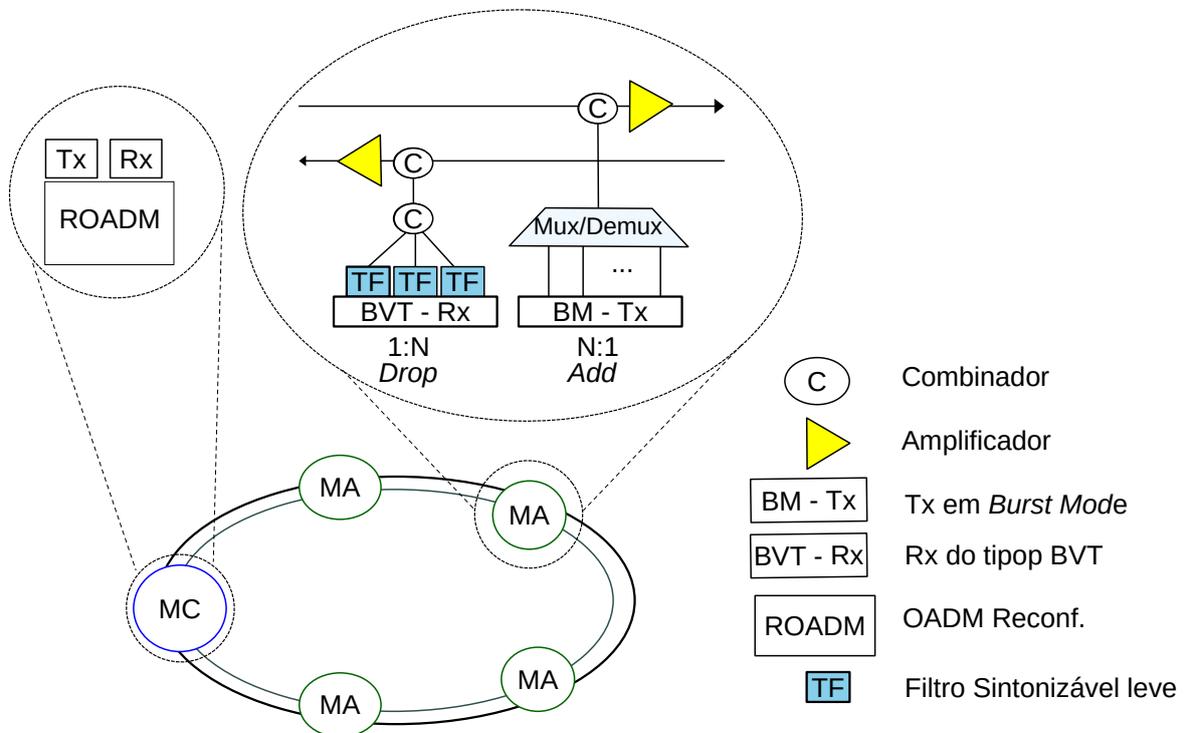


Figura 4.6: Representação da arquitetura DuFiNet.

O MC é um ROADM baseado em WSS, enquanto em cada MA há acopladores conectando pequenos filtros sintonizáveis (*Tunable Filters* - TF), mux/demux para um tipo de comunicação (DS), amplificadores e *transponders* coerentes, sendo do tipo BVT para recepção, e *Burst Mode* (BM) para transmissão. O *transponder* BM é usado para compartilhamento dinâmico de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (*Time Division Multiple Access* - TDMA). O BVT é um modelo “*lite*” para canais coerentes de 100 GHz. Nesta arquitetura, não há conectividade direta entre os nós MA. Em vez disso, para que ocorra a comunicação entre dois MAs, o tráfego no destino é adicionado em um canal específico na direção US, concentrado no nó MC e, em seguida, encaminhado no DS para o MA de destino.

No nó MC, existem dois modos de operação, opaco e transparente. No modo opaco, os canais são terminados no MC e são regenerados e agregados antes de serem encaminhados para o rastreamento do núcleo ou fibra DS. A DuFiNet é facilmente escalável porque tolera a adição de novos anéis MA aproveitando e compartilhando a infraestrutura do nó MC. Neste caso, quando uma rede metropolitana é formada por mais de um anel DuFiNet, esta rede metropolitana torna-se uma rede sem filtro devido ao compartilhamento do nó por todas os anéis DuFiNets definidos na nova na composição baseada em múltiplos anéis.

As principais vantagens da implantação da DuFiNet são o baixo custo de implantação e operação dos nós sem filtro e a facilidade de atualização da infraestrutura com a adição de novos equipamentos. No entanto, os efeitos da degradação do sinal podem ser vistos, o que é típico de ecossistemas de rede não filtrados. A principal semelhança entre DuFiNet e a arquitetura FMN (Subseção 4.2.1) é que ambas concentram-se nos segmentos MC e MA e são multibanda. No entanto, enquanto o FMN possui uma topologia em ferradura e opera nas bandas C e L, a DuFiNet possui uma topologia em anel e pode transmitir nas bandas C, O, E, S e L.

Vantagens

A arquitetura DuFiNet é uma solução de baixo custo para média distância. É baseado em um modo de transporte transparente e opaco e é uma solução multibanda viável para comunicação em uma grande parte do espectro óptico (muito além da banda C). Embora não possua filtros de nó intermediários, o desempenho do sinal é mantido dentro dos limites esperados para uma situação onde utiliza-se os TF *lite*.

Desvantagens

Embora seja uma arquitetura não filtrada baseada em PON, a DuFiNet implementa modos de comunicação opacos e fornece canais de no máximo 100 GHz. Portanto, é necessária uma análise cuidadosa de custo-desempenho em relação ao consumo potencial de energia

devido ao aumento do tráfego. Além disso, a tecnologia BM é uma solução específica para DuFiNet que outras soluções FL ou WSON não podem suportar e pode implicar na aquisição de novos equipamentos para implementação da arquitetura.

Aplicações

A DuFiNet é viável para interconexões de acesso metropolitano, sendo apropriada para médias distâncias e suportando futuros serviços em 5G. A arquitetura pode ser facilmente dimensionada para aumentar o número de MAs conectados. A Tabela 4.2 mostra um resumo dos destaques da arquitetura DuFiNet.

4.3 Rede Óptica Semi Filtrada/Semi Sem Filtro

Sabendo que as arquiteturas sem filtro (FL) são particularmente adequadas para cenários de rede metropolitana de complexidade topológica limitada, sem recirculação de energia óptica [67], e dado que arquiteturas totalmente filtradas (WSON) são economicamente custosas, as arquiteturas semi sem filtro (*Semi-Filterless* - sFL) podem representar o *trade-off* entre alcance, complexidade da infraestrutura e custos relacionados.

Duas definições diferentes para redes ópticas sFL são encontradas na literatura: (i) redes *sFL* são redes compostas pela combinação de redes WSON e FL. Assim, alguns nós não possuem filtro, enquanto outros são equipados com filtro. Por esta razão, a arquitetura de rede óptica com estas características também é chamada de arquitetura heterogênea [87]; (ii) redes sFL são redes em que todos os nós de tráfego possuem um filtro óptico ajustável (*Optical Filter* - OF) integrado à interface do receptor, com baixo custo, capacidade e complexidade. Devido à sua simplicidade, um nó com OF não pode ser comparado a um nó completo baseado em AWG ou WSS, por exemplo, devido às diferenças de operação [178]. De acordo com este conceito, uma rede sFL tem melhor desempenho em *Bit Error Ratio* (BER) em comparação com redes FL, garantindo ainda uma relação custo-benefício adequada.

As arquiteturas identificadas de acordo com tais definições serão destacadas à seguir, sendo que para a definição (i) apresenta-se a arquitetura *Metro-Haul* (subseção 4.3.1) e para a definição (ii) discorre-se sobre a arquitetura *Drop-and-Waste (DnW)* (subseção 4.3.2).

4.3.1 *Metro-Haul*

Uma arquitetura sFL alinhada com a definição (i) é destacada em [87], e é proposta no contexto do projeto MetroHAUL [6], conforme citado pelos autores.

Composição e Funcionamento

A arquitetura Metro-Haul, baseada em um sistema de transmissão EON, é apresentada como uma solução flexível para atender aos requisitos das redes metropolitanas para o futuro, garantindo a relação custo-benefício. A arquitetura *Metro-Haul* é mostrada na Figura 4.7. Quatro categorias de nós são observadas nesta arquitetura: *Metro-Core Edge Nodes* (MCEN), *Metro Nodes* (MN), *Access-Metro Edge Node* (AMEN) e *Access Nodes* (AN). Essas categorias são usadas para definir especificamente a função de um nó. Os nós AMENs e MCENs funcionam como mini centro de dados e/ou centro de dados regionais, respectivamente. Enquanto os ANs estão interligados aos AMENs em topologias no formato de árvore, os AMENs estão interligados aos MNs em uma topologia em anel, e estes interligam os MCEN em topologias em malha. Toda a arquitetura implementa *transponders* coerentes. A Figura 4.7 mostra uma configuração de nó na qual o segmento MN é equipado com elementos passivos e não filtrados, enquanto os outros nós MCEN e AMENs são baseados em ROADM. No entanto, outras combinações já foram testadas, como AMENs sem filtro [87].

Vantagens

No estudo que aborda a arquitetura *Metro-Haul* [87], são comparados três cenários diferentes de construção de rede, dois dos quais são parcialmente não filtrados, e um terceiro cenário é FL. A conclusão é que, quanto maior o número de nós do tipo FL, menor o custo dessa arquitetura. Entretanto, uma arquitetura parcialmente não filtrada (sFL) tem melhor desempenho no uso de recursos de espectro do que as arquiteturas FL.

Desvantagens

Segundo os autores [87], em uma rede hierárquica com topologia em malha, o principal problema relacionado à construção da infraestrutura é identificar os locais ideais para acomodar nós com filtros e nós sem filtro. Dependendo do tráfego e da organização da arquitetura da rede, a simples redução no número de WSS implantados pode levar a uma queda no desempenho.

Aplicações

A arquitetura *Metro-Haul* atende a todos os níveis hierárquicos, tornando-se viável para soluções de computação de borda e computação em nuvem, pois proporciona comunicação direta ponta a ponta entre os diversos tipos de nós, com recursos disponíveis em escala. A Tabela 4.2 mostra um resumo dos destaques da arquitetura *Metro-Haul*.

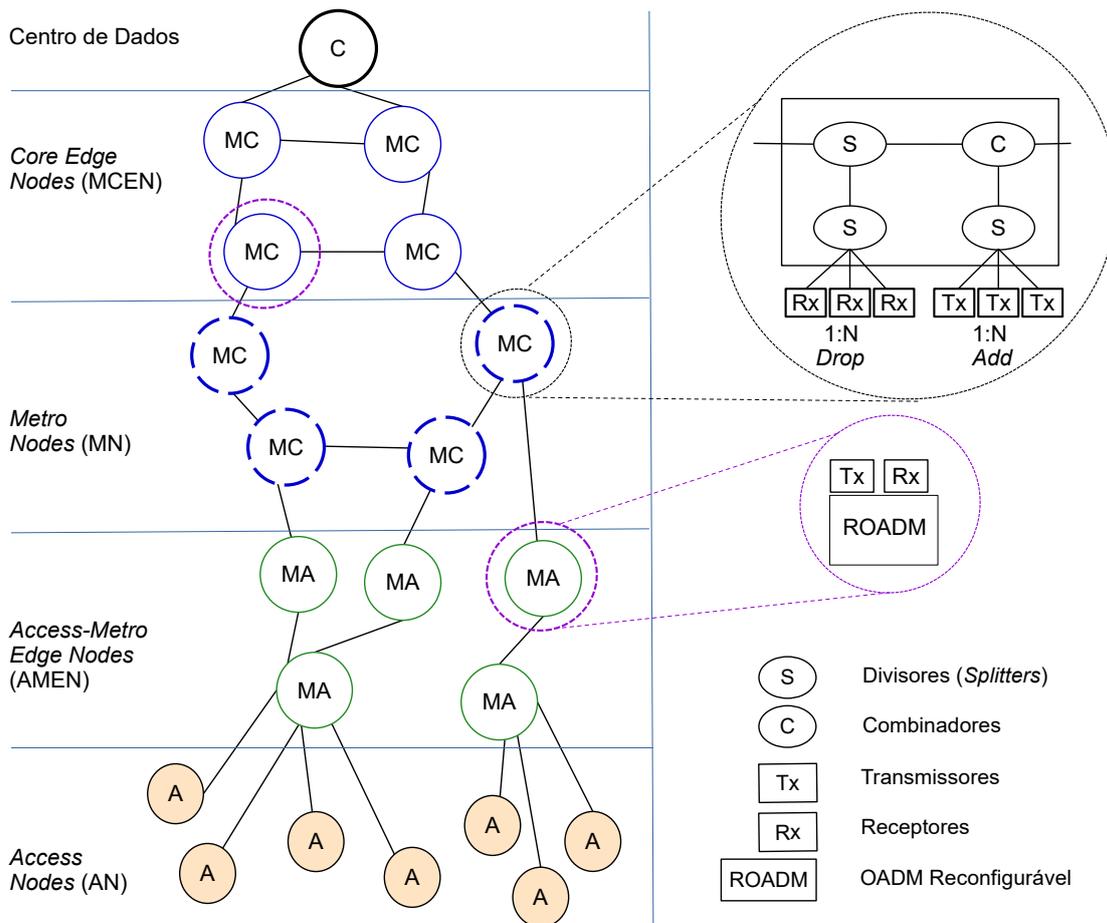


Figura 4.7: Representação da arquitetura sFL *Metro-Haul*.

4.3.2 Drop-and-Waste (DnW)

Em [178] uma arquitetura de rede sFL é apresentada de acordo com a definição (ii), referenciada anteriormente no início da da Seção 4.3.

Composição e Funcionamento

A arquitetura DnW apresentada é baseada na tecnologia de transporte DWDM e possui 80 canais DWDM na banda C com 50 GHz e topologia em ferradura. Um esquema da arquitetura DnW é mostrado na Figura 4.8. Os nós MC são equipados com ROADMs e *transponders* coerentes. Os nós MA são equipados com elementos passivos típicos e os *transponders* coerentes são equipados TF *lite*, o que constitui o diferencial desta arquitetura em comparação com as demais arquiteturas destacadas.

O filtro óptico ajustável (TF) é um dispositivo de baixo custo integrado ao receptor, baseado na tecnologia fotônica de silício sobre isolador (*Silicon-on-Insulator* - SOI) para

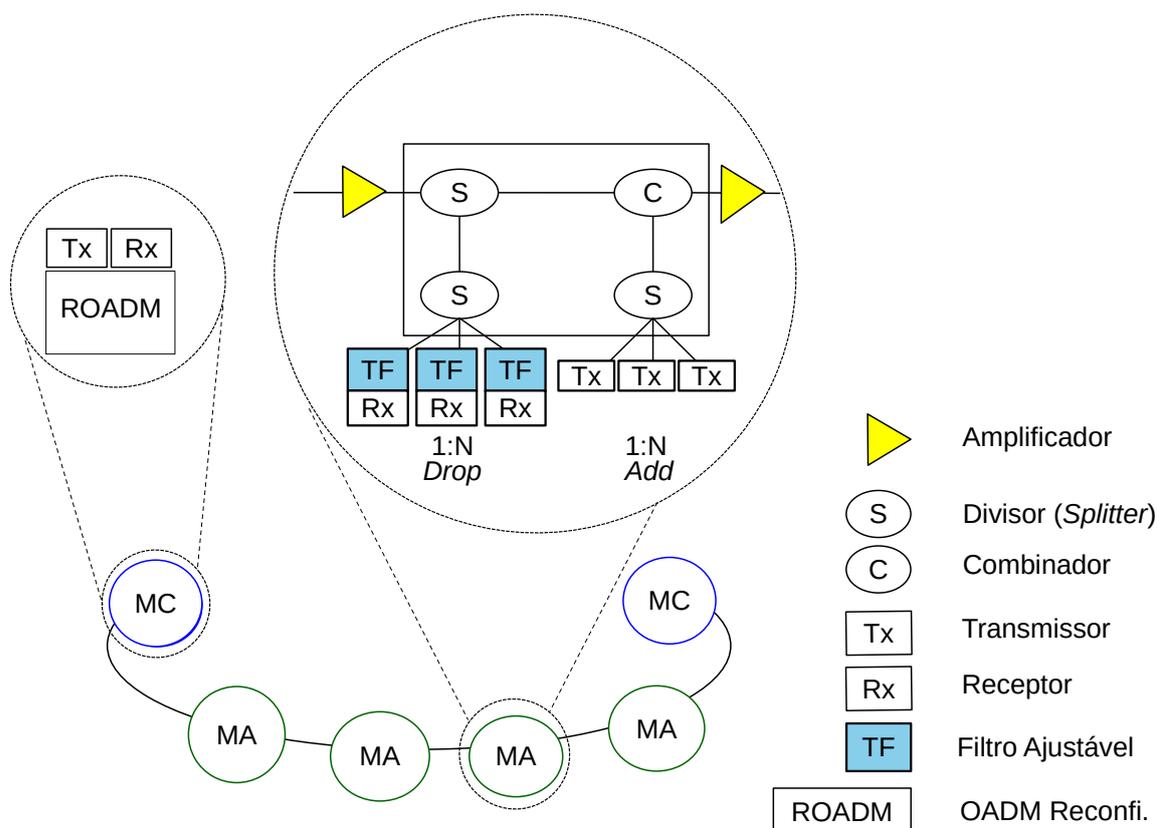


Figura 4.8: Representação da arquitetura sFL denominada DnW.

circuitos integrados, que pode reduzir a intensidade do sinal na recepção, mantendo-o dentro dos limites aceitáveis de restrição para OSNR e BER.

Segundo [178], a taxa de transmissão nesta arquitetura é de 25 Gb/s (com modulação OOK) e 56 Gb/s (com modulação QPSK). No lado receptor, o sinal passa pelo filtro óptico antes de ser detectado pelo receptor coerente. O filtro integrado limita a potência óptica que entra no receptor a uma média de 9 canais em vez de 96 como no caso de nós sem filtro. Este sistema semi filtro prospera em um cenário com até 12 nós adjacentes com o filtro óptico ajustável implantado e um alcance de 80 km, com um alcance máximo de sinal óptico de cerca de 960 km entre as duas extremidades da topologia [75]. Os serviços são conectados ponto a ponto à medida que cada se conecta aos nós MC por meio de comprimentos de onda fixos.

Vantagens

A DnW [178] recebe esse nome devido à arquitetura de seus nós de trânsito. Esses nós possuem um filtro óptico ajustável de baixo custo e baixa potência inserido na interface

Rx, e esse módulo tem pouco impacto no custo total da rede. Desse modo, é possível escalar a arquitetura sem grandes impactos econômicos.

Desvantagens

As restrições de alcance e taxas disponíveis podem não representar um bom compromisso entre custo e desempenho, principalmente no segmento de rede metropolitana composto por muitos nós. Os principais impactos decorrentes dessas questões são a impossibilidade de dimensionar a arquitetura e o potencial risco de desperdício de largura de banda espectral devido a canais largos e fixos, que não atendem às principais demandas da rede metropolitana.

Aplicações

A arquitetura DnW pode atender satisfatoriamente as interconexões dos segmentos MA, sendo uma forma viável e de baixo custo de oferecer serviço para as aplicações atuais. A Tabela 4.2 mostra um resumo dos destaques da arquitetura DnW.

4.4 Visão Geral

Esta subseção apresenta um resumo das características das arquiteturas apresentadas anteriormente nas Subseções 4.1, 4.2 e 4.3. A Tabela 4.2 reúne as vantagens e desvantagens de cada uma das arquiteturas, as principais aplicações na área de telecomunicações, os principais tipos de equipamentos de hardware que compõem a referida arquitetura, o escopo do segmento de rede para o qual foram concebidos, a topologia em que se encontram organizados, bem como o tipo de serviço de comunicação que podem prestar.

Com exceção das arquiteturas SIMON e TDGMON, todas as outras arquiteturas abrangem vários segmentos de rede. O critério em que estas arquiteturas mais se distinguem é o tipo de topologia, sendo que a arquitetura *Metro-Haul* permite um leque mais alargado de topologias de implementação. A seção seguinte apresentará uma análise comparativa mais profunda dessas arquiteturas, abordando outras características dessas redes.

4.5 Análise Comparativa das Arquiteturas

Esta seção lista as arquiteturas de rede e destaca os pontos comuns de análise comparativa. Destaca-se que, a tarefa de comparar as arquiteturas pode apresentar algumas limitações dado que os diversos trabalhos selecionados na literatura podem variar quanto

Tabela 4.2: Principais características das arquiteturas metropolitanas de camada única.

Arquiteturas	Vantagens	Desvantagens	Equipamentos	Topologia	ToS
DWDM	Eficiência em multiplexar um grupo de comprimentos de onda em um mesmo núcleo da fibra.	CAPEX mais alto; Desperdício de largura de banda.	ROADM WDM-Tx	De anel a malha	E2E
MEON	Maior número de canais disponíveis; Transparência.	CAPEX mais alto; Fragmentação espectral.	BV-ROADM CO-BVT	De anel a malha	E2E
SIMON	Suporta computação de borda; Custo reduzido.	Escalabilidade limitada a 100 canais OLT/DWDM.	MD-ROADM OLT ONU	Estrela-em-anel	P2MP
TDGMON	Quatro níveis de proteção contra falhas; Limite de até 512 ONUs.	Requer mais EDFAs implantados nos COs (maior custo).	ROADM AWG EDFA CO-Transponders ONU	Estrela-em-anel	P2MP
FMN	Multibanda; Baixa latência para alguns serviços.	Mais equipamentos precisam ser implantados (aumento do custo).	ROADM FOADM EDFA CO-Transponders Acopladores Splitters	Ferradura de Cavalo	P2P
DuFiNet	Multibanda; Baixo custo; Capacidade de atualização.	Modo Opaque; Somente 100GHz por Ch.	ROADM EDFA CO-Transponders (BVT and BM); Acopladores Mux-Demux	Ring	P2MP
Metro-Haul	Baixo custo; Uso eficiente do espectro.	Requer localização ideal para acomodar os nós; Fragmentação Espectral.	ROADM CO-Transponders Acopladores Splitters	Muitas	E2E
DnW	Baixo custo; Filtro Ajustável <i>lite</i> .	Poucos canais; Grade fixa; Limitação do intervalo de banda.	ROADM CO-Transponders Acopladores Splitters	Ferradura de cavalo	P2P

aos tópicos/critérios elencados e o nível de detalhes apresentados pelos autores. Enquanto é possível reproduzir o número discreto de canais e tipos de equipamentos de algumas arquiteturas, por exemplo, para outras arquiteturas tais informações não foram identificadas nas fontes pesquisadas.

As arquiteturas foram selecionadas com base no estado da arte da literatura sobre redes ópticas metropolitanas, identificando e destacando as soluções dos últimos oito anos, conforme Tabela 4.3. Em seguida, após elencar as principais arquiteturas, foram selecionados os primeiros trabalhos mais completos de cada arquitetura, denominados artigos seminais, embora, para algumas das soluções, haja apenas uma publicação até o momento. Assim, cada arquitetura e seu respectivo *paper* seminal são apresentados na Tabela 4.4, juntamente com a descrição de suas características. Porém, primeiro será discutido o escopo de rede de cada arquitetura, conforme mostra a Figura 4.9.

Na Figura 4.9, observa-se que apenas duas das arquiteturas, DWDM e MEON, não contemplam o segmento metro-acesso, parcela da rede metro que se tornou importante, principalmente devido à necessidade de lidar com serviços de computação de ponta no futuro. Uma possível justificativa é o custo de infraestrutura neste segmento, que costuma

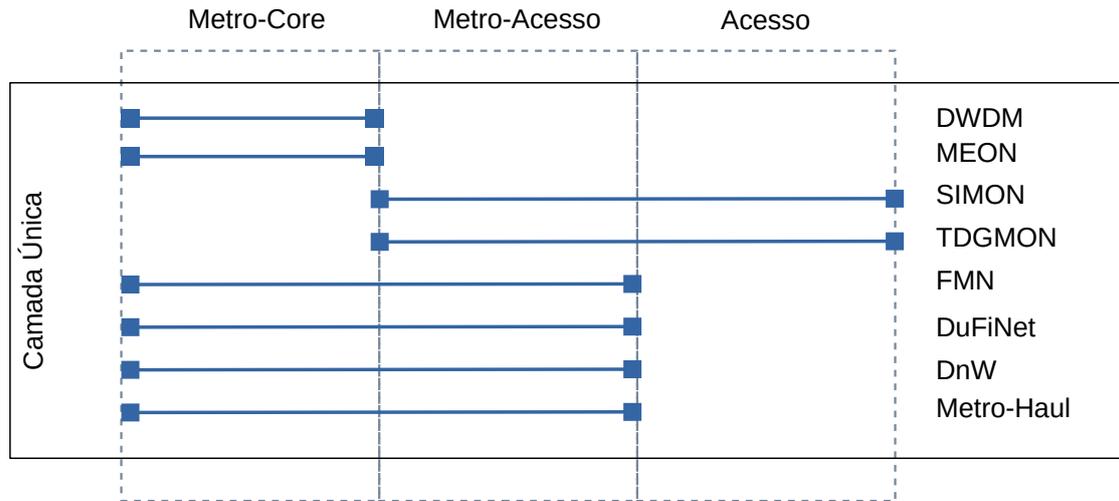


Figura 4.9: Escopo do segmento de rede das arquiteturas destacadas.

ter um grande número de nós e uma alta densidade de conexões para aumentar a capilaridade da comunicação. De forma complementar, as arquiteturas SIMON e TDGMON discutem soluções para redes de acesso localizadas no segmento metro-acesso, tendo como principal característica o baixo custo de implementação. Dessa forma, sugere-se que as arquiteturas para esses segmentos de rede metropolitana possam ser pensadas separadamente e integradas conjuntamente, como demonstrado pelas demais arquiteturas destacadas, FMN, DuFiNet, DnW e *Metro-Haul*. No futuro, arquiteturas metropolitanas de múltiplos segmentos baseadas em DWDM e MEON também podem ser propostas para atender aos requisitos de baixa latência na rede metropolitana de acesso. No entanto, como esses sistemas de transmissão foram concebidos inicialmente para resolver problemas nas redes centrais, aos poucos, houve um movimento no sentido de melhorar as redes metropolitanas.

Embora as redes de acesso não sejam o foco principal deste trabalho, optou-se por incluí-las para mostrar os desenvolvimentos tecnológicos recentes na borda da rede. O estudo dessas arquiteturas combinadas sugere que o segmento de metro-acesso tornou-se mais robusto, com capacidade de armazenamento e processamento, e dessa forma, o segmento de acesso se preparou para explorar essas potencialidades, viabilizando a oferta de novos tipos de computação, serviços de processamento e armazenamento.

Quanto à arquitetura MEON, apresentada no mapeamento por escopo como uma arquitetura concentrada no segmento metro-*core*, é possível esperar soluções mais abrangentes, com visão fim a fim, dado o grande número de publicações mais recentes na literatura comparada com as outras arquiteturas.

Tabela 4.3: Lista de publicações que citam as arquiteturas metro deste capítulo.

Architectures	2013	...	2017	2018	2019	2020	2021	2022
DWDM							[179, 166]	[180, 181]
MEON	[79]		[12]	[56, 5]	[182, 102, 101, 84]	[84, 4]	[183]	[131, 184]
SIMON					[23]			
TDGMON					[3, 185]			
FMN					[10]	[11, 186]	[187]	
DuFiNet				[70]	[39]			
DnW			[178]					
Metro-Haul				[87]		[6, 188]		[139]

A EON [59] é o sistema de transmissão que tem se mostrado ideal para o segmento de redes ópticas metropolitanas do futuro [12]. A DWDM é uma arquitetura consolidada e amplamente disseminada, e pesquisas têm avaliado principalmente custo e desempenho no uso de recursos com técnicas utilizadas para aumentar o número de canais sem limitar o desempenho [180, 181]. Quanto à MEON, esses estudos focaram explicitamente na construção de novos dispositivos ópticos [56], otimização de recursos e engenharia de tráfego [4, 5, 84].

Algumas arquiteturas identificadas na pesquisa e citadas com menor frequência são SIMON e DnW, com trabalhos únicos, TDGMON e DuFiNet, com dois trabalhos, e FMN e *Metro-Haul*, com mais artigos de referência. Como FMN e DuFiNet são ambos sem filtro, a maior parte dos trabalhos discute o aumento da qualidade de transmissão e taxa de dados, mantendo os custos baixos, com até 90% de ganho em comparação com redes ópticas comutadas por comprimento de onda (WSON) [186]. A estratégia de proteção para DuFiNet é discutida em [70] e para FMN em [187]. Em relação à DuFiNet, a proteção é aplicada com duas fibras separadas: uma fibra de trabalho e outra fibra de proteção. Além disso, conexões de serviço com e sem fio são propostas para FMN como estratégias, que podem ter atrasos maiores do que cenários totalmente baseados em fibra.

A DnW e *Metro-Haul* são arquiteturas sFL. No entanto, esta última tem mostrado-se mais promissora, com demonstrações recentes de suas funções de rede virtual de oferta de aplicativos e serviços em uma rede metropolitana ciente de latência [139], uma proposta que evoluiu de [188].

4.5.1 Comparação de Recursos

A Tabela 4.3 mostra os principais trabalhos em destaque que mencionam as arquiteturas apresentadas. Observe que um mesmo trabalho na literatura pode referenciar mais de uma arquitetura, pois tais arquiteturas foram utilizadas como objeto de comparação com a solução proposta. A Tabela 4.4 apresenta uma comparação de recursos entre as principais arquiteturas MAN ópticas destacadas anteriormente. Os aspectos considerados

na comparação refletem um panorama da diversidade tecnológica presente nas propostas arquitetônicas recentes. Foram pesquisadas oito arquiteturas de camada única, sete das quais são consideradas soluções muito recentes, portanto ainda em fase de planejamento e testes. Esta seção apresenta uma breve comparação das arquiteturas considerando a presença ou não de filtros ópticos, o sub-segmento de rede que é abordado pelas arquiteturas, bandas de transmissão, topologias, tipo de comutador óptico e *transponder* mais prevalente, formatos de modulação utilizados, espaçamento da frequência do espectro óptico e o número de canais de transmissão.

Esse movimento permite inferir que todos os segmentos da rede metropolitana serão baseados em infraestrutura totalmente óptica e, como as redes legadas continuam a coexistir, as infraestruturas multicamadas foram otimizadas para alcançar o máximo desempenho. Além disso, essas redes multicamadas também podem atualizar sua camada óptica para obter maior flexibilidade e dinamicidade.

A primeira classificação apresentada está relacionada à presença ou ausência de filtro na camada óptica. Assim, a classificação WSON, FL e sFL, conforme apresentado anteriormente. Esta classificação dá uma ideia geral sobre as questões de tamanho estrutural e custo operacional. Enquanto as redes FL são menos dispendiosas para serem configuradas e operadas, as redes WSON são mais complexas e mais caras devido ao uso generalizado de ROADMs, um dos elementos de rede óptica de maior valor [59]. A baixa densidade de portas significa que são necessários mais elementos de *hardware* como esses para escalar a infraestrutura. No entanto, em redes FL, os caminhos ópticos para transmissão requerem uma boa detecção no destino, pois os sinais são misturados no espectro. Da mesma forma, as redes FL não permitem a reutilização do espectro óptico. Esses problemas não existem nas redes WSON porque os elementos filtrantes agem para deixar passar apenas os sinais que foram estabelecidos, disponibilizando os canais ópticos desde que estejam desocupados. Este problema pode ser atenuado com a utilização de receptores coerentes, mas esta solução, embora tenha menos impacto nos custos [45], incorre num aumento do tempo de processamento do sinal [66].

A maioria das arquiteturas apresentadas são WSON. No entanto, as arquiteturas FL podem ser implantadas em redes metropolitanas em alguns segmentos da rede no futuro, e isso não necessariamente requer a remoção de filtros existentes em redes já em operação. Essa ideia é perceptível através de experimentos com redes sFL, que apontam para um ambiente misto, com ilhas de nós FL no meio dos nós baseados em filtros significativamente presentes. Esses experimentos, mesmo em cenários simbólicos com *testbeds*, já indicam o surgimento de novas demandas, tais como identificar os nós candidatos a operações de substituição ou atualização, para continuar garantindo desempenho e funcionalidade diante das crescentes demandas de tráfego.

Tabela 4.4: Aspectos gerais sobre arquiteturas MAN ópticas. (NM significa Não Mencionado)

Arquitetura	WSON	FL	sFL	Segmento	Banda	Topologia	Sistema de Transmissão	OXC	Transponder	Modulação	Largura de Banda	Canais
DWDM [163]	X			MC	C	Anel Malha	DWDM WDM	AWG WDM-ROADM	WDM-Transponder	x-PSK	50 GHz 100 GHz	80 96
MEON [79]	X			MC	C	Anel Malha	DEON EON	BV-OXC	Coherent BVT	x-QAM	5 GHz 10 GHz	200 100
SIMON [23]	X			MC MA A	C S O	Estrela-em-Anel	WDM	3D-ROADM 4D-ROADM	WDM-Transponder IMDD	OOK	50 GHz 100 GHz	100
TDGMON [3]	X			MA A	NM	Anel e Grade	WDM	AWG-OADM	CWDM SFP	NRZ DPSK	10 GHz	8
FMN [10]		X		MC MA	C L	Ferradura de Cavalo	EON	2D-ROADM (extremidades)	Coherent BVT	QPSK 16-QAM	37.5 GHz	79(C) 109(L)
DuFiNet [70]		X		MC MA	C	Ring	WDM	WSS-ROADM (extremidades)	BVT Coerente IMDD	PM-QPSK PM-16-QAM NRZ 4-PAM	25 GHz 37.5 GHz 50 GHz	133 40 20
DnW [178]			X	MC MA	C	Ferradura de Cavalo	WDM	2D-ROADM	Deteção Coerente	QPSK OOK	50 GHz	80
Metro-Haul [87]			X	MC MA	C	Malha	EON	WSS-ROADM	S-BVT Coerente BVT	DP-QPSK DP-16QAM	12.5 GHz	200

A classificação das arquiteturas de acordo com o segmento de rede para o qual foram projetadas também reforça a ideia de ambiente misto. Enquanto algumas dessas arquiteturas focam apenas no segmento MC ou no segmento MA, outras arquiteturas contemplam ambos os segmentos de forma fim a fim do ponto de vista da transmissão ou mesmo se estendem para além do ambiente da rede metropolitana. Esta categorização foi ilustrada na Figura 4.9.

A arquitetura DWDM concentrou-se no segmento principal da rede metropolitana. Quando foi planejado e implantado, os volumes de tráfego eram bem menores e os recursos de largura de banda eram suficientes para atender os serviços do segmento de acesso. As mudanças entre essas gerações foram alcançadas, tais como redução de latência e multiplexação de largura de banda. No entanto, com o recente surgimento de tecnologias disruptivas que demonstram novo potencial de negócios, a arquitetura MEON tem sido defendida como uma solução mais promissora, que conta com mecanismos de transporte flexíveis baseados em sistemas coerentes, maior eficiência espectral com alcance mais extenso, além de variados níveis hierárquicos para obter graus variados de agregação de dados. Essa arquitetura é viável para atender a rede 5G e seus serviços, pois permite que os recursos de TI sejam facilmente movidos do núcleo para a borda da rede. Por sua vez, as arquiteturas FMN, DuFiNet e DnW, que enfrentam problemas de faixa de transmissão e limitações de qualidade, representam soluções de baixo custo e eficiência para serem implementadas em conjunto com as demais.

Duas arquiteturas FL foram apresentadas: FMN e DuFiNet. Enquanto a FMN é a solução FL de grade flexível, a DuFiNet é a solução FL de grade fixa. Devido a essa natureza, a FMN tende a ser mais custosa, oferecendo maior flexibilidade no uso de bandas coerentes de transmissão e transponder. Portanto, a DuFiNet pode ser a alternativa para o provedor de rede ao adotar a solução FL de menor custo. No entanto, o desempenho pode ser restrito devido a limitações relacionadas à camada física e qualidade de transmissão.

Comparando a arquitetura FL FMN e a arquitetura sFL-DnW, observa-se que ambas compartilham muitas características em comum, como a topologia, o escopo da rede (MC/MA), o tipo de OXC usado e o uso de transmissores coerentes. No entanto, DnW é uma grade fixa com canais mais granulares do que FMN, resultando em um número muito menor de canais disponíveis. Entre esses dois, a operadora tende a optar por DnW se o desempenho não for o fator mais crítico, e o objetivo é implementar uma rede de comutação de tráfego com menor custo.

As arquiteturas destinadas a solucionar problemas com foco no segmento MC, tem preferência pela banda C devido a sua propriedade de baixa perda de transmissão. No entanto, como forma de aumentar a capacidade oferecendo um número mais significativo de canais, considera-se expandir a exploração do espectro óptico para incluir a banda L, conforme proposto na arquitetura FMN [10]. Projetos de expansão de bandas de transmissão geralmente requerem a compra de equipamentos extras, como amplificadores, acopladores e divisores específicos para determinadas bandas, por exemplo, o que também pode representar um aumento no gasto de energia com a expansão da infraestrutura. Para tentar manter baixo o custo de atualização das redes nesse sentido, novos equipamentos complexos e de baixo custo podem ser implementados, mas o desempenho da rede pode ser impactado devido ao menor alcance e maior figura de ruído. Como esses problemas não são tão pronunciados em redes de acesso ópticas devido às distâncias mais curtas do segmento, provavelmente é por isso que arquiteturas com foco no segmento MA e em redes de acesso, como SIMON, TDGMON e FMN, são as que estão considerando a abordagem de expandir a banda de transmissão.

É possível conjecturar que as arquiteturas que consideram expansão da banda de transmissão além da banda C também preveem as maiores granularidades de canais, que são em menor número quando comparadas com as demais arquiteturas. Como o principal objetivo a ser alcançado com o aumento do número de bandas utilizadas é aumentar a disponibilidade de recursos para transmissão, esta questão abre espaço para mais questionamentos quando se verifica que um grande número de canais também pode ser obtido na mesma banda C com o uso de tecnologias de transmissão de rede flexível. A discussão sobre o uso da banda L em arquiteturas DWDM e EON para melhorar a capacidade dessas redes apresenta uma série de fatores que precisam ser considerados. Um deles é que, além de utilizar amplificadores apropriados para a banda C, serão adicionados novos amplificadores para a banda L. Mesmo com estudos mostrando que, na banda L, o alcance do sinal pode ser mais extenso, o problema de atenuação e equalização do sinal pode exigir um número mais significativo desses dispositivos em diferentes comprimentos de fibra, resultando em um custo maior para a implementação desta estratégia. Devido a isso, os diferentes locais para posicionamento desses amplificadores de banda L inter-

calados com amplificadores de banda C foram estudados no EON [189]. No entanto, o sistema é baseado em transmissores de detecção direta, necessitando de modulação de sinal externa. Embora as arquiteturas DWDM também sofram do mesmo problema, pode não ser suficiente considerar as bandas C+S porque essas arquiteturas tendem a atingir o limite de capacidade mais rapidamente nessa arquitetura. Portanto, para o operador de rede que deseja manter os custos baixos, o DWDM multibanda pode ser o caminho a seguir, mesmo que esses limites precisem ser estendidos além das bandas C+L [190].

Além disso, porém, é necessário investigar conjuntamente outros tópicos relacionados ao CAPEX/OPEX e à maturidade da tecnologia utilizada, pois aumentar o número de canais com menor granularidade também implica na implementação de elementos ópticos com sintonização mais fina no ajuste da largura de banda, para a qual existe uma limitação tecnológica.

Quanto à largura de banda do canal e ao número de canais disponíveis, há uma grande variedade com maior prevalência dos já padronizados 50 GHz e 12,5 GHz, além de novas possibilidades ultra-estreitas como 5 GHz. Bandas de canais maiores, como as que já são utilizadas hoje, sofrem com a ineficiência de uso porque as taxas de dados praticadas nos segmentos metropolitano e de acesso são relativamente pequenas. Nesse sentido, técnicas de agregação de tráfego são utilizadas para melhor aproveitamento do recurso disponível, o que comumente é feito na camada eletrônica. O problema é que, ao mesmo tempo, essa estratégia pode impactar aplicações sensíveis ao tempo, levando a um aumento do número de níveis segmentados na rede metropolitana, com camadas específicas para agregar e distribuir o tráfego. Com redes 5G, que exigirão baixíssima latência, estão em desenvolvimento as interfaces *5G New Radio* para o *fronthaul* [40] para definir largura de banda de canal de no máximo 6 GHz para conectar a *Cloud Radio Access Network* (C-RAN) com uma rede óptica. MEON, com abordagem DEON, são arquiteturas que prometem equipamentos ajustados para trabalhar com uma grade flexível de pequena granularidade e podem ser a solução para atender às novas demandas de serviço das redes móveis, garantindo o uso eficiente do espectro.

4.5.2 Temas de Pesquisa por Arquitetura

A Tabela 4.5 mostra uma classificação dos principais focos de pesquisa na literatura mais recente identificada para cada tipo de arquitetura destacada. A identificação desses temas mostra as principais lacunas que necessitam de estudos mais aprofundados e os pontos em comum com propostas que podem ser aplicadas a mais de uma arquitetura em questão. Os focos de pesquisa vão desde a proposição de novos elementos físicos da infraestrutura de *hardware*, desempenho da rede, planejamento, controle e gerenciamento, o que é bastante comum quando novas arquiteturas de rede são propostas. Além disso, outro aspecto

Tabela 4.5: Principais tópicos abordados na literatura para cada arquitetura.

Arquiteturas	Infraestrutura de <i>Hardware</i>	Engenharia de Tráfego	Custo	Desempenho	Proteção	Gerenciamento e Controle
DWDM	[181]			[180]	[179, 166]	
MEON	[26, 56]	[5, 102, 4, 38]	[84, 183]	[172, 66, 95, 144, 182, 175]		[141]
SIMON				[23]		
TDGMON				[3, 187]		
FMN				[191]	[88]	
DuFiNet					[88]	
DnW	[67]					
Metro-Haul	[65]	[188, 132, 140, 7, 139]	[29]		[159]	

mencionado diz respeito à engenharia de tráfego, baseada principalmente nos novos padrões de tráfego identificados nas redes metropolitanas. Por fim, vale ressaltar que alguns problemas investigados são agnósticos das arquiteturas característicos de um determinado sistema de transmissão. Assim, a maioria dos trabalhos considera redes metropolitanas com um sistema de transmissão EON e DEON, como a arquitetura MEON. Entretanto, arquiteturas com transmissão WDM continuarão sendo uma realidade, e pesquisas apontam propostas para otimização de desempenho.

Muitos dos *insights* de pesquisa sobre a arquitetura *Metro-Haul* (arquitetura do projeto *Metro-Haul*) podem ser direcionados para as arquiteturas FL e sFL, o que é possível porque a *Metro-Haul* abrange tais subtipos, conforme mencionado na Subseção 4.3. Como exemplo, em [29] é realizado um estudo de viabilidade econômica em redes FL para decidir sobre a implementação de um plano de controle que garanta operações dinâmicas ou a implementação de novos nós de filtro. Nesse sentido, são realizados experimentos com várias configurações de cenários que percorrem esses tipos de arquitetura e consideram o número de diferentes equipamentos implantados e as flutuações de tráfego na rede metropolitana.

Como visto na quarta coluna da tabela, poucos estudos analisaram o custo, demonstrando uma lacuna significativa para pesquisas futuras, uma vez que a maioria dessas propostas arquitetônicas são muito recentes. Segmentos não totalmente explorados também são identificados. Por exemplo, apresenta-se apenas a descrição das infraestruturas necessárias e suficientes para as arquiteturas no segmento metro-acesso, ou seja, a parte do metro com as distâncias mais curtas, como as do tipo FL e, também SIMON e TDGMON em seus respectivos artigos seminais, referenciados na Tabela 4.4. Para esses ecossistemas, algumas abordagens genéricas de análise do sinal óptico [88] podem ser relevantes para melhorar o desempenho da transmissão onde não há filtro óptico, identificando, por exemplo, casos de sobreposição de sinal e como métrica para implementação de mecanismos de proteção de caminho. No entanto, também é necessário aprofundar a pesquisa neste campo mais especificamente para cada arquitetura.

Por fim, nota-se que, como há mais propostas novas para redes de camada única, a

maioria das abordagens apresentadas é baseada no *testbed*, portanto os estudos posteriores provavelmente expandirão os ecossistemas de teste para topologias muito maiores.

Diante de um cenário evolutivo com muitas alternativas de arquiteturas MAN ópticas a serem projetadas e implementadas gradativamente, e através das tendências centrais e irrefutáveis para o negócio metroviário, existe uma real necessidade de investigar e conhecer melhor todas as soluções disponíveis por serem muito recentes. Além disso, como esperado, as redes metropolitanas serão o ponto de convergência entre diversas tecnologias, como redes 5G, fibra ótica doméstica, indústria 4.0, IoT e diferentes níveis de processamento distribuído e pontos de armazenamento, como data centers de ponta [12]. Como direcionamento inicial, são discutidas a seguir as principais oportunidades de pesquisa que demandam maior necessidade de desenvolvimento, organizadas por arquitetura.

Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda (DWDM)

Como o novo OXC proposto em [65] é praticamente imune às condições de tráfego em qualquer ponto da rede, é necessário testar o impacto da implantação deste equipamento em diferentes arquiteturas de rede. Também é necessário investigar outros equipamentos de baixo custo para realizar atualizações combinadas de infraestrutura nos diversos segmentos metropolitanos.

A qualidade de transmissão é investigada para um sistema SDM modular proposto em [47]. Além disso, espera-se uma investigação mais aprofundada dos problemas de custos, capacidade e escalabilidade.

O estudo em [52] demonstra que o paradigma de desagregação não é viável para pequenas redes com poucos nós em termos de custos. No entanto, não há respostas para os casos em que são considerados ambientes específicos, por exemplo, alguns segmentos da rede metropolitana (metro-core, metro-agregação, metro-acesso), e quais deles podem se beneficiar mais da desagregação total ou parcial.

Um *testbed* com SBVTs programáveis (habilitados para SDN) em uma rede desagregada é apresentado em [80]. Além disso, são necessárias investigações sobre problemas de escalabilidade de infraestrutura e impactos relacionados a custos e consumo de energia.

Rede Metropolitana sem Filtro (FMN)

Em relação às estratégias de atualização de redes sem filtro para incluir outras bandas de transmissão [10], há espaço para investigar CAPEX e OPEX em cenários reais de tráfego e requisitos de capacidade, uma vez que o foco deste trabalho está na qualidade da transmissão multibanda.

Rede Óptica Metro-Acesso à Grade Tridimensional (TDGMON)

A arquitetura tridimensional apresentada em [3] para a rede metro-acesso é analisada do ponto de vista da escalabilidade do número de ONUs e da qualidade de transmissão. Mais investigações sobre as questões de custo e taxas de transmissão mais altas são necessárias para atender aos requisitos de tecnologias como computação de borda e 5G.

Metro-Haul

Além da demonstração de casos de uso de alocação de recursos para aplicativos de vídeo com requisitos de alto desempenho [188], investigações são necessárias para explorar outros tipos de serviços de tráfego, levando em consideração os padrões de tráfego de maré para soluções mais precisas.

Rede Óptica Metro Elástica (MEON)

Devido à maior atenção que a arquitetura MEON tem recebido desde a introdução da abordagem de rede flexível para redes centrais, o roteiro para as próximas frentes de pesquisa relacionadas a essa tecnologia está mais bem definido. As principais questões em aberto identificadas são as apresentadas a seguir.

- A alocação dinâmica com taxas adaptativas na arquitetura MEON melhora o uso do espectro [102]. No entanto, mais investigações são necessárias considerando uma maior variação de tipos e parâmetros de perfil de tráfego para minimizar a latência do serviço e aumentar a taxa de transferência.
- O modelo para moldar o tráfego para melhorar a alocação de recursos e reduzir o consumo de energia considera as interações da camada física para minimizar a quantidade de tempo médio de consumo de energia total do *transponder* em [84]. Outros elementos (OXC, amplificadores, entre outros) da rede óptica também podem ser incluídos na análise para futuras pesquisas.
- Além da solução RSA para alocação de recursos com um modelo de variação de tráfego, que é ciente da área (*area-aware*) baseado no tráfego de rede móvel [4], há espaço para expandir a solução para incluir algoritmos RMLSA e explorar outros tráfegos baseados em métodos de previsão com inteligência artificial.

Essas questões são de grande complexidade principalmente por envolverem diferentes segmentos, com configurações multicamadas abrangendo diversos domínios de aplicação e representando um custo de investimento vital. As operadoras de rede precisarão escalar os segmentos da rede metropolitana rapidamente, à medida que os serviços começarem a

ser implantados, e escolher diferentes critérios para a tomada de decisão a esse respeito, tanto sobre quais requisitos são prioritários para o desempenho dos negócios quanto sobre os períodos e locais de maior necessidade. Mesmo a borda da rede no segmento MA terá que se expandir para suportar os fluxos desses serviços e, portanto, precisará ser pensada em conjunto com os segmentos subjacentes.

MAN Óptica

Existe uma extensa lacuna de pesquisa na análise de padrões de tráfego em redes metropolitanas ópticas. Como se viu, com o surgimento de novos serviços aliados à dinâmica populacional das cidades e mudanças na distribuição do tráfego, muitas vezes pode haver um desequilíbrio na utilização dos recursos disponíveis na rede uma vez que esse ecossistema é baseado em elementos com grande diferenças de desempenho. Com isso, há a possibilidade de novos redesenhos e distribuição do tráfego para além do fenômeno do tráfego de marés. No mesmo ritmo, espera-se que as soluções online reajam na direção do tempo e se adaptem às condições da rede. Considere como exemplo atípico o enorme impacto que a Pandemia do COVID-19 teve no perfil do tráfego das grandes cidades.

A implantação de redes móveis 5G dependerá dos recursos que as arquiteturas de redes ópticas podem oferecer. Afinal, a fibra ainda é o veículo mais rápido para o transporte de dados. Os provedores e operadoras de serviços 5G decidirão sobre os custos e estratégias adequados para aproveitar e otimizar a infraestrutura existente ou, por outro lado, investir na implementação de um novo ambiente com fácil integração e operações simplificadas. Isso não é apenas uma questão da indústria, pois a tendência de convergência de infraestrutura e compartilhamento de recursos, como nas redes *backbone*, levará ao debate sobre segurança, sobrevivência e mistura de tecnologias de várias gerações, entre outras questões. Por exemplo, as fibras de primeira geração não serão retiradas dos dutos da infraestrutura, mas funcionarão em conjunto com novas versões, como as fibras multinucleadas. Também é importante mencionar que não existe uma arquitetura ideal, pois a escolha de uma solução depende muito das aplicações e segmentos de negócios dos provedores.

4.6 Resumo Conclusivo do Capítulo

O surgimento de novos paradigmas computacionais, como computação de borda e IoT, e a proliferação de novas tecnologias de acesso, como PON e 5G, têm deslocado a carga de tráfego para mais perto das metrópoles, pressionando a infraestrutura de redes ópticas metropolitanas.

As pesquisas recentes na literatura propõem várias soluções de engenharia de tráfego para redes ópticas, mas sem levar em conta as características da arquitetura de rede subjacente.

Por outro lado, florescem projetos de implementação de novos nós de borda e, com esse amplo leque de possibilidades, muitas arquiteturas de redes metropolitanas têm sido propostas, principalmente a partir de 2017.

Este Capítulo combina essas propostas arquitetônicas para discutir suas principais características, vantagens e desvantagens. Arquiteturas como MEON [79], SIMON [23], TDGMON [3], FMN [10], DuFiNet [70], DnW [178] e *Metro-Haul* [87], foram pensadas com objetivos e conceitos diferentes, e por serem muito recentes, ainda não estão consolidadas.

Uma análise comparativa entre arquiteturas identifica os tópicos de pesquisa em destaque e suas lacunas e discute tendências futuras. Em resumo, o futuro excitante da pesquisa e operação óptica da MAN reside no uso de tecnologias de transmissão elástica em arquiteturas sob medida híbridas abertas, todas controladas por planos de controle inteligentes autônomos.

Capítulo 5

Engenharia de Tráfego nas Redes Ópticas Metropolitanas

Este Capítulo reúne as principais soluções atuais da comunidade científica para o problema RSA voltado para as redes MONs. Inicialmente apresentam-se modelos de tráfego de marés para MONs, na Seção 5.1. Em seguida, na Seção 5.2, destacam-se soluções RSA analisadas e classificadas por tipo de contexto do problema para facilitar a compreensão. Primeiramente são elencadas as soluções RSA agnósticas de informações das áreas e do tráfego, na Subseção 5.2.1. Na Subseção 5.2.2 discorre-se especialmente sobre os trabalhos que abordam soluções de roteamento cientes da área, objeto principal desta Tese, a qual aborda a utilização dos modelos mostrados em Seção 5.1. Na sequência, a Seção 5.3 apresenta algumas caracterizações de classes, padrões e perfis de tráfego da literatura que são utilizados como entrada para o problema do tráfego de marés no roteamento ciente da área. A Seção 5.4 discorre sobre as principais caracterizações de áreas e *clusters* referenciados na literatura para o estudo do tráfego de marés. Por fim, a Seção 5.5 resume os principais achados destacados neste Capítulo.

5.1 Tráfego de Marés

Considerando o contínuo aumento de demandas presenciados nas redes metro e os recentes progressos com a EON, a melhoria do desempenho perpassa ainda pela exploração de eficientes mecanismos de engenharia de tráfego. Neste sentido, é de grande relevância a compreensão das características do tráfego para melhor utilizar os recursos disponíveis na rede. Esta seção discute o comportamento do tráfego na metro ante a distribuição desigual ao longo dos recursos e apresenta o conceito de tráfego de marés, que caracteriza essa desigualdade.

O tráfego de marés (do inglês *tidal-traffic*) é o fenômeno de distribuição dinâmica e desigual do tráfego ao longo do domínio do espaço e do tempo [5, 35, 192]. Nessa distribuição, que pode ocorrer como ondas, os picos e vales de volume de tráfego são o efeito direto da desigualdade que ocorre na disseminação do tráfego em uma rede. Com o crescimento das cidades e a formação de grandes metrópoles, o processo de urbanização gerou ilhas de concentração populacional em algumas áreas e em determinados horários do dia. Some-se a isso a popularização do uso de aplicações de computação em nuvem e redes móveis, entre outras tecnologias, que tem aumentando o fluxo de dados nessas concentrações populacionais [192]. Este cenário representa uma ameaça ao desempenho da rede de transporte, especialmente no que se refere a operação e/ou gerenciamento, aumentando os desafios para os provedores de rede relacionados à dinamicidade do tráfego.

Como o comportamento do tráfego está associado com o comportamento humano, caracteriza-se a dimensão espacial como forma de destacar a variedade de espaços existentes e como estes espaços diferem entre si. O espaço compreende as áreas habitadas pelas pessoas e nas quais a infraestrutura da rede está implantada. O avanço da urbanização redefiniu áreas funcionais nas cidades e metrópoles em geral, tais como [4]:

- Área de Negócios (*Office Area (OA)* ou *Business Area (BA)*) [4, 183]: onde as pessoas trabalham em horário de trabalho.
- Área residencial (*Residential Area (RA)*) [4, 183]: onde as pessoas vivem.
- Área Abrangente/Intermediária (*Comprehensive Area (CA)*) [4, 183]: que não pode ser classificada em área de escritório e área de residência. Este tipo de área inclui desde zonas de transporte, onde funciona metrô, a área de entretenimento, onde as pessoas praticam atividades de desporto e lazer.
- Área Educacional (EA) [193]: áreas funcionais onde prevalece a presença de instituições de pesquisa e educação, com público fixo e previsível.
- Áreas Históricas/cênicas (AH) [193]: locais visitados pelas pessoas durante algumas horas do dia, com forte propensão a apresentar picos de concentração de pessoas por curto período de tempos, geralmente algumas horas.

A Figura 5.1 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 residências (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 (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 (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 [4] e [183]. Outras topologias de rede metropolitana com tais divisões de áreas podem ser encontradas em [5, 35].

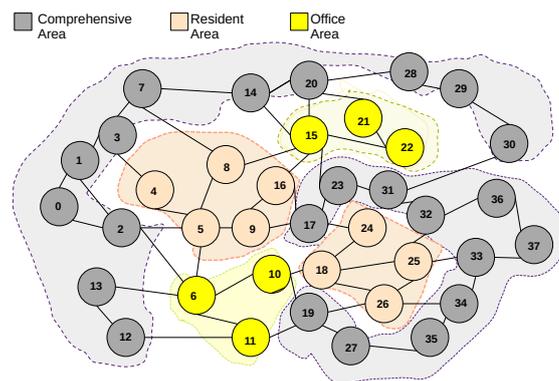


Figura 5.1: Demonstração da variedade de áreas/distritos na cidade de Xangai [4]

Entretanto, o mapeamento e caracterização desses espaços por onde o tráfego deve ser roteado, não representa um desafio apenas na perspectiva das grandes metrópoles. Grandes operadores de redes de telecomunicação como *British Telecom*, *Telecom Italia* e *Telefonica* têm a necessidade de qualificar também espaços geográficos em um conjunto discreto de geotipos, os quais são, rural, suburbano, urbano e urbano denso [6]. Como critério, são considerados dados sobre a densidade de domicílios e densidade de estação base móvel, as distâncias médias entre os respectivos domicílios, o número de linhas de negócios em razão do número de residências, entre outros atributos, conforme mostra a Tabela 5.1. Observa-se que, progressivamente, o número de residências vai aumentando dentro da mesma proporção de área, conseqüentemente aumentando o número de linhas de assinaturas residenciais.

Tabela 5.1: Atributos dos Geotipos de Áreas Geográficas, adaptado de [6]

Geotipo	Área (km^2)	Residências por km^2	Compartilhamento de Linhas de Negócios
Rural	50 - 200+	28 - 133	0.1%
Suburbano	13 - 75	120- 1033	1%
Urbano	5 - 21	500 - 4000	5%
Urbano Denso	1 - 5	3500 - 5500	10%

Com base nessas informações é possível mensurar a infraestrutura necessária adequada (distância das fibras, requisitos de desempenho dos canais ópticos, especificações de *transponders* e limites de perdas do sinal óptico). Os geotipos também definem o volume bruto, o tipo de tráfego por nó que é esperado, bem como características de conteúdo (por exemplo, conteúdos de vídeo que são distribuídos na rede de acordo com a popularidade) [188].

A caracterização do espaço geográfico em áreas ou em geotipos embasam as investigações sobre as variações dos fluxo de tráfego de acordo com o comportamento das pessoas. Com isso, os operadores definem diferentes escopos de tráfego sobre os quais projetam-se novas técnicas de engenharia de tráfego. Neste sentido, são considerados dois escopos de tráfego para análise: macro e micro. No escopo de tráfego macro, leva-se em consideração o volume de tráfego de fundo da rede, gerado por usuários dos serviços de massa, e que é coletado em cada nó, e caracterizado em termos de taxa de dados nos períodos de rede ocupada. No escopo de tráfego micro, explora-se a dimensão granular dos tipos de tráfego (fluxos de vídeo, fluxos de aplicações de *e-commerce*, por exemplo). Após o processo de análise de tráfego, os provedores e projetistas de rede, utilizam os respectivos modelos e caracterizações de tráfego para gerar traços de tráfego sintético, gerando bases de dados sobre o tráfego que possibilitem estudar o comportamento dos fluxos de tráfego em cenários complexos ou com adaptações na infraestrutura de rede [132].

Quanto a dimensão do tempo, na qual pode-se observar, em períodos pontuais, as diversas flutuações de tráfego que ocorrem nas variadas áreas, é sabido que no período de migração das marés, a carga de tráfego apresenta uma grande variação na amplitude, com impacto mais pronunciado na taxa de bloqueio [7]. Mas esse impacto só ocorre em uma pequena parte da rede a cada momento, justamente por causa das variedades de áreas, o que indica que ao mesmo tempo pode haver recurso ocioso próximo às áreas mais afetadas [35]. Embora possam existir pequenas diferenças entre os horários de pico de tráfego e de vale de tráfego de cidade para cidade, é possível extrair um padrão geral dos horários que mais desafiam o desempenho da rede e as classes de tráfego relacionadas. Por exemplo, olhando a partir da perspectiva geográfica, Pequim, Nova York e Londres, de acordo com [5], apresentam picos de tráfego nas OAs e vale nas RAs durante o horário comercial, na janela de $06h-18h$. Já nas janelas de tempo das $18h-24h$ e $0h-06h$, os picos e vales se invertem. A maioria das redes metropolitanas também são impactadas por

tráfego de dados da nuvem, cujos fluxos alcançam o pico de tráfego entre 19h-04h e vale entre 09h-15h [132].

5.1.1 Modelos de Tráfego de Marés para Redes Ópticas Metropolitanas

Conforme visto anteriormente, as janelas de horários ajudam a desenhar o movimento do tráfego de marés ao longo das áreas metropolitanas. Essas informações podem fornecer *insights* para a criação de modelos de geração de tráfego de marés, permitindo estudar e avaliar o desempenho da rede através de simulação, uma vez que dados reais de tráfego são difíceis de serem obtidos.

Para formalizar a geração e distribuição de tráfego nas metros, modelos como o *Onion Tidal Traffic Model (OTTM)* [5] e o *Multi-Step Trigonometric Model (MSTM)* [4] 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. 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.

O modelo OTTM considera uma rede metropolitana com duas áreas apenas, sendo elas OA e RA. A Figura 5.2 mostra um esquema cujos nós em azul pertencem à área comercial e os nós em cinza, à área residencial. Assume-se que a intensidade do tráfego atinge o pico no centro da área comercial e diminui à medida que a distância do pico aumenta. Baseado nisso, a topologia é dividida em vários anéis (nas cores vermelho, verde, laranja e azul), a partir do centro em direção à extremidade, como “casca de cebola” ou um modelo de Torre de Hanói. Dentro de cada anel há uma taxa de chegada de requisições específica. O OTTM contabiliza o tráfego de rede em três grupos: 1) Chegadas de conexão aleatória, 2) Chegadas nos horários de pico na área de negócios, 3) Chegadas nos horários de pico na área residencial.

A carga total de tráfego em um nó na rede metropolitana é a soma do tráfego aleatório estável e do tráfego de pico residencial durante o horário comercial, ou a soma do tráfego aleatório estável e do tráfego de pico comercial no horário comercial. O modelo OTTM é baseado em senos trigonométricos, que têm sido utilizado para modelar tráfego periódico devido ao seu padrão repetitivo. A taxa de chegada ρ nos nós do anel l durante o início (t_s) e final (t_e) do pico é definida no modelo de tráfego de marés OTTM, proposto em [5], que é mostrado na Equação 5.1.

$$\rho_l(t) = \rho_l \left[1 + \text{sen} \left(\frac{2\pi}{t_d} (t - t_s) - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad l \in [1, m], \quad t \in [t_s, t_e]. \quad (5.1)$$

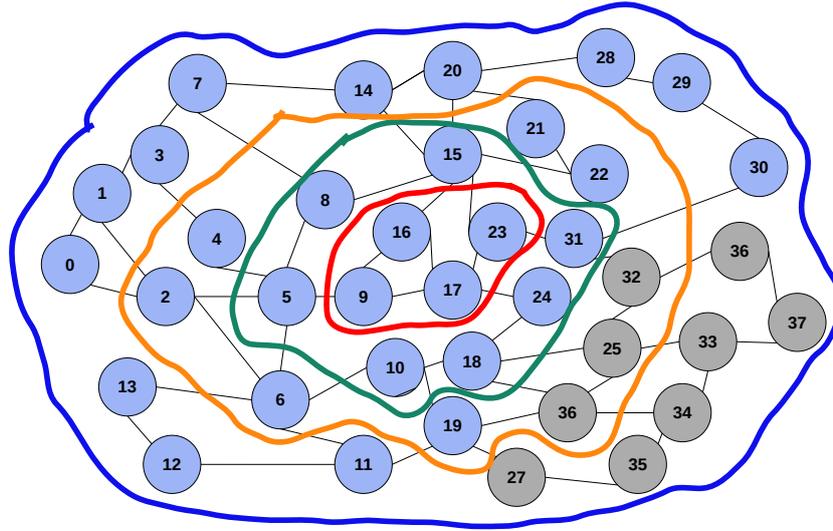


Figura 5.2: Demonstração da divisão da rede em várias partes, similar à Torre de Hanói [5]

As principais limitações do modelo OTTM são a sua aplicabilidade a redes ópticas metropolitanas com apenas dois tipos de áreas, considerando ainda que os picos de tráfego nas áreas são não coincidentes. A suposição de que o volume de tráfego é muito maior no anel central e muito menor no anel da extremidade também é difícil de ser provada. Com base nisso, os mesmo autores propuseram o MSTM, que considera a existência de três áreas, estando elas presentes em dois clusteres, como as apresentadas na Figura 5.1. Inicialmente, o modelo considera quatro períodos de tempo, t_1 , t_2 , t_3 e t_4 , os quais representam mudanças nas seguintes atividades humanas:

- $(t_1, t_2]$: representa o período de tempo em que as pessoas estão indo trabalhar;
- $(t_2, t_3]$: boa parte das pessoas estão trabalhando neste período;
- $(t_3, t_4]$: as pessoas estão saindo de seus empregos e indo para suas áreas residenciais;
- $(t_4, 24h + t_1]$: neste período boa parte das pessoas estão dormindo

O modelo MSTM é mostrado abaixo, onde destaca-se a geração de tráfego na RA (Equação 5.2), OA (Equação 5.3) e CA (Equação 5.4):

$$\rho RA^{(t)} = \begin{cases} \alpha_1 \cdot \sin\left(\frac{t-t_2}{t_2-t_1}\pi - \frac{\pi}{2}\right) + \alpha_1 + \beta, & t \in (t_1, t_2) \\ \alpha_2 \cdot \sin\left(\frac{t-t_2}{t_4-t_2}\pi - \frac{\pi}{2}\right) + 2\alpha_1 + \alpha_2 + \beta, & t \in (t_2, t_4) \\ (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos\left(\frac{t-t_4}{t_1+24-t_4}\pi\right) + \alpha_1 + \alpha_2 + \beta, & t \in (t_4, 24 + t_1) \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\rho OA^{(t)} = \begin{cases} \alpha'_1 + \alpha'_2 \cdot \sin\left(\frac{t-t_1}{t_2-t_1}\pi - \frac{\pi}{2}\right) + \alpha'_1 + \alpha'_2 + \beta', & t \in (t_1, t_2) \\ 2\alpha'_1 + 2\alpha'_2 + \beta', & t \in (t_2, t_3) \\ \alpha'_2 \cdot \cos\left(\frac{t-t_3}{t_4-t_3}\pi\right) + 2\alpha'_1 + \alpha'_2 + \beta', & t \in (t_3, t_4) \\ \alpha'_1 \cdot \cos\left(\frac{t-t_3}{t_1+24-t_4}\pi\right) + 2\alpha'_1 + \beta', & t \in (t_4, 24 + t_1) \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\rho CA^{(t)} = \begin{cases} 2\alpha'' + \beta'', & t \in (t_2, t_4) \\ \alpha'' \cdot \cos\left(\frac{t-t_4}{t_2+24-t_4} \cdot 2\pi\right) + \alpha'' + \beta'', & t \in (t_4 + t_2) \end{cases} \quad (5.4)$$

No modelo acima, os coeficientes dos segmentos trigonométricos α , α' e α'' representam a flutuação do tráfego, e as variáveis de base de linha β , β' e β'' são o referencial para comparação que caracterizam os valores constantes de tráfego em cada período.

Enquanto o modelo OTTM considera que são opostos os momentos com picos de tráfego em cada área, no modelo MSTM há momentos em que tanto o pico quanto o vale podem coincidir em mais de uma área. De acordo com os autores, o modelo descreve um vale de tráfego em todas as áreas durante um período da madrugada, enquanto caracteriza picos de tráfego no período da noite na RA e CA. Ademais, o modelo MSTM foi avaliado com tráfego agregado real referente a algumas estações base 4G de Xangai [4].

A fragilidade dos modelos OTTM e MSTM reside na representação da variabilidade das flutuações de tráfego, que não representam completamente toda a mutabilidade das características desse tráfego. O tráfego no mundo real apresenta alta variabilidade e alto-similaridade, características que são naturalmente difíceis de serem capturadas por alguma distribuição matemática [194].

5.2 Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Metropolitanas

O problema RSA é um problema NP-completo [5], o que significa que, não existem soluções de complexidade polinomial conhecidas para resolver esse problema e, caso seja descoberta uma solução, todos os problemas da classe NP também poderão ser reduzidos. Não havendo, portanto, um horizonte de solução, as soluções heurísticas tem sido amplamente exploradas na literatura.

5.2.1 Algoritmos Agnósticos

Várias soluções RSA tem sido propostas visando redes com arquitetura EON para metro ou MEON [101, 120, 195] e arquitetura UDWSN [59, 196]. Em geral, as soluções agnósticas

concentram-se em determinar a rota e o comprimento de onda ou faixa espectral para atender a demanda, sendo que não levam em consideração qualquer informação adicional para melhorar suas tomadas de decisão. Algumas propostas de soluções agnósticas são destacadas à seguir.

Em [101] os autores apresentam uma estrutura de análise teórica unificada com base em um grafo de conflito para avaliar o desempenho do RSA dinâmico em uma metro com topologia em anel. O grafo de conflito é um grafo auxiliar que registra as interseções entre os caminhos de roteamento calculados pelo RSA, durante diferentes condições de tráfego: distribuição de concentração e distribuição uniforme de tráfego. Na distribuição de concentração o tráfego é gerado em alguns nós de qualquer semi círculo da topologia, enquanto na distribuição uniforme o tráfego é gerado em qualquer nó com probabilidade uniforme. As arestas nesse grafo de conflito representam as incompatibilidades entre os caminhos de roteamento das solicitações de conexão. Na análise, são testadas duas estratégias de aplicação do RSA que distinguem-se pela ordem das operações, as quais são: *i*) roteamento seguido da alocação de espectro (R + SA) e, *ii*) alocação de espectro seguida do roteamento (SA + R). A conclusão obtida é que a estratégia (*i*) contribui mais para a economia de recursos de espectro do que a estratégia (*ii*) na distribuição de tráfego uniforme, enquanto o resultado é inverso na distribuição de tráfego de concentração. A principal limitação do trabalho é que, embora sejam consideradas várias formas de distribuição do tráfego como entrada para o problema, os parâmetros são sintéticos e podem não corresponder aos dados do mundo real. A rede em anel deste trabalho é do tipo WSON, mas trabalhos recentes, como os apresentados à seguir, mostram que a tendência para as redes de topologia mais simples é tornarem-se do tipo FL.

Em [120] é estudado o problema RSA *offline* (estático) em uma metro do tipo FL, com o objetivo de minimizar a utilização geral do espectro em cada enlace da rede. A solução foi comparada com o RWA em várias topologias diferentes. Os resultados do trabalho indicam uma redução na utilização do espectro (de até 35%) em um ambiente de rede com alta carga de tráfego em comparação com o caso de rede fixa. Além disso, observou-se melhorias moderadas no consumo de espectro quando é realizada desfragmentação periódica do espectro. A principal limitação desta proposta é que, como foi considerado um cenário de tráfego uniforme e as redes metros possuem um significativo desbalanceamento na distribuição do tráfego, redução na utilização do espectro pode ser bem menor do que o valor encontrado com os experimentos realizados.

Também considerando uma metro FL, em [195] também apresentam-se duas soluções heurísticas para o problema RSA, sendo uma baseada na solução gulosa de resolver separadamente cada subproblema (roteamento e alocação de espectro) e a outra, baseada em um algoritmo genético. Adicionalmente, uma modelagem ILP *offline* para o referido

problema também é apresentada. As soluções propostas foram comparadas com o RWA. Os autores comparam dois esquemas de seleção de taxa de linha, sendo um deles com o objetivo de (i) maximizar a eficiência de espectro, enquanto o outro esquema visa (ii) minimizar o número de *transponders* em uso. Nos algoritmos comparados, os resultados mostraram que a estratégia *i* atinge uma economia no uso de espectros de até 56%, enquanto que a estratégia *ii* reduziu em um terço o número de *transponders* utilizados. Como a proposta no contexto de grade flexível e foi comparada com uma solução RWA em grade fixa, a limitação do trabalho está na falta de comparações com soluções da mesma natureza.

Em [196] é proposto um RSA resolvido sob diferentes esquemas de desfragmentação de espectro em uma metro com arquitetura UDWSN. Os esquemas de desfragmentação empregados são: (i) desfragmentação de enlaces em lote, liberando e restabelecendo sequencialmente as conexões neste processo, e (ii) desfragmentação mediante bloqueio de largura de banda, liberando conjuntamente e restabelecendo múltiplas conexões quando ocorre um bloqueio. A solução é proposta num cenário híbrido com camada eletrônica formada por OTN, cuja agregação de tráfego é realizada com grafo auxiliar. O objetivo da solução é reduzir a probabilidade de bloqueio de largura de banda na rede. Para as simulações foram comparadas diversas granularidade de largura de banda (5 GHz, 6, 25 GHz, 10 GHz e 12,5 GHz). Ao final, o esquema mais vantajoso testado foi o *ii*, sendo que a granularidade que mais leva ao uso eficiente do espectro foi a de 5 GHz, por melhor acomodar as demandas agregadas da camada OTN.

Os mesmos autores propuseram mais um estudo sobre a UDWSN em [59], no qual investigam o problema da eficiência energética e CAPEX associado ao problema RSA para cada uma das granularidades citadas acima (5 GHz, 6, 25 GHz, 10 GHz e 12,5 GHz). Os resultados demonstram que implantar a UDWSN sem a camada OTN é mais vantajoso em termos de eficiência energética porque elimina a necessidade de conversões OEO. E neste mesmo cenário, sem camada OTN, a granularidade de 5 GHz atinge satisfatoriamente a maior eficiência energética porque no segmento de agregação da UDWSN, sua configuração assimétrica de tráfego reduz significativamente o número de *transponders* usados, dado que um único desses *transponders* pode suportar muitas subportadoras nessa granularidade, reduzindo o consumo de energia em mais de 21%. As principais limitações de [196] e [59], ambos sobre UDWSN, são a falta de análises comparativas com outras arquiteturas flexíveis, bem como uma investigação mais profunda considerando o comportamento da solução em virtude da distribuição desigual do tráfego, característico de redes metro.

Em [87] os autores resolvem o problema RMLSA para acomodar demandas de tráfego em uma metro, sendo do tipo FL, que também é representada como sFL para comparação. O objetivo principal é minimizar a utilização de *slots* de frequência. Uma heurística

é empregada previamente para o estabelecimento de árvores de fibra disjuntas levando em consideração as restrições de "loop" do laser e de conectividade da rede, visto que, em arquiteturas FL não ocorre o reaproveitamento do espectro. Na sequência, a árvore encontrada pela heurística é utilizada como entrada para um ILP que seleciona o formato de modulação para cada demanda de tráfego e aloca as unidades de *slots*. Os resultados indicam que a proposta de arquitetura FL tem custo significativamente menor devido à substituição realizada de dispositivos ativos (ROADM com filtro WSS) por componentes passivos (acopladores e divisores de sinais). Esse custo tende a aumentar no caso da arquitetura sFL, uma vez que esta contém uma proporção da rede baseada em dispositivos ativos. Com relação a eficiência espectral, os valores de máxima utilização de espectro na topologia FL são comparáveis aos da topologia sFL, tendo uma diferença de 15% apenas. Ambas as topologias consomem mais espectro ao atender as requisições do que ocorreria em topologias com filtro (baseadas em WSON). O trabalho mostra que a arquitetura sFL representa o melhor custo-benefício em relação aos outros tipos de arquiteturas candidatas. A principal limitação do trabalho é que a arquitetura sFL considerada é aquela composta de parte FL e parte WSON, enquanto que há outras variedades de redes sFL formada por componentes com filtro do tipo "lite" de capacidade e característica bem reduzida.

Em [38] é apresentada uma estratégia orientada a padrões de alocação de recursos em MEON. Os parâmetros considerados na identificação de padrões são a origem, destino, capacidade, hora de início e duração das requisições. O algoritmo proposto funciona em duas fases, sendo elas *offline*, realizada com a execução de uma formulação ILP do RMLSA, e outra *online*, na qual executa-se uma heurística RSA. A solução aplica duas estratégias de alocação de recursos orientadas por padrão: (i) estratégia exata, que funciona assumindo que as solicitações de tráfego descobertas *offline* e *online* são semelhantes ou apresentam pequenos desvios com relação a matriz de tráfego da época esperada; e (ii) estratégia relativa, quando os desvios com relação a matriz de tráfego são maiores. O resultado do trabalho mostra que ambas as estratégias de alocação de recursos orientada por padrão de alocação superam a abordagem gulosa do RSA. Em relação a taxa de bloqueio, a abordagem *ii* é a que mais se aproxima da solução ótima obtida pelo ILP. A proposta do trabalho é bem sucedida ao considerar características do tráfego na metro, porém, como as distâncias dos enlaces na metro são relativamente pequenas, não há muita necessidade em se adotar diferentes níveis de modulação de acordo com a distância.

Em [102] um RSA dinâmico é empregado para alocação de recursos em uma rede MEON. O algoritmo é auxiliado por um modelo de otimização de *Lyapunov* que resolve o problema de otimização estocástica periodicamente resolvido para criar uma adaptação entre os recursos disponíveis na rede e o estado dinâmico da rede com relação ao tráfego.

A avaliação de desempenho é realizada por meio da verificação da eficiência espectral. A alocação dinâmica realizada pela solução proposta melhora a eficiência espectral em mais de 200% quando aplicada na MEON em comparação com arquiteturas de grade espectral fixa. A principal limitação do trabalho é que não foram realizadas comparações com outras soluções em redes elásticas, e qualquer comparação com soluções em redes de grade fixa podem potencialmente alcançar resultados bem sucedidos.

A Tabela 5.2 apresenta uma comparação entre esses trabalhos que tratam da alocação de recursos em redes ópticas metropolitanas mas são agnósticos com respeito à área. Esses trabalhos, embora grande parte considere a distribuição de tráfego uniforme, representam importantes passos no estudo sobre as demandas de tráfego em redes metropolitanas. Destaca-se que a maioria dos trabalhos analisaram a soluções RSA em topologias no formato malha, sem considerar as especificidades do tráfego da rede metro, conforme destacado na última coluna. As soluções RSA propostas são convencionais de acordo com o que é praticado em redes de núcleo, então as principais estratégias utilizadas como diferenciação é a exploração da agregação de tráfego e a aplicação dessas soluções em redes com arquiteturas e tecnologias diferentes. Neste cenário, o principal objetivo do trabalho foi atingir a minimização na utilização de recursos espectrais. Este levantamento mostra uma predominância da MEON, embora sejam propostas outras arquiteturas diferentes.

Tabela 5.2: Comparação de trabalhos com algoritmos agnósticos da área em redes ópticas metropolitanas.

Trabalho	Roteamento	Arquitetura	Cenário de Tráfego	Tipo de Rede	Grade espectral	Escopo de Rede	Topologia	Problema Alvo/ Objetivo	Distribuição do tráfego	Política para ordenar demandas
H. Wu et al. (2019)[101]	RSA heurístico	EON	Dinâmico	WSON	Flexível	Núcleo	Anel	Minimizar o uso de recursos;	- Distribuição de concentração; - Distribuição uniforme;	Sem especificação
Z. Xu et al. (2015)[120]	RSA heurístico	EON	Estático	FL	Flexível/	Metro	Malha	Minimizar o uso de recursos espectrais;	- Tráfego uniforme e multiperíodo;	LDF HLF MDF
E. Archambault et al. (2016)[195]	ILP para RSA; RSA heurístico; RSA meta-heurístico (baseado em algoritmo genético)	EON	Estático	FL	Flexível/Fixa	Metro	Malha	Maximizar a eficiência espectral; Minimizar o custo do transponder	- Tráfego uniforme e multi período; Tráfego randômico;	Sem especificação
Y. Zhang et al. (2019)[196]	RSA com agregação eletrônica	UDWSN	Dinâmico	Multicamada/WSON	Flexível	Metro	Malha/Anel	Reduzir o bloqueio;	Tráfego uniforme;	Sem especificação
G. Shen et al. (2018)[59]	RSA	UDWSN	Dinâmico	WSON	Flexível	Metro	Malha/Anel	Reduzir o desperdício do uso de slots de frequência do espectro	Tráfego uniforme	Sem especificação
O. Ayoub et al. (2018)[87]	ILP para RMLSA; RMLSA heurístico;	Metro-Haul	Estático	FL; sFL	Flexível	Metro	Malha/Ferradura	Minimizar o uso de recursos espectrais;	Tráfego uniforme	Sem especificação
P. Kokkimos et al. (2019)[88]	ILP para RSA	EON	Dinâmico/Estático	WSON	Flexível	Metro	Malha	Testar a alocação (reserva imediata e reserva avançada) de recursos baseada no padrão semi periódico do tráfego; Minimizar o uso de recursos espectrais; Reduzir bloqueio	Tráfego uniforme e semi período;	Sem especificação
M. Hadi et al. (2019)[102]	RSA	EON	Dinâmicos	WSON	Flexível	Metro	Malha	Minimizar o uso de recursos espectrais; Eficiência espectral	Tráfego uniforme	Sem especificação

5.2.2 Algoritmos Cientes para a Metro

As soluções apresentadas à seguir diferenciam-se das soluções apresentadas na Seção 5.2.1 pelo fato de considerarem diferentes parâmetros da rede na tomada de decisão durante o

atendimento das demandas.

Em [182] é proposto um RSA ciente da qualidade de transmissão (QoT *Aware*-RSA) garantindo OSNR suficiente. A proposta tem o objetivo de posicionar amplificadores ópticos em linha, que são instalados ao longo da fibra, e pré-amplificadores, que são implantados nos nós, de modo que seja utilizada a quantidade mínima desses equipamentos. A metro destacada no artigo é formada por nós do tipo MC e MA e há alguns nós da rede de núcleo que atuam como *gateway*. O algoritmo seleciona o menor caminho (com relação a distância em quilômetros) que tenha o maior OSNR. O resultado mostra que quando assume-se a existência de pré-amplificadores em todos os nós, é possível reduzir o número de amplificadores em linha em até 25%. Além disso, enquanto ocorre uma economia de CAPEX, ainda é necessário uma investigação mais aprofundada em termos de OPEX. A limitação do trabalho é a falta de uma análise mais detalhada sobre as topologias que não requerem tantos amplificadores, uma vez que, em redes metropolitanas as distâncias entre os nós tendem a ser menores.

Em [98] é proposto uma solução otimizada RSA que adicionalmente encontra a configuração ideal de canal de modo que um dado BVT estabeleça um caminho óptico que satisfaça as restrições de OSNR. O estudo investiga estratégias de implantação de caminhos ópticos no contexto do planejamento de MEON multi período, isto é, que seja capaz de atender as previsões de tráfego em algumas janelas de tempo no futuro. A solução proposta é denominada RCSA e são concebidas três formulações diferentes com finalidades distintas, as quais são: (i) minimizar o número de caminhos ópticos estabelecidos; (ii) maximizar a taxa de transferência de dados; (iii) otimizar *ii* tendo *i* como restrição; e (iv) otimizar *i* tendo *ii* como restrição. Dentre as quatro estratégias, a solução *iv* foi a que resultou em maiores ganhos, levando a uma maior eficiência energética, redução no número de caminhos ópticos necessários e sob um menor super provisionamento da taxa de transferência. A solução *iv* é duas vezes melhor do que a solução *iii*. Entretanto, as análises foram feitas considerando o tráfego uniformemente distribuído, o que não ocorre na metro. No caso específico do tráfego da metro, maximizar taxas de transferências irá requerer agregação em pontos específicos da rede.

Já em [144] os autores propõem o *Learning Energy-Saving Algorithm* (LESA), um algoritmo que utiliza Autômatos de Aprendizagem (*Learning Automata* - LA) para minimizar o consumo total de energia enquanto reduz o congestionamento. Trata-se de um RSA adaptativo ciente do congestionamento do tráfego na rede (*Traffic-Aware* - RSA). A solução é aplicada a uma rede metro híbrida IP sobre EON. O LESA monitora o congestionamento da rede, em termos de probabilidade de bloqueio de largura de banda, e executa o LA para identificar a quantidade de BVTs que podem ser desligados para que ocorra uma economia de energia de modo que o congestionamento seja evitado. O

resultado mostra que o LESA atinge uma economia de energia de até 50% em comparação com outras soluções que visam eficiência energética, mantendo o bloqueio abaixo de 30% com carga máxima na rede. Uma vez que tal solução reduz o consumo de energia, seria interessante um estudo mais aprofundado levando em consideração arquiteturas FL e sFL, que por conta própria já reduzem consideravelmente o consumo de energia com a implementação de equipamentos passivos.

Em [197] considera-se uma metro FL com topologia em ferradura, classificada como rede semi elástica. Para esta rede apresenta-se um algoritmo capaz de determinar o *throughput* máximo que pode ser alcançado de acordo com diferentes políticas de gerenciamento de espectro. Um algoritmo RSA ciente da topologia da rede (*Topology-Aware RSA*) é proposto. Este algoritmo constrói sub topologias físicas (árvores de fibra) sobre uma topologia de fibra compartilhada (subproblema de topologia) e as demandas de tráfego são atribuídas alternativamente a algumas dessas sub topologias (subproblema de roteamento). O algoritmo visa avaliar o desempenho da rede sob três perspectivas diferentes de gerenciamento dos recursos espectrais: (i) alocação fixa, onde os caminhos ópticos permanecem estáticos ao longo do tempo; (ii) semi-elástica, onde a largura de banda do caminho óptico varia de acordo com os requisitos de tráfego atuais, sendo que frequência central permanece fixa; e (iii) completamente elástica, onde qualquer parâmetro do caminho óptico pode ser reconfigurado sem que seja necessário interromper o tráfego. Tais políticas foram aplicadas em dois tipos de cenário: (A) com *lasers* sintonizáveis compartilhados por múltiplas requisições, e (B) *lasers* independentes tanto na transmissão quanto na recepção. Os resultados mostram que a abordagem ii supera a abordagem i em mais de 20% em termos de aumento do *throughput*, mas não consegue ser mais eficiente que a estratégia iii. Entretanto, essa estratégia iii não é viável de ser aproveitada no mundo real porque ainda não está comercialmente disponível. Com relação aos tipos de *transponders* utilizados, o modelo A gera um ganho de apenas 10% em relação ao modelo B quando a política ii é executada, sendo este o maior percentual dentre todos os comparados. Assim, o provedor de rede pode achar mais vantajoso implantar os *transponders Bb* para dispensar *hardwares* extra.

Já [5] implementa o RSA ciente da distribuição do tráfego para testar um modelo de geração de tráfego proposto no mesmo trabalho, que é denominado *Onion Tidal Traffic Model (OTTM)*. O modelo é adequado para MON de pequenas cidades, nas quais são consideradas, em geral, duas áreas únicas e distintas (residencial e comercial). Os autores utilizam duas variações do RSA: (i) *Pre-Detour (PD)-RSA* (PD-RSA), que é o RSA executado com *Dijkstra* e (ii) *PDK-RSA* (PDK-RSA), que é um RSA executado com o KSP. Tanto a solução i quanto ii consideram a distribuição do tráfego no tempo mais recente e no tempo futuro como pesos para os enlaces. Ambos são comparados com o algoritmo

RSA guloso agnóstico de caminhos mínimos (*min-hop k-shortest paths*). As soluções cientes reduzem o bloqueio em cerca de 6% em comparação com a solução agnóstica. O PDK-RSA se sobressai em relação ao PD-RSA devido a maior possibilidade de caminhos candidatos.

Em [131] é abordado o problema de recuperação do tráfego quando um *switch* fica *offline* temporariamente na metro. No trabalho considera-se uma rede metropolitana multi camada, composta de *Flex Ethernet* (FlexE) sobre EON, na qual a restauração do tráfego do *switch* ocorre nessas camadas cruzadas. Neste cenário os fluxos afetados precisam ser recuperados de forma rápida e proativa. Três estratégias de restauração cruzada são propostas: (i) restauração do tráfego afetado e reencaminhamento pelos caminhos ópticos existentes, de modo que se possa aproveitar as capacidades sobressalentes; (ii) também redireciona o tráfego afetado sobre caminhos ópticos existentes, mas antes realiza uma reconfiguração dos *transponders*, para aplicar uma expansão espectral, bem como reconfigura o caminho óptico, que passa a ocupar novos *slots*; e (iii) configuração de um novo caminho óptico usando um novo *transponder*. Com essas estratégias um modelo ILP foi formulado e uma heurística baseado em gráfico auxiliar foi empregada para registrar o redirecionamento dos fluxos afetados, bem como minimizar OPEX em decorrência da falha do serviço.

Em [4] é proposta uma solução RSA ciente das áreas (*Area-Aware-RSA* ou AARSA). Além da solução heurística, os autores também apresentam o modelo *Multi-Step Trigonometric Model (MSTM)* para gerar o tráfego em diferentes distribuições ao longo da rede. O modelo é adequado para MON de grandes metrópoles, nas quais são consideradas três tipos de área (comercial, residencial e compreensiva), as quais são distribuídas em dois *clusters* cada uma. Essa peculiaridade é uma restrição aplicável à metro de Xangai, e os dados da rede móvel foram usados para validar o modelo. O AARSA aplica duas estratégias ao selecionar a rota, de acordo com a janela de horários do dia. A primeira janela compreende a parte da manhã, na qual o pico de tráfego geralmente é detectado na área residencial. A outra janela compreende os horários úteis no final do dia, quando o pico de tráfego pode acometer áreas comerciais e residenciais uma vez que as pessoas encontram-se saindo dos seus trabalhos e chegando às suas casas. Com isso, o algoritmo olha a janela de horários ao definir a rota, evitando selecionar nós das respectivas áreas. A solução proposta foi comparada com dois algoritmos agnósticos, *Min-Hop K-shortest Path Routing (MHK)* e *Occupied-Slots-as-Weight K-Shortest Path Routing (SWK)*. O algoritmo ciente reduz o bloqueio geral de requisições enquanto mantém reduzida a complexidade do algoritmo.

Tabela 5.3: Comparação de trabalhos com algoritmos cientes em algum aspecto em redes ópticas metropolitanas.

Trabalho	Roteamento	Arquitetura	Cenário de Tráfego	Tipo de Rede	Grade espectral	Cross Layer	Topologia	Problema Alvo/Objetivo	Distribuição do tráfego	Política para ordenar demandas
O. Ayoub (2019) [182]	RSA heurístico	EON	Dinâmico	WSON	Flexível	Camada física (Ciente do QoT)	Malha	Minimizar o número de amplificadores enquanto garante o QoT;	- Distribuição de concentração;	Não especificado
A. Varasteh (2021) [98]	ILP para RCSA	EON	Estático	WSON	Flexível	Camada física (Ciente do QoT)	Malha	Aumentar a eficiência energética por transponder;	- Tráfego uniforme;	Não especificado
GA Beletsoti (2020) [144]	RSA adaptativo com Algoritmos de Aprendizagem	IP sobre EON	Dinâmico	WSON	Flexível	Camada física (Ciente do consumo energético)	Malha	Aumentar a eficiência energética por transponder; Evitar congestionamento; Reduzir bloqueio;	- Tráfego uniforme;	Não especificado
JJ. Manresa et al.(2019) [197]	RSA heurístico	EON com caminhos fixos, semi-elásticos e elásticos	Dinâmico	FL	Flexível	Ciente do tráfego multi-horário (pacos de tráfego)	Árvore/Ferradura	Minimizar a utilização de espectro	- Distribuição de concentração;	Atende requisições em caminhos fixos nos horários de pico de tráfego e caminhos flexíveis nos horários de baixo volume
B. Yan et al.(2018) [5]	RSA heurístico	EON	Dinâmico	WSON	Flexível	Ciente do tráfego de marés	Malha	Reduzir o bloqueio;	- Distribuição de concentração;	Não especificado
M. Wu et al. (2022) [131]	ILP e Heurística	IP/OTN sobre EON	Estático/dinâmico	WSON	Flexível	Ciente da camada eletrônica para questões de restauração	Malha	Minimizar o OPEX durante episódios de restauração das conexões;	- Tráfego uniforme;	Não especificado;
B. Yan et al. (2020) [4]	RSA heurístico	EON	Dinâmico	WSON	Flexível	Ciente das áreas	Malha	Reduzir o bloqueio;	- Distribuição de concentração;	Não especificado

5.3 Tráfego de Dados em Redes Metropolitanas

Ainda sobre o tráfego de dados na metro, destacam-se a seguir as considerações da literatura sobre Classes de Tráfego (Subseção 5.3.1), Padrões de Tráfego (Subseção 5.3.2) e Perfis de Tráfego (Subseção 5.3.3). Há alguns trabalhos na literatura que debatem sobre mais de um desses aspectos, conforme será elencado, mas não foi identificado nenhum trabalho que simultaneamente retrate todos esses temas.

5.3.1 Classes de Tráfego

A classe de tráfego refere-se a uma categoria ou tipo de tráfego de dados que é definido por certas características, como prioridade, largura de banda e acordos de nível de serviço (SLAs) [115]. A classificação do tráfego em diferentes classes permite que os administradores de rede gerenciem os recursos da rede com mais eficiência, reservando largura de banda e alocando prioridade para classes específicas de tráfego.

Não é muito comum tratar as classes de tráfego no segmento de redes ópticas. No entanto, com a utilização de dados das aplicações, como a localidade, horário de utilização e comportamento dos usuários, bem como com a heterogeneidade da infraestrutura da rede com diferentes capacidades em cada nó, esse tema tem começado a despertar maior interesse.

Em [38] são consideradas várias classes de tráfego metropolitano. Cada classe possui características estatísticas particulares, quanto à taxa de geração de conexão, capacidade média solicitada e duração da reserva solicitada, expressa em faixas horárias, correspondente ao cenário de reserva antecipada. Essas classes podem ser identificadas com metodologias de classificação de tráfego apresentadas na literatura, que focam na classificação baseada em aplicativos ou classificam o tráfego de rede de acordo com os requisitos de QoS.

5.3.2 Padrões de Tráfego

Os padrões de tráfego são caracterizações que referem-se ao fluxo de tráfego de dados em uma rede em um determinado momento ou durante um período. Ao analisar os padrões de tráfego de rede, são estudadas os atributos do fluxo de dados do tráfego, como sua taxa, frequência e volume. Os padrões de tráfego podem ser cíclicos, sazonais ou imprevisíveis e podem ser afetados por diversos fatores, como comportamento do usuário, congestionamento da rede e eventos externos, como ataques cibernéticos. Os padrões de tráfego de rede podem ser monitorados e analisados usando uma variedade de ferramentas, como monitores de rede, analisadores de fluxo e ferramentas de inteligência artificial [132].

Os padrões de tráfego podem variar com o surgimento de novas aplicações e a adesão de novos usuários, assim como podem ser influenciados por acontecimentos que afetem vários usuários simultaneamente.

Em [198] são observados os padrões de tráfego gerados em dias úteis e finais de semana no período da pandemia da COVID-19. Os autores analisaram dados coletados da rede universitária espanhola *REDIMadrid*, que conecta 16 universidades e centros de pesquisa, bem como de provedores europeus de redes móveis. Observou-se que, antes da pandemia, os picos de tráfego nos dias úteis concentravam-se no período noturno, normalmente entre as 18h e a meia-noite (horário de pico). Já aos finais de semana, as atividades na rede eram mais distribuídas, e podiam ser detectadas também nos horários de menor movimento, uma vez que mais pessoas estão em casa e usando a *Internet*. A partir do *lockdown*, os dados mostraram que esse padrão de tráfego de dia útil passou a exibir os mesmos comportamentos do padrão contínuo de fim de semana. Outra mudança ocorrida foi o aumento relativo do tráfego *upstream* em até 18% a mais do que o tráfego *downstream*, causando um profundo impacto aos provedores de rede que, em geral, seguiam o protocolo de alocar menos recursos para o tráfego *upstream* do que para o *downstream*. Adicionalmente, a maioria das aplicações com o maior valor absoluto e aumentos relativos de crescimento de utilização são aquelas baseadas em nuvem. Enquanto os provedores esperavam um aumento de 30% do volume de tráfego para o período de 2020, o aumento ocorrido foi de 40%. Assim, o estudo conclui a grande necessidade de aprofundar as pesquisas sobre engenharia de tráfego em redes metropolitanas, super provisionamento de recursos, gerenciamento proativo de rede e a automação de tarefas, para garantir resiliência das redes em situações inesperadas como a ocorrida com o pico do período pandêmico.

Já [31] apresenta um estudo mais amplo com dados sobre o tráfego de um ISP e IXP da Europa Central (ISP-CE e IXP-CE, respectivamente), um IXP do Sul da Europa (IXP-SE), um IXP da Costa Leste dos Estados Unidos (IXP-US), além de uma rede metropolitana educacional (EDU) do sul da Europa. O ISP-CE lida com o tráfego majoritariamente de usuários finais e tráfego de pequenas empresas. Observou-se na análise

dos dados que o tráfego geral metropolitano aumentou mais de 20% após o *lockdown* para o ISP-CE, enquanto aumentou 30%/2%/12% para o IXP-CE/IXP-US/IXP-SE. Com a ocorrência do relaxamento do *lockdown* o crescimento caiu 6% no ISP-CE, mas permaneceu nos mesmos patamares no IXP-CE e IXP-SE. Os maiores aumentos de tráfego ocorreram no período da manhã, e assim, o pico de tráfego durante o dia é atingindo muito mais rápido do que antes da pandemia. Conclui-se no levantamento que o comportamento das pessoas é o principal responsável pelas grandes mudanças nas características do tráfego. Há mais tráfego no período da manhã e da noite, e os padrões de dias úteis e finais de semana são muito semelhantes, uma vez que a maioria das aplicações que mais contribuíram para o aumento do tráfego são aquelas utilizadas tanto para o trabalho quanto para o lazer, como é o caso de aplicações de video conferência (mais de 20%). A natureza distribuída da Internet e a agilidade com a engenharia de tráfego contribuiu para, mesmo com o aumento fora do esperado, os provedores conseguissem reagir aos eventos.

Existem esquemas de previsão dos padrões de tráfego *long short-term memory* (LSTM), *gated recurrent unit* (), *Node-Oriented Traffic Prediction and Scheduling* (NoTPS) [183]. O NoTPS implementa Rede de Grafos Convolutivos, que captura a associação espacial e o peso do tráfego nos nós em um grafo topológico. Com essas informações, ao selecionar a rota é possível dar preferência aqueles com baixa carga de tráfego prevista no futuro, desde que atinja uma soma mínima de cargas nesses nós selecionados no dado tempo futuro.

5.3.3 Perfis de Tráfego

O perfil de tráfego refere-se a um conjunto de conexões de tráfego que flui em uma rede durante um período de tempo específico. Inclui informações como tipo, volume e frequência do tráfego na rede, bem como origem e destino do tráfego [118].

Na literatura, alguns trabalhos mostram que, a determinação de perfis de tráfego com relação às redes móvel pode ser feita com a análise de dados considerando uma única estação base ou um grupo delas. Isto é possível devido à proliferação de aplicativos com uso intensivo de largura de banda. Assim, o rastreamento de dados celulares está mais relacionado ao comportamento de rede do que ao tráfego de voz tradicional, e por isso tem sido uma das ferramentas mais exploradas em redes ópticas metropolitanas [63]. Também existem trabalhos que consideram as definições de perfis e padrões de tráfego como sendo análogos [63].

Em [63] os autores analisam uma base de dados de redes móveis da *Telecom Italia* para determinar os perfis de tráfego existentes em diferentes zonas da cidade de Milão. Nesta fase de análise são utilizados dois modelos distintos de , os quais são *long short*

term memory (LSTM) e *gated recurrent unit* (GRU). Neste trabalho, a área geográfica de Milão é dividida em 20 zonas, sendo que em cada zona existem de dezenas a centenas de estações base, dependendo do tamanho da população. Desse total são isoladas três zonas que representam o menor, médio e maior volume de tráfego, respectivamente. O algoritmo de agrupamento *K-means* é utilizado neste processo de definição das zonas. A análise desses variados volumes de tráfego possibilitou a descoberta de algumas características. Os perfis de tráfego de dias da semana que são feriados e/ou finais de semana, são idênticos em algumas das zonas. O mesmo ocorre com o perfil de tráfego de dias úteis. Para Milão, geralmente o tráfego diminui gradualmente durante a madrugada (iniciando o declínio por volta das 20h), atingindo um valor mínimo por volta das 4h. Já o aumento do volume de tráfego ocorre de maneira gradual desde as primeiras horas da manhã (entre 5h e 8h) em ambos os tipos de dias da semana. Os três tipos de volume de tráfego e as zonas selecionadas são úteis para identificar o local mais adequado para a implantação de centros de dados capazes de hospedar controladores VNFs e SDN. O objetivo final é melhorar a programabilidade das aplicações mais utilizadas nesses espaços com a disponibilização de mais recursos, determinando-se a dimensão ideal capaz de lidar com o tráfego dentro de uma zona específica.

Para [117] os perfis de tráfego são diferentes combinações de requisições de conexão em diferentes proporções de requisição de banda. As requisições da rede são compostas por solicitações de banda em três faixas: (i) baixa: de 10 e 40 Gbps; (ii) média: de 100 e 120 Gbps; e (iii) alta: de 160 e 200 Gbps. Os autores definem dois perfis de tráfego, denominados A e B. O perfil A é formado por maior proporção de requisições baixas, e menor proporção de requisições altas. Já o perfil B é composto por mais de 60% de tráfego médio e menor proporção de tráfego alto. Tais definições são realizadas para que seja avaliado o consumo de energia pelos *transponders* ao atender os diferentes perfis de tráfego em uma rede mista composta por nós de grade fixa e de grade flexível. O resultado mostra que em tais condições, o consumo de energia pelo perfil de tráfego B é menor do que pelo perfil de tráfego A. Além disso, na rede mista, quanto maior a proporção de nós de grade fixa maior o consumo de energia e bloqueio de requisições.

Em [119] os perfis de tráfego obtidos para a topologia da região metropolitana japonesa de Kanto, são aproveitados para auxiliarem no projeto de arquiteturas de centros de dados embarcados na metro (*Metro-Embedded Data Center (ME-DC)* ou micro centro de dados - mDC). Os mDC devem ser implantados de maneira geograficamente distribuída, assim como devem estar mais próximos dos usuários para fornecer serviços mais confiáveis e flexíveis com menos latência de acesso, em comparação com os atuais DC. No estudo são considerados três tipos de centros de dados atualmente implantados: centros de dados universitários (UDC), privados (PDC) e comerciais (CDC). Para cada tipo de centro de

dados foram considerados três perfis de tráfego: intra-DC, inter-DC e externos. Os dados japoneses indicam que a quantidade de tráfego intra-DC é muito maior em comparação com o tráfego inter-DC, especialmente para os CDCs, o que justifica a implantação de mDC. Os autores defendem que o posicionamento ideal dos mDC deve ser mais próximo do usuário (ou seja, a localização do mDC segue a distribuição do usuário). Com relação ao fluxo de tráfego, os mDC devem ser implantados mais próximos de áreas recreativas/-compreensivas do que áreas residenciais, que tende a ter grande concentração populacional sazonalmente e fora dos padrões. Dessa maneira, o usuário da rede que está em um estádio, por exemplo, estaria mais próximo de um mDC com menos tráfego externo ao mDC, o que incorreria em menor latência. Em caso de recursos insuficientes nessas condições, mais recursos podem ser aproveitados de outros mDC, o que resultaria em maior tráfego entre mDC. Assim, a infraestrutura torna-se mais barata mantendo o tráfego dentro da metro.

Em [102], onde destaca-se uma rede MEON com camada de sobreposição OTN, os perfis de tráfego referem-se a perfis de taxas de transmissão que são um conjunto contendo uma taxa mínima, uma taxa média e uma taxa máxima, selecionados aleatoriamente a partir de um conjunto contendo as taxas previstas nos SLAs. Quando um perfil é gerado, um conjunto de caminhos compatíveis com as taxas é reservado. Para cada requisição que chega na metro pode ser atendida com um dos perfis, desde que alguns dos caminhos sejam adequados à demanda. O resultado mostrou que os valores mínimos aproveitam melhor os recursos de espectro da rede do que os valores máximos descritos nos perfis.

Para [71], dois perfis de tráfego são considerados: heterogêneo e homogêneo. No perfil de tráfego heterogêneo, o tráfego é distribuído aleatoriamente nos nós de forma que a rede tenha um valor específico de tráfego médio por nó. No perfil de tráfego homogêneo, um valor de tráfego uniforme é considerado para cada par de nós representado em uma dada matriz de tráfego.

Em [35] são definidos dois perfis de tráfego para caracterizar o fenômeno do tráfego de marés, os quais são denominados leve e pesado. Os perfis são distribuídos ao longo das áreas da metro em diferentes horários. O perfil pesado varia de 3 a 10 vezes a proporção do perfil leve. Com isso são registrados dois diferentes estados na rede: estado do vale da maré e estado de pico da maré. Um limiar de QoS é adotado na rede e representa uma medida de custo-benefício na qual é possível economizar a máxima quantidade de energia sem comprometimento do atendimento das requisições, e esse valor de QoS é diferente em cada região (comercial e residencial). No trabalho considera-se um cenário de rede metro do tipo IP/MPLS/DWDM com agregação de dados na camada eletrônica. A economia de energia sem comprometer o bloqueio pode chegar a 15% e 45% para os perfis leve e pesado, respectivamente, com o uso de agregação.

5.4 Áreas e *Clusteres* Metropolitanos

A distribuição geográfica e temporal do tráfego pode degradar a utilização de recursos nas MONs e reduzir a capacidade de atendimento das operadoras. Portanto, é importante prever esse padrão de tráfego com precisão e escalonar o tráfego, quando possível, de forma eficiente para um melhor desempenho dos MONs [183].

A identificação das características do tráfego por área em [31] foi obtidas através dos roteadores de borda dos ISPs, cujos fluxos foram monitorados com o *NetFlow*. Um dos focos do trabalho é investigar a composição do tráfego residencial entre fevereiro e maio de 2020, início da pandemia da COVID-19. Durante o referido período, o intenso tráfego das áreas residenciais contrastou com a grande redução nas áreas de negócios, principalmente devido aos usuários estarem usando a Internet para trabalhar e estudar, consumindo principalmente conteúdo de vídeo. Conseqüentemente, o aumento do tráfego nas CDNs foi instantâneo. Por outro lado, as áreas educacionais, por onde passam as redes acadêmicas, as quais fornecem dados mais precisos do fluxo de tráfego, foram impactadas por simultâneas aplicações de videoconferência, de forma que as soluções de engenharia de tráfego foram aplicadas para garantir a continuidade dos serviços.

O conceito de *cluster* de nós da rede metropolitana tem sido empregado para ajudar a identificar subgrupos ou comunidades dentro dessa rede maior, ao longo dos quais padrões podem ser revelados ou relacionamentos entre nós nessa rede podem ser determinados [192]. Em [193] os autores utilizam uma topologia representando uma localização geográfica anônima da China, na qual os *clusteres* são agrupamentos de estações bases de redes móveis em diversas áreas (áreas de negócios, áreas acadêmicas, áreas industriais). Como o objetivo do trabalho é pesquisar técnicas de alocação dinâmica de recursos na rede metro-core, de modo que o consumo de energia seja minimizado, com as informações das áreas/*clusteres* e respectivos tipos de tráfego, a solução proposta aproveita as distâncias menores na rede para estabelecer caminhos ópticos totalmente transparentes, utilizando desvio óptico para evitar conversões ópticas para elétricas em nós de trânsito. Os padrões de tráfego previsíveis no espaço e no tempo fornecem informações que possibilitam a redução de mais de 20% do consumo de energia. No caso dos padrões de tráfego não previsíveis, operações adaptativas das taxas às cargas, desvio óptico e escalonamento de requisições são alternativas que ajudam no compromisso entre o bloqueio do serviço e eficiência energética.

5.5 Resumo Conclusivo

Este capítulo apresentou, na Seção 5.1, novos modelos de tráfego de marés para MONs, utilizados para geração de dados do tráfego que serão utilizados como entrada para o problema RSA. Um levantamento da literatura científica mais recente relacionada aos algoritmos de roteamento em EON metropolitana é mostrado na sequência. Discorreu-se separadamente sobre os algoritmos agnósticos e algoritmos cientes, respectivamente Subseções 5.2.1 e 5.2.2. Dentre os algoritmos cientes, destacou-se as soluções voltadas especificamente para redes com o segmento MC.

O capítulo ainda discorre sobre uma relação de trabalhos orientados para o tráfego de redes metropolitanas, a partir da Seção 5.3, identificando os modelos de tráfego, as classes, padrões e perfis empregados em uma perspectiva do domínio óptico. Na sequência, destacam-se trabalhos que tratam das áreas e *clusters* metropolitanos, e que recentemente tem ganhado mais espaço em virtude da tendência de convergência de redes de comunicação no futuro.

Com isso, observa-se a necessidade de maiores aprofundamentos sobre estudos do tráfego de dados, de identificação e reconhecimento de padrões, e sobretudo, de proposição de soluções de engenharia de tráfego em redes metropolitanas. Com as grandes mudanças que ocorrerão nessas redes e seus diversos segmentos, há muitos *gaps* de pesquisa sobre utilização de informações do ambiente juntamente com as estratégias que são aplicadas para garantir continuamente a melhoria de desempenho tão buscada pelos operadores de rede.

Capítulo 6

Engenharia de Tráfego Ciente da Área

O Capítulo 5 apresentou uma análise sistemática da literatura científica no que refere-se às soluções de engenharia de tráfego para MONs. Duas principais percepções resultaram dessa análise: *i*) a arquitetura de rede MON substancialmente mais abordada é a MEON, sobre a qual vários estudos têm sido realizados, e *ii*) no que tange às soluções de engenharia de tráfego com abordagem *cross-layer*, uma recente frente de pesquisa sobre tráfego de marés tem se destacado no campo das MONs, tomando maior relevância a partir da ocasião da pandemia da COVID-19, quando a característica do tráfego mudou completamente as operações dos provedores de rede [198]. Devido ao *lockdown*, as RA experimentaram um aumento no volume de tráfego de cerca de 20% em um período de uma semana, permanecendo nessa faixa ao longo de meses [31]. Neste sentido, as duas percepções alcançadas ao longo deste trabalho são relevantes, mas de maneira diferente. Enquanto o tópico *i*) pode indicar o tipo de arquitetura mais promissora para ser implantada futuramente, devido à maturidade científica, considerável aumento de recursos e quantidade de informações já levantadas a respeito, o tópico *ii*) ainda não suficientemente abordado, indica uma oportunidade a ser explorada para melhorar o desempenho das redes, especialmente em momentos de crise como o vivido com a pandemia.

Devido a isto, este Capítulo propõe uma abordagem heurística ciente da área, para resolver o problema da alocação de recursos em uma MON com arquitetura MEON. Considera-se que as variadas áreas da metro são conhecidas e que as informações sobre essas áreas podem contribuir com a tomada de decisão na escolha das rotas mais viáveis. Assim, é possível selecionar rotas mais prováveis de atender os serviços, que, principalmente, contenham enlaces de fora das áreas sobrecarregadas com picos de tráfego.

Com este objetivo propõe-se o algoritmo *Area Link Weighted Aware with Complete Sharing (ALWAcs)*, que aplica como estratégia o ponderamento dos enlaces de acordo

com o volume de tráfego em uma dada hora. Os enlaces de áreas com pico de tráfego tendem a ter maior custo em comparação com enlaces de áreas que apresentam vale de tráfego em uma determinada hora do dia. O propósito central do ALWAcS é diminuir a probabilidade de bloqueio de largura de banda para o atendimento de requisições de serviços. Para isso, duas regras são estabelecidas:

- Quando origem e destino de uma conexão fazem parte de um mesmo tipo de área (subárea), e faz ainda parte de um mesmo *cluster* de nós dessa mesma área, 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 custoso 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)* [199], que aloca os recursos espectrais de menor índice no espectro.

Devido a estes pesos, o provedor de rede tem a possibilidade de representar diferentes tipos de políticas, modelando diferentes significados, como o nível de congestionamento nas diversas áreas, a quantidade de recursos disponíveis, entre outras. A principal contribuição desta proposta heurística é a redução da probabilidade de bloqueio geral, e especificamente, em duas grandes áreas metropolitanas. Tal proposta supera a solução de [4] em pelo menos 50% enquanto melhora o atendimento de requisições em áreas particulares da rede metro.

O restante deste Capítulo está organizado da seguinte maneira: a Seção 6.1 apresenta um embasamento teórico para o problema RSA ciente da área; a Seção 6.2 apresenta a solução algorítmica denominada ALWAcS proposto; a Seção 6.3 descreve a metodologia da simulação, cenários e apresentação dos resultados, além da Seção 6.4, que resume brevemente as conclusões deste capítulo.

6.1 Embasamento Teórico

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 IoT, Indústria 4.0 e tecnologia 5G [12, 59]. 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 UDWSN [59] ou a MEON [4, 5, 102, 84], sendo que todas elas são baseadas em tecnologia de transmissão flexível.

Estas são especificamente arquiteturas com nós dotados de filtros reconfiguráveis, nomeadamente, *switches* WSSs. Devido a este aspecto, essas redes ópticas são classificadas como WSONs. Além destas arquiteturas, há ainda outros dois tipos, os quais são, redes FL e sFL.

Em [102, 84] são propostas soluções de roteamento e alocação de espectro (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 [102] propõe alocação adaptativa com otimização estocástica para atender as demandas de tráfego, tendo como principal resultado a redução na utilização de recursos espectrais, [84] propõe uma solução baseada em redes definidas por *software* (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*. Os dados do consumo de energia são obtidos por meio do controlador de rede. Em ambos os trabalhos, isto é [102, 84], o foco é a MAN, sendo que a distribuição do tráfego na rede é feita de maneira uniforme e homogênea. Esses trabalhos não abordam as especificidades pontuais de carga de tráfego em cada horário e região metropolitana.

Para análise comparativa com a solução proposta neste capítulo, o ALWAcS, selecionou-se o algoritmo AARSA descrito em [4] 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 [4] 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 AARSA de [4] 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 na maior parte de todas as áreas metro.

6.2 Algoritmo de 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. Dessa maneira, formula-se o seguinte hipótese: resolver o problema RSA com conhecimento sobre as áreas, enquanto seleciona-se as rotas de menor peso ou aloca-se os recursos espectrais de maneira organizada, no sentido ascendente da frequência, pode contribuir para a redução do bloqueio, tanto na rede como um todo, quanto localmente em cada área específica. 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 $w \in Q$, 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.
- $p \in P$: é o caminho pertencente ao conjunto de caminhos de roteamento viáveis para atender a requisição r , sendo que $|P| = k$, com $k \in N$.

- $SA(r, p, r.requestedSlots())$: é a alocação de *slots* espectrais para a requisição r no caminho p , correspondendo a um determinado número de *slots* designadas como $r.requestedSlots()$, de acordo com as restrições de continuidade e contiguidade.

A intuição por trás do funcionamento do ALWAcS é ilustrada na Figura 6.1. Um conjunto de pesos é atribuído aos enlaces de uma MON. Cada área contém pesos diferentes, conforme descrito anteriormente, que podem indicar o custo de alocação para um horário específico. Suponha que nesse horário específico, ocorre um pico de tráfego na CA. Nesse caso, os pesos w_c , nos enlaces azuis, são os maiores, e podem aumentar muito o custo da rota selecionada para este horário específico.

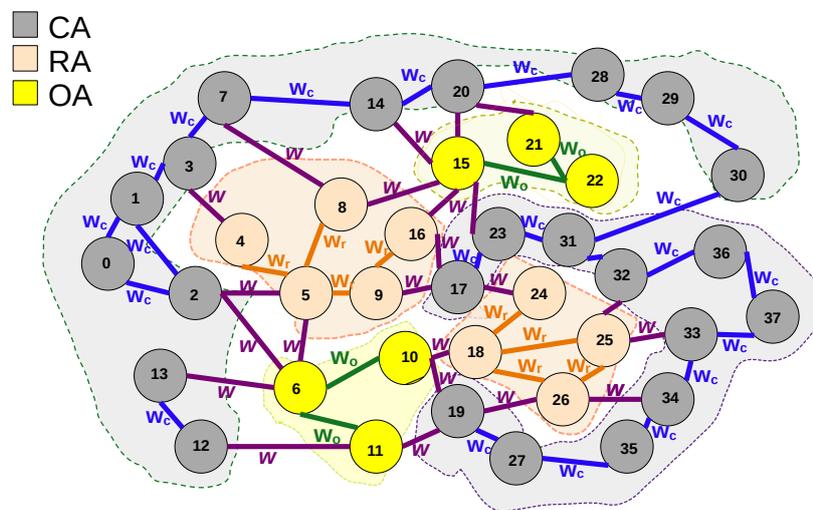


Figura 6.1: Grafo com enlaces ponderados.

Considere o exemplo i): suponha que uma requisição originada no nó 14, tendo como destino o nó 17, precise ser atendida em um horário com pico de tráfego na CA. Como os nós de origem e destino estão na área atingida por pico de tráfego, os enlaces dessa área podem estar congestionados, o que pode elevar consideravelmente a possibilidade de bloqueio da conexão. Como exemplo de rotas que podem ser estabelecidas, a Tabela 6.1 mostra alguns possíveis caminhos candidatos para atender a requisição. As rotas 1 e 2 possuem ambas três enlaces, enquanto as rotas 3 e 4 possuem quatro enlaces. Dentre as duas rotas menores, a rota 2 teria menos chances de ser selecionada por ser a mais custosa dentre as duas, uma vez que possui o enlaces 23-17, que tem peso maior nesse momento específico, por estar na área CA. Quanto às rotas 3 e 4, esta última seria evitada por resultar em uma soma de pesos maior. O ALWAcS ordena essas rotas pela menor total de pesos, e tenta estabelecer a conexão na rota de peso mínimo que tenha recurso espectral suficiente.

Tabela 6.1: Exemplos de possíveis rotas para estabelecer um caminho óptico entre os nós 14 e 17, ambos na CA.

Rota 1	14 - 15 - 16 - 17
Rota 2	14 - 15 - 23 - 17
Rota 3	14 - 20 - 15 - 16 - 17
Rota 4	14 - 20 - 15 - 23 - 17

A Figura 6.2 mostra as rotas P_1 e P_2 , composta por múltiplos enlaces. Cada enlace está dividido em 5 FS. Os quadrados na cor cinza indicam FSs disponíveis, os quadrados na cor laranja indicam FSs ocupados e que foram alocados por meio da política *first-fit*. Os quadrados em vermelho indicam FSs ocupados e que foram alocados utilizando a estratégia do CS. No exemplo *i*), a política de alocação implementada é a *first-fit*, mostrada na Figura 6.2 e apresentada anteriormente na Seção 2.2.2 do Capítulo 2. Após a rota ter sido selecionada, a política do *first-fit* é aplicada para encontrar os primeiros FS disponíveis de mesmo índices nos enlaces dessa rota. No exemplo da figura, tanto a rota P_1 com os FSs laranja, quanto P_2 com os FS na cor vermelho estão livres. Neste caso, P_1 é selecionada por ser a primeira rota disponível. A política CS[199] é uma estratégia aplicada para reduzir a fragmentação espectral. O CS seleciona as rotas fazendo a verificação pelo primeiro FS disponível mais à esquerda em cada enlace, consumindo o recurso de uma maneira mais organizada. No exemplo da Figura 6.2, a rota P_1 com três enlaces seria a selecionada ao invés da rota P_2 .

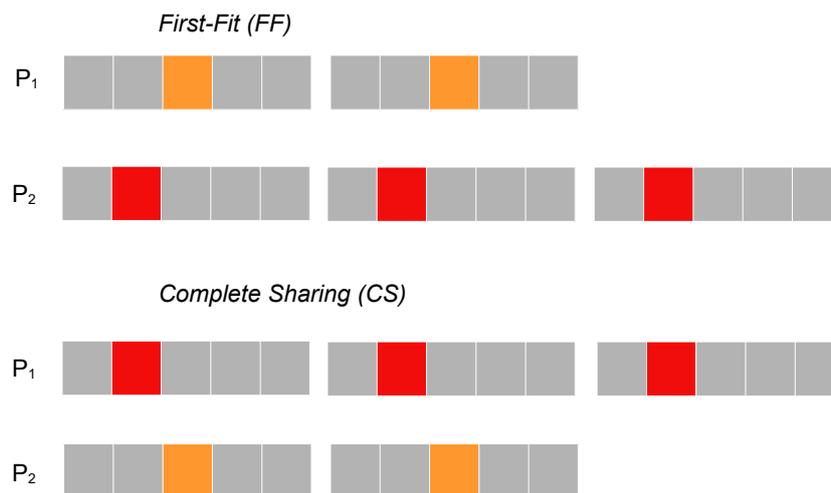


Figura 6.2: Políticas de alocação de espectro.

Considere o exemplo *ii*): suponha que uma demanda do nó 7 para o nó 9, estando cada um desses nós em uma área e *cluster* distinto, precise ser estabelecida em um momento

com pico de tráfego na CA. Algumas possíveis rotas são mostradas na Tabela 6.2. Devido à característica da origem distinta, as rotas candidatas terão tamanhos e pesos variados, e assim, a seleção por peso mínimo levaria a uma maior fragmentação espectral. Neste caso, a estratégia do CS, mostrada na Figura 6.2, é adequada porque pode contribuir com a alocação ordenada dos FSs, especialmente importante em momentos de alto volume de tráfego pontual. Assim, dentre as rotas candidatas A, B e C, a rota selecionada seria aquela com o primeiro FS (ou conjunto de FS consecutivos) mais à esquerda, não sendo necessariamente a menor delas.

Tabela 6.2: Exemplos de possíveis rotas para estabelecer um caminho óptico entre os nós 7 e 9, estabelecidos em áreas e *clusters* diferentes.

Rota A	7 - 8 - 5 - 9
Rota B	7 - 3 - 4 - 5 - 9
Rota C	7 - 8 - 15 - 16 - 9

6.2.1 Algoritmo Proposto

A solução RSA ciente da área proposta neste Capítulo é o ALWAcS, conforme mostra o Algoritmo 1. O ALWAcS utiliza algumas funções no seu fluxo de execução. A função $KSP(r, k)$ é o algoritmo dos k menores caminhos baseado no KSP de Yen [200], que seleciona os k menores caminhos sem *loops*. A função $SortByLowestWeightOnLinks(P, w_c, w_r, w_o, w)$ recebe como entrada o conjunto de rotas P onde cada caminho $p \in P$ é composto por enlaces ponderados $w(e_i)$. A função compara o peso total de cada caminho e os ordena pelo peso mínimo. A saída desta função é o conjunto de caminhos P ordenados pelo peso mínimo. Já a função $SA(r, p, r.requestedSlots())$ é responsável por realizar a alocação dos FS. Assim, a função recebe como entrada a requisição r , o caminho p e a quantidade de FS requisitada por r . Com essas entradas, esta função utiliza a política *first-fit* (mostrada na Figura 6.2) para verificar se há recurso disponível de acordo com as restrições do problema RSA. Da mesma forma, a função $SortByCompleteSharingPolice(r, P)$ recebe como entrada a requisição r e o conjunto de caminhos P . Com esses dados, a função aplica a política CS (mostrada na Figura 6.2) para ordenar os caminhos em P . A saída desta função é o conjunto de caminhos P ordenados pela política CS. À seguir, são mostradas as instruções do ALWAcS.

Na linha 3 é executado o algoritmo iterativo de Yen [200] para calcular os k menores caminhos sem ciclos, construindo-se o conjunto de caminhos viáveis P . Em seguida, são considerados dois casos. O primeiro 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 à todos

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 linha 5 é utilizada a política descrita na linha 15, na qual são selecionados os k caminhos com FS disponíveis mais à esquerda do espectro, isto é, os *slots* de menores índices, conforme a política CS [199]. A requisição poderá ser aceita se houver um caminho viável com disponibilidade de FS. 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:    $SortByCompleteSharingPolice(r, P)$ 
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, aumentando as possibilidades de gerência dos recursos dos enlaces para o operador da rede. 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 [4] apenas tentam evitar os nós das áreas RA e/ou OA no estabelecimento dos caminhos.

6.2.2 Análise da Complexidade do ALWAcs

O algoritmo ALWAcs, assim como todos os algoritmos em [4], é baseado no KSP de Yen [200], 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 $O(k|V|^3 + k^2 + k(|E||S|) + k^3|V|^3)$.

6.3 Simulação e Análise de Resultados

O algoritmo ALWAcs (Algoritmo 1) foi implementado no *Optical Networks Simulator* [201]. Para comparação, foram implementados os algoritmos propostos em [4], os quais são *Min-Hop K-shortest path routing* (MHK), *Occupied-Slots-as-Weight K-shortest path routing* (SWK), *Area-Aware RSA* (A2RSA). O cenário de rede foi preparado utilizando distribuição do tráfego de marés de acordo com o modelos MSTM, apresentado na Seção 5.1.1 do Capítulo 5. O modelo recebe como entrada um dado numérico que indica a hora do dia. A saída do modelo MSTM é o valor de excedente de carga de tráfego em cada área da rede, dado em *Erlang*, para o respectivo horário informado. A saída do modelo MSTM é utilizada para preparar o cenário de simulação onde todos os algoritmos serão executados. 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 [4], 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.

6.3.1 Cenário das Simulações

A topologia de rede testada nas simulações foi a mesma utilizada em [4], mostrada como Versão 1 na Figura 5.1 (Apresentada na Seção 5.1 do Capítulo 2), e que é composta de 38 nós e 60 enlaces unidirecionais. Para gerar outros cenários de simulação, algumas variações desta mesma topologia foram sinteticamente produzidas (Versão 2 e Versão 3 na Figura 6.3), 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 [4] as áreas representam o espaço geográfico de Xangai. 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 do número de áreas e *clusters*, que são características próprias do problema, conforme destaca [4].

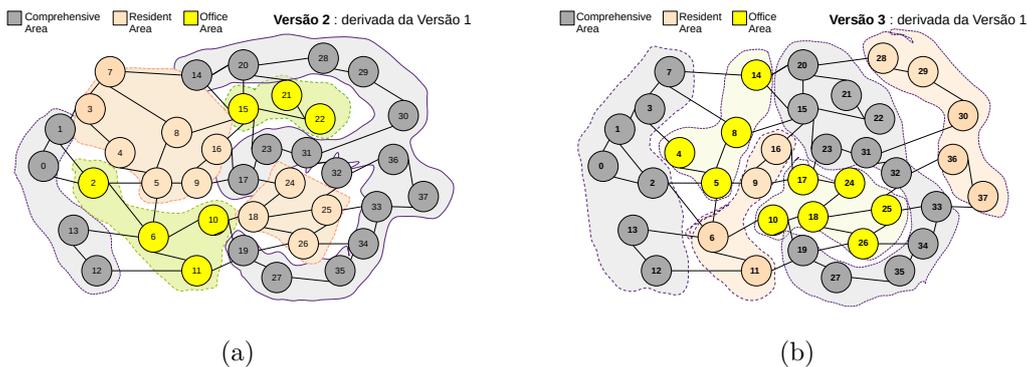


Figura 6.3: Topologias derivadas da Topologia 1 (Figura 5.1), sendo denominadas (a) Topologia 2 e (b) Topologia 3.

Cada enlace é dividido em 100 *slots* de frequência, sendo cada *slot* equivalente a 12,5 GHz, com banda de guarda de 2 *slots*, conforme é praticado em [4, 5]. Com relação ao cenário de tráfego, foram escolhidos 2 horários específicos da linha do tempo do modelo

Tabela 6.3: Percentual de excedente de carga por área em cada horário de acordo com [4].

\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

dos autores [4], 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 6.3 [4] 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, intervalo comumente praticado em MONs [4, 5, 91, 128, 144, 202, 203]. Todas as conexões são bidirecionais e os nós de origem e destino são selecionados aleatoriamente.

A modulação utilizada é a QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). Nas solicitações de conexão, o número de *slots* requisitados é aleatório entre (1, 2, 3, 4), isto é, as taxas solicitadas pelas demandas são 25 Gbps, 50 Gbps, 75, 5 Gbps e 100 Gbps. 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.

6.3.2 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. Enquanto [4] destaca como métrica principal BBR geral da rede, este trabalho adicionalmente estuda o BBR específico por cada área da topologia.

Taxa de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) Geral

Inicialmente será mostrado o resultado dos experimentos de simulação nas Topologias 1, 2 e 3 para o horário de 06h, período no qual o volume de tráfego encontra-se em níveis menores, de acordo com [4], porém, a CA seguida pela RA expõem tendência de aumento momentâneo. Os resultados gráficos são mostrados em duas escalas diferentes no eixo y (linear e logarítmica) para uma melhor comparação. Os gráficos mostrados nas Figuras 6.4

(a) e 6.4 (b) ilustram as taxas de bloqueio de largura de banda das requisições para cada nível de carga da rede no horário de 06h. Observa-se que todas as soluções cientes da área obtêm maior redução de bloqueio em comparação com as soluções agnósticas. O ALWAcS, representado em azul, mostra a eficiência da sua estratégia para cargas menores que 150 *Erlangs*, cenário no qual consegue evitar bloqueios de requisições. Conforme a carga aumenta, o ALWAcS vai se aproximando do A2RSAp2, mas mostrando um desempenho duas vezes melhor do que o A2RSAp1 com a carga de 250 *Erlangs*.

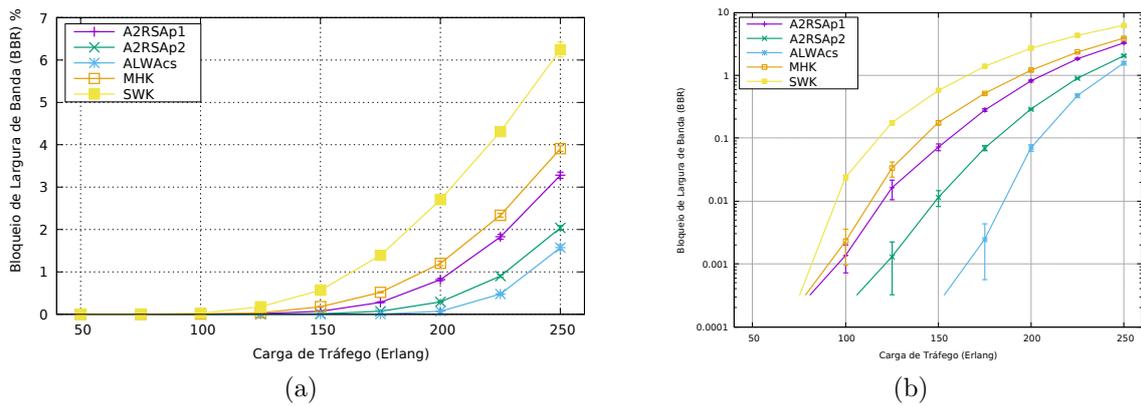


Figura 6.4: Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na **Topologia 1**, no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Com relação à Topologia 2 no mesmo horário, o resultado da avaliação é mostrado nos gráficos da Figura 6.5. Os resultados para a Topologia 2 são similares aos obtidos para a Topologia 1. A principal diferença a ser observada é que o A2RSAp1 se aproxima mais do MHK na Topologia 2. Um possível motivo para esse comportamento é que a Topologia 2 possui menos nós CA do que na Topologia 1, que é a área com maior volume de tráfego às 06h. Esta diferença de configuração nas Topologias 1 e 2 não afetam o comportamento do ALWAcS.

Os gráficos apresentados na Figura 6.6 mostram o resultado da avaliação de desempenho na Topologia 3. Uma característica de configuração desta topologia é que os *clusters* das áreas CA e RA (as áreas com maior volume de tráfego no horário das 06h), aparecem praticamente opostas. Assim, conectar os *clusters* CA requer, na maioria das vezes, que o caminho estabelecido passe por duas áreas distintas. O mesmo ocorre com os *clusters* da RA. Outro detalhe é que na Topologia 3 o número de nós que compõe a OA é consideravelmente maior em comparação com as demais topologias. Para a política de ponderamento dos enlaces, aplicada pelo ALWAcS, esse cenário implica em um aumento no número de enlaces com peso abaixo do máximo, bem como diminuição na quantidade de enlaces com peso máximo. Quando a carga está baixa e há recursos espectrais na

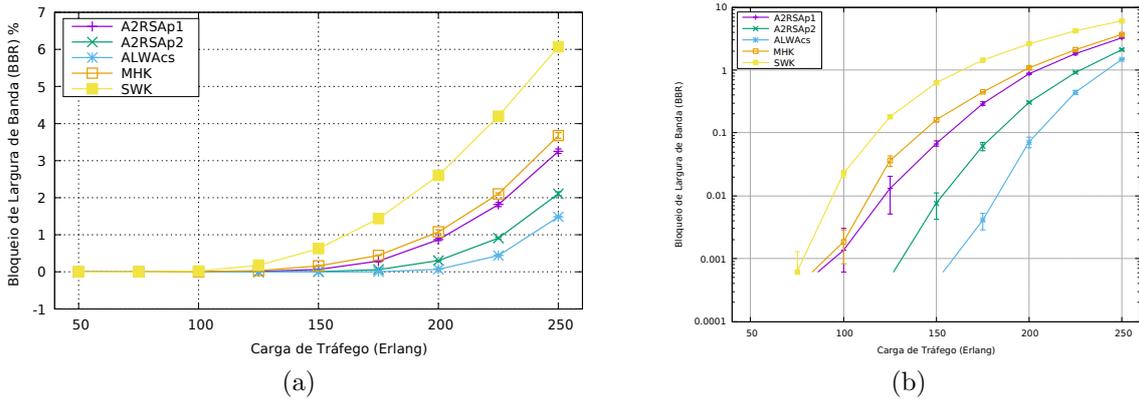


Figura 6.5: Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na **Topologia 2**, no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

rede, os caminhos candidatos tendem a ter maior quantidade de saltos do que quando a carga está alta. O ALWAcS tende a se distanciar mais dos demais algoritmos. Mesmo os algoritmos MHK, A2RSAp1 e A2RSAp2, que tendem a estabelecer caminhos menores devido à política *first-fit*, na Topologia 3 esses caminhos terão uma maior quantidade de saltos. É devido a isso que o MHK é bem sucedido com carga inferior a 100 *Erlangs*. Com o aumento da carga, ocorre a degradação dos recursos, mas a estratégia do ALWAcS consegue manter o BBR reduzido.

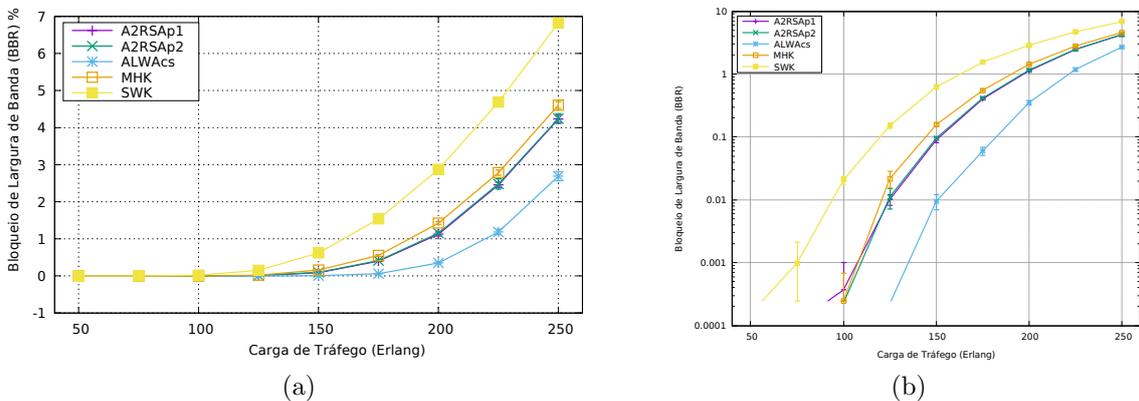


Figura 6.6: Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na **Topologia 3**, no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

As próximas análises serão mostradas para o horário das 18h. Neste ponto do tempo, geralmente as pessoas estão em deslocamento, entre a OA, onde trabalham, e a RA, onde moram. Este é um movimento contrário daquele que começa a ocorrer às 06h. Por isso, a ordem das áreas afetadas por grande volume de tráfego é a mesma. A principal diferença

é que, enquanto às 06h as pessoas estão começando o dia nas suas casas, e gradualmente começam a deslocar-se a partir desse horário com destino aos seus locais de trabalho, às 18h a locomoção ocorre de forma mais brusca. Como consequência, o volume de tráfego às 18h é maior em qualquer que seja a área, em comparação com o tráfego às 06h. Com respeito às 18h Os resultados da avaliação de desempenho com as três topologias é similar ao que foi obtido para as 06h. O ALWAcS obtém o melhor resultado com qualquer valor de carga na rede, tanto na Topologia 1 quanto na Topologia 2. Já na Topologia 3, onde os algoritmos MHK, A2RSAp1 e A2RSAp2 atingem um BBR muito próximos.

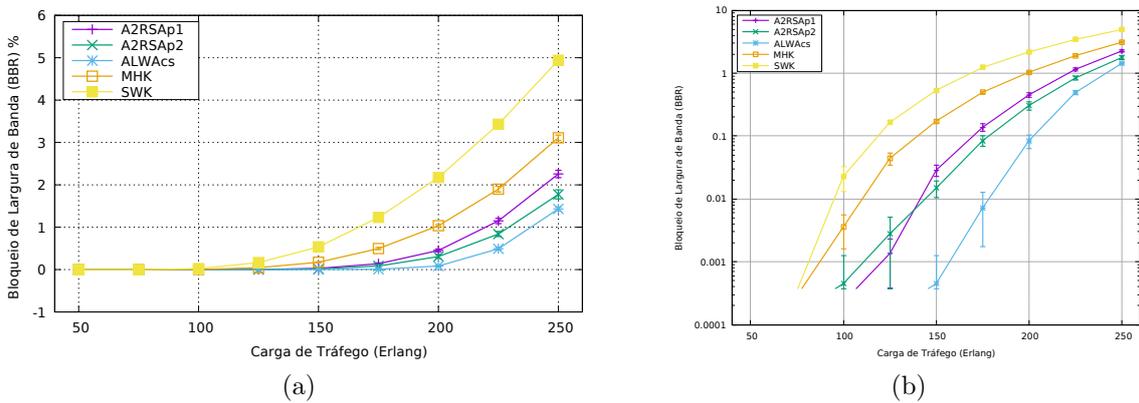


Figura 6.7: Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na **Topologia 1**, no horário de 18h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

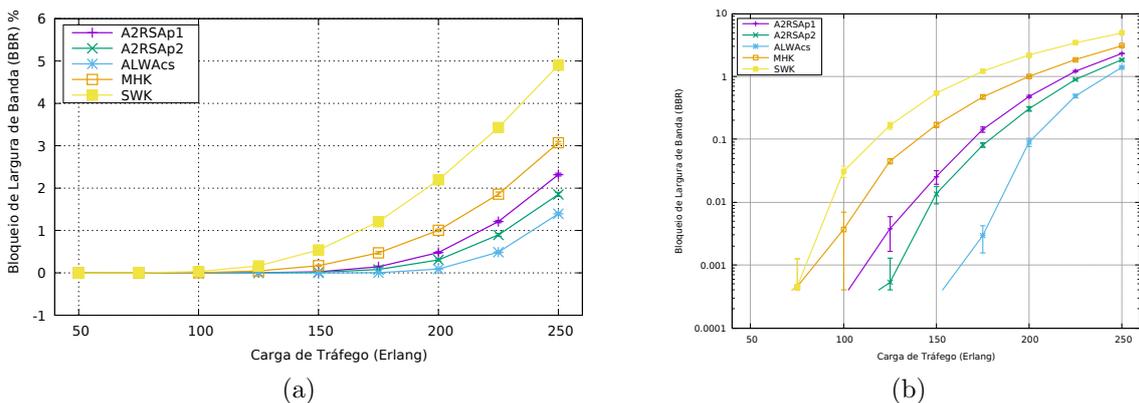


Figura 6.8: Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na **Topologia 2**, no horário de 18h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

As três topologias preservam uma característica comum que é a ausência de conexão direta entre os dois *clusters* de nós RA. As soluções algorítmicas podem levar a resultados gerais semelhantes, independentemente de como são organizadas as áreas e *clusters* de

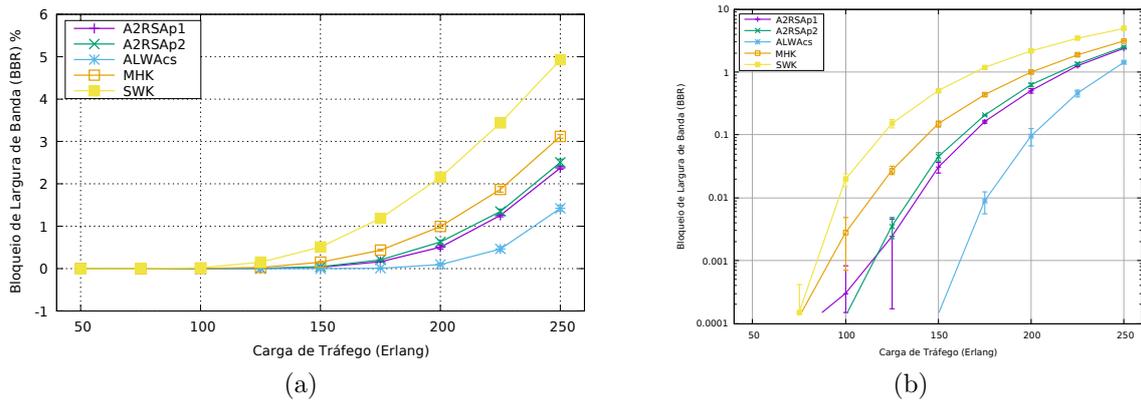


Figura 6.9: Resultado da taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) dos algoritmos na **Topologia 3**, no horário de $18h$, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

áreas. Como às $6h$ a região comprometida é a RA, nota-se a solução ciente mantém a mesma redução no bloqueio geral, mesmo que o número de nós seja ligeiramente diferente nessa área. Com relação à Topologia 3, a principal característica é que os caminhos entre os nós RA são consideravelmente maiores em relação às duas outras topologias, uma vez que os clustres RA encontram-se mais afastados, isto é, distantes em número de saltos. Devido a essa razão a taxa de bloqueio aumentou em mais de 0,5% (com carga de 250) para o ALWacs com respeito às demais topologias.

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. Nas três topologias, o número de nós OA foi 6, 7 e 10, ao passo que o número de nós CA foi, 23, 20, 19, respectivamente. O aumento significativo no número de nós das OA reduz a disponibilidade de recursos no horário crítico das $18h$. Adicionalmente, a leve redução no número de nós da área com fluxo volátil de tráfego, isto é, CA, tende a reduzir as possibilidades de rotas que garantiriam o fornecimento dos serviços. Assim, o ALWacs obteve a menor redução do bloqueio geral no cenário da Topologia 3.

Taxa de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) Por Área

Também foi analisado o BBR individualmente por cada área considerada na topologia. Como os resultados são similares entre as três topologias apresentadas, para ambos os horários definidos, $06h$ e $18h$, serão apresentadas à seguir apenas as avaliações de BBR para a Topologia 1, que é a topologia utilizada em [4]. Os gráficos mostrados nas Figuras 6.10, 6.11 e 6.12 mostram as avaliações de desempenho para o BBR nas áreas CA, RA e

OA, respectivamente. Em cada figura são mostradas duas visualizações diferentes para a mesma informações.

A Figura 6.10 mostra o BBR para a CA, que é área com maior volume de tráfego neste horário das 06h. Em geral, todas as taxas de bloqueio são maiores nessa área específica do que as taxas de bloqueio gerais da rede inteira. O ALWAcS é a solução com menor crescimento de BBR, especialmente com a carga de 250 *Erlangs*. O MHK, A2RSAp1 e A2RSAp2 apresentam taxas de BBR próximos, mas o MHK ultrapassa ambos a partir de 175 *Erlangs*. Com carga de tráfego mais baixa, os intervalos de confiança mostrados no gráfico da Figura 6.10 b) também são mais justos do que aqueles obtidos quando o BBR geral foi avaliado para a Topologia 1.

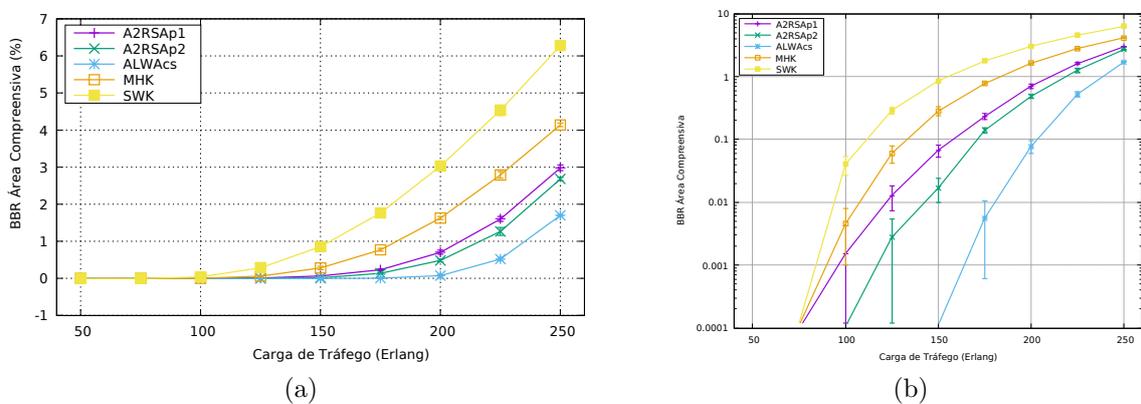


Figura 6.10: Resultado da taxa BBR dos algoritmos na CA da **Topologia 1**, no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Com relação à área RA, a área com o segundo maior volume de tráfego para o horário, o algoritmo A2RSAp2 muda de comportamento, aproximando-se do ALWAcS. Esse resultado é esperado porque o A2RSAp2 aplica a estratégia de selecionar caminhos com a quantidade mínima de nós nas áreas RA e OA. Já o A2RSAp1, que seleciona rotas com a menor quantidade de nós nas áreas OA, mostra um desempenho degradado porque esta estratégia reduz a utilização dos recursos ociosos na área OA. À medida que a carga de tráfego aumenta, o ALWAcS consegue manter o bloqueio reduzido.

Sobre a OA, os resultados da avaliação de desempenho do BBR para as soluções testadas é mostrado nos gráficos da Figura 6.12. A OA é a área que concentra menor volume de tráfego dentre as áreas consideradas na rede metro às 06h. O ALWAcS exibe um desempenho inferior ao do algoritmo A2RSAp2 com todo o intervalo de carga considerado. Uma hipótese vale para esse comportamento é que os enlaces dessa área, geralmente com maior disponibilidade de tráfego devido ao baixo fluxo, são logo exauridos por conexões das áreas com pico de tráfego naquele horário. Assim, como as rotas estabelecidas pelo ALWAcS podem ser mais longas, essas rotas envolverão enlaces sobrecarregados com

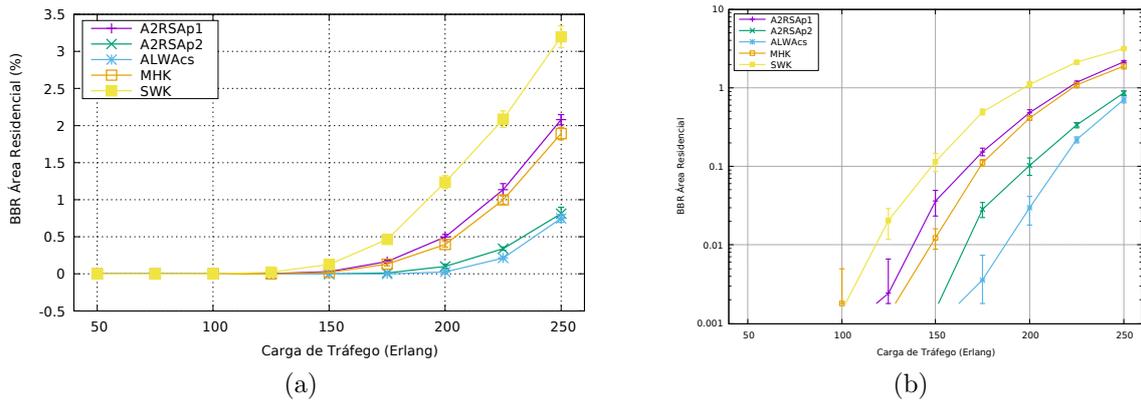


Figura 6.11: Resultado da taxa BBR dos algoritmos na RA da **Topologia 1**, no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala percentual e (b) escala logarítmica.

tráfego. Diferente das demais áreas, quando os algoritmos agnósticos, como o MHK, mostraram bloqueio reduzido, na OA ambos os algoritmos agnósticos mostraram as maiores taxas de bloqueio.

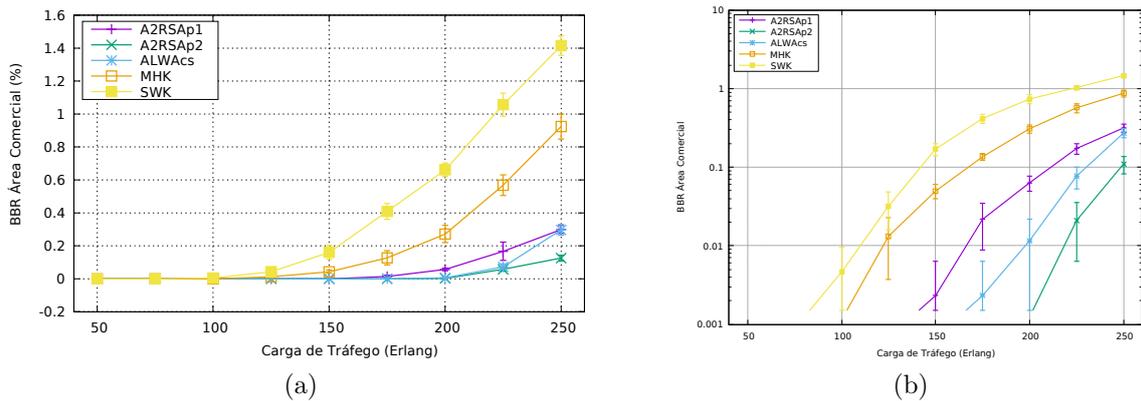


Figura 6.12: Resultado da taxa BBR dos algoritmos na OA da **Topologia 1**, no horário de 06h, sendo mostrado na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

O ALWacs conseguiu reduzir os bloqueio em todas as áreas, mas tendo sido ultrapassado pelo A2RSap2. A solução proposta neste Capítulo foi a mais eficiente na CA e RA, mostrando-se como segunda melhor solução na OA quando a carga na rede é de até 250 Erlangs. Assim, o ALWacs pode ser uma proposta adequada para atender ao compromisso do desempenho e redução do bloqueio, tanto geral quanto por área. Observa-se que todos os algoritmos cientes da área exibem melhores respostas na redução do bloqueio em comparação com as soluções agnósticas das áreas.

6.4 Resumo Conclusivo

Este capítulo aborda o problema da alocação de rota e recursos espectrais baseada no conhecimento das áreas existentes nas MONs. Para representar essas áreas são tratadas topologias de rede metropolitanas que são divididas em três tipos de áreas: compreensivas, residenciais e comerciais. Devido ao característico fenômeno do tráfego de marés, essas áreas exibem diferentes padrões de distribuição da carga do tráfego em períodos do tempo específicos. Os principais problemas decorrentes do fenômeno do tráfego de marés são: *i*) o aumento da taxa de bloqueio nas áreas com pico de tráfego, e *ii*) a ociosidade de recursos nas áreas com vale de tráfego. O algoritmo ALWAcs é proposto para melhorar o desempenho da rede, selecionando caminhos potencialmente maiores para desviar o fluxo de tráfego, enquanto obtém a menor probabilidade de bloqueio de largura da banda em comparação com outras soluções cientes da área. O roteamento com esses caminhos maiores pode distribuir melhor o tráfego, reduzindo o congestionamento nos pontos críticos. A redução na taxa de bloqueio é verificada na rede, como um todo, assim como nas áreas mais afetadas por pico de tráfego. O ALWAcs demonstrou o dobro de ganho em comparação com outro RSA ciente da área ao ser avaliado com carga máxima de 250 *Erlangs*.

Capítulo 7

Engenharia de Tráfego Ciente da Área e do *Cluster*

O Capítulo 6 discorreu sobre o ALWAcS, apresentado como solução alternativa ao A2RSAp1 e A2RSAp2, ambos propostos em [4]. O ALWAcS baseia-se na atribuição de pesos distintos aos nós que formam os enlaces da rede de acordo com cada uma das áreas, a serem configurados de acordo com o horário específico do dia no qual o tráfego dinâmico precisa ser atendido. Dessa forma, o operador da rede é capaz de ponderar os enlaces de acordo com variáveis específicas do seu negócio, tais como o nível de congestionamento do tráfego ou grau de disponibilidade de recursos. Observou-se que o ALWAcS estabelece caminhos com mais saltos do que todas as demais soluções comparadas. A vantagem dessa estratégia é a possibilidade de melhor distribuição do tráfego, reduzindo o congestionamento nos pontos críticos e aproveitando a diversidade de caminhos existentes em redes com topologia em malha. Em alguns casos, o uso de caminhos mais longos pode ser mais vantajoso, especialmente em redes que exploram as informações sobre as localizações das áreas, e adicionalmente podem indicar onde o custo do tráfego em um determinado enlace é alto.

Entretanto, os pesos dos enlaces considerados no cenário de simulação do Capítulo 6 foram obtidos empiricamente, o que pode reduzir a eficácia da solução para cenários diferentes. Outras desvantagens do ponderamento dos enlaces com dados empíricos é que os valores podem se aplicar apenas ao conjunto específico de dados configurados no cenário de simulação do experimento. Portanto, pode ser difícil generalizar valores e intervalos de ponderamento para outros contextos.

Sob essa perspectiva, este Capítulo aborda outra estratégia para solucionar o problema RSA ciente da área, baseada na identificação dos nós menos frequentemente utilizados no estabelecimento de caminhos ópticos em um dado horário na rede. Dois outros algoritmos cientes das áreas são propostos, denominados solução de roteamento ciente das área (*Metro*

Area Aware Routing Solution - MAARS) e dos *clusters* metropolitanos (*Metro Cluster Aware Routing Solution* - MCARS). Em [4] é proposto um algoritmo de roteamento cientes das áreas, que é capaz de reduzir o bloqueio em toda a rede e comparação com soluções agnósticas. A estratégia dos autores baseia-se na tentativa de selecionar rotas com a mínima quantidade de nós das áreas RA e OA, afetadas em horários críticos. Porém, não ficam claros os resultados particulares a cada área/*cluster*. O MAARS e o MCARS são comparados com os algoritmos abordados no Capítulo 6.

Ambas as soluções, MAARS e MCARS, apresentam resultados duas vezes melhor do que o algoritmo ciente apresentado em [4], A2RSAp1 e A2RSAp2, considerando uma carga máxima de 300 *Erlangs*. O MAARS também supera o algoritmo ALWAcs apresentado no Capítulo 6. Além disso, as simulações mostraram que frequentemente o MAARS resulta em melhor desempenho que o MCARS em termos de bloqueio dos serviços. No Capítulo 6 a avaliação de desempenho foi realizada para comparar o BBR geral e por área. Neste Capítulo, adicionalmente será avaliado o BBR por *cluster*.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 7.1 são apresentadas em detalhe as estratégias das soluções MAARS e MCARS, na seção 7.2 são demonstrados os resultados da comparação entre as soluções algorítmicas, enquanto que a seção 7.3 finaliza o capítulo com um resumo conclusivo.

7.1 Soluções de Engenharia de Tráfego Cientes da Área e do *Cluster*

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.

O fenômeno de tráfego de marés na metro, ocasiona o bloqueio de recursos em áreas com maior volume de tráfego enquanto dificulta o aproveitamento de recursos ociosos. A estratégia a ser explorada nesse cenário é a identificação dos nós ociosos para melhorar a distribuição do tráfego ao longo da rede. Assume-se que a ociosidade de recursos é mais presente nos nós que formam os enlaces menos frequentemente utilizados para o estabelecimento de caminhos ópticos. O atendimento do tráfego pelos menores caminhos pode concentrar o tráfego em alguns enlaces devido a restrição dos mínimos saltos, ocasionando fragmentação de recursos espectrais.

A Figura 7.1 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 nós de *clusters* diferentes, como os caminhos em verde e azul. Essa estratégia de caminhos com nós em múltiplos *clusters* pode contribuir com o desafogamento do tráfego, uma vez que é possível passar por locais e horários onde há recursos ociosos. Observa-se que os algoritmos agnósticos não possuem esse tipo de conhecimento.

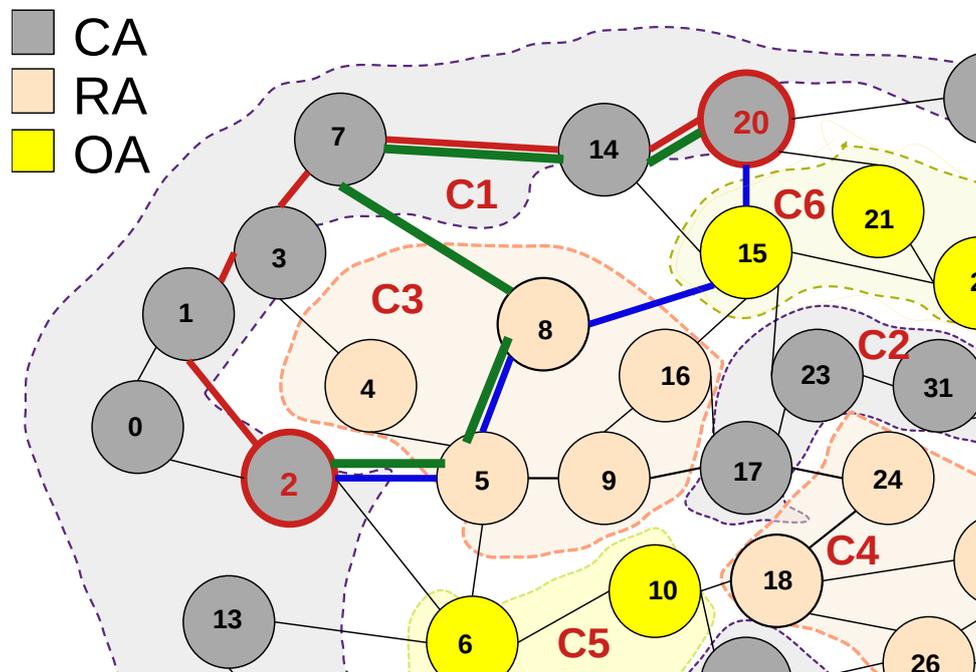


Figura 7.1: Estabelecimento de conexões aos longa das áreas e *clusters* de área

Para fazer o controle de utilização dos nós, inicialmente atribui-se peso 1 a todos os nós da rede, e à medida que um dado nó é selecionado para a composição de um enlace, e uma rota conseqüentemente, seu peso é incrementado em uma unidade. Após algumas rodadas de execução do algoritmo de roteamento, os nós da rede terão pesos diferentes, sendo que aqueles com pesos maiores são os mais utilizados para estabelecimento de rotas.

Uma solução que toma decisões com base no conhecimento sobre as áreas, é capaz de incluir no seu caminho nós que pertençam a outras áreas com potencial ociosidade nos recursos, uma vez que essa área é intersectada por nós de áreas distintas. Com a estratégia apresentada acima, a seleção dos nós menos frequentemente selecionados pode direcionar o tráfego até esses recursos ociosos. Já uma solução de roteamento ciente dos

clusters inicialmente elege caminhos circunscritos na mesma região, reduzindo a latência de atendimento dos serviços (Figura 7.1). Para explicar os algoritmos RSAs propostos neste Capítulo, foram utilizadas as mesmas variáveis definidas na Seção 6.2 do Capítulo anterior.

7.1.1 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). Antes da apresentação dos algoritmos, convém destacar algumas funções empregadas no seu fluxo de execução. Na função $ComputeFrequencyOfUse(G(V, E, W))$, o grafo ponderado com peso 1 é recebido como entrada. Os pesos são atualizados de forma adaptativa à medida que os nós são utilizados no roteamento, seja como nó de origem, destino ou nó intermediário (*bypass*). A saída é o grafo da rede com pesos atualizados. Na função $KSP(G, k, C_s, C_d)$ é definido o algoritmo KSP de Yen [200], que seleciona os k menores caminhos sem *loops*. A referida função recebe como entrada o grafo ponderado, o número k de caminhos a serem selecionados, bem como a origem e o destino dos caminhos, respectivamente C_s e C_d . A saída dessa função é o conjunto de k rotas ordenadas pelo peso mínimo total de frequência de utilização. A função $CompleteSharingSort(P)$ recebe como entrada o conjunto de rotas P . Com esses dados, a função aplica a política CS para ordenar tais rotas pela disponibilidade de espectro mais à direita. A saída dessa função é o conjunto de rotas P ordenado pela política CS. Já a função $SA(p, NumSlots)$ utiliza a política *first-fit* para verificar se há recurso disponível de acordo com as restrições do problema RSA.

A estratégia dos algoritmos é ilustrada na Figura 7.1 e formalizada no Algoritmo 2, sob a perspectiva do MCARS e MAARS. O Algoritmo 2 promove a alocação distribuída de recursos ao longo da topologia. Pretende-se escolher os caminhos compostos por nós estrategicamente menos utilizados, isto é, menos frequentemente selecionados para composição de rotas. Na Figura 7.1, 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 2) 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* [200] 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)[199], 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 2. Para tanto, altera-se as linhas 2, 8, 10 e 12 (conforme informado no Algoritmo 2) 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.

7.1.2 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*, que tem complexidade de $O(k|V|^3)$, portanto $O(2|V| + k|V|^3)$. O *CompleteSharingSort* (linha 13) avalia qual é o menor índice de *slot* disponível entre os

Algoritmo 2 MCARS / MAARS($G = (V, E), r, k, w$)

```
1:  $(v_c^a)_s \leftarrow r.source()$ ,  $(v_c^a)_d \leftarrow r.destination()$ 
2:  $(C_s, C_d) \leftarrow getCluster(((v_c^a)_s), (v_c^a)_d)$  ▷
    $MAARS : (A_s, A_d) \leftarrow getArea(((v_c^a)_s), (v_c^a)_d)$ ,
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 ▷  $MAARS : A_s == A_d$ 
9:    $G \leftarrow ComputeFrequencyOfUse(G(V, E, W))$ 
10:   $P \leftarrow KSP(G, k, C_s, C_d)$  ▷  $MAARS: P \leftarrow KSP(G, k, A_s, A_d)$ 
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
```

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 $O((2|V| + k|V|^3) + (|S| * |E| * k))$.

7.2 Simulação e Análise de Resultados

Os mesmos algoritmos citados no Capítulo 6 foram utilizados para comparação com as soluções MAARS/MCARS. Além disso, o ALWAcS também foi utilizado na avaliação de desempenho. Nas seções à seguir são apresentados o cenário das simulações e a avaliação dos resultados.

Tabela 7.1: Percentual de excedente de carga por área às 10h e 18h.

\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

7.2.1 Cenário das Simulações

Para realização da simulação dos algoritmos foi utilizada a topologia identificada em [4], que é mostrada na Figura 7.2. A referida topologia é formada por 38 nós e 60 enlaces unidirecionais e representa uma metro implantada em Xangai. A rede possui as áreas CA, RA e OA, sendo que cada uma dessas áreas estão divididas em dois clusteres. 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. 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 [4]. 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 7.1 [4] mostra os percentuais de excedentes de carga de tráfego por cada área em alguns horários do dia, definidos adicionalmente ao tráfego geral. Essas informações são utilizadas para realizar a distribuição do tráfego na rede de referência.

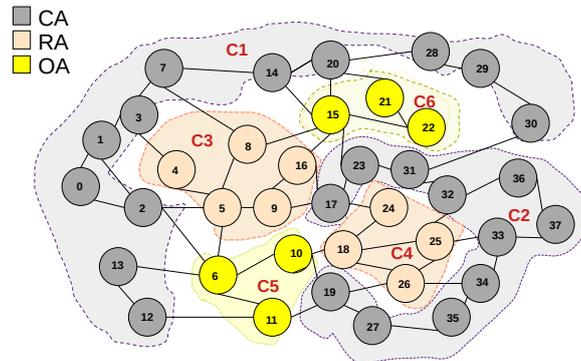


Figura 7.2: Demonstração da variedade de áreas e clusteres de área na cidade de Xangai [4].

Foram configuradas 100.000 chamadas dinâmicas de acordo com a distribuição de *Poisson* e um número de 50 a 500 chegadas, com incrementos de 50. Todas as conexões são bidirecionais e os nós de origem e destino das solicitações são selecionados aleatoriamente. A largura de banda solicitada é aleatória entre [1, 2, 3] *slots* de frequência, cuja distribuição das requisições se dá na proporção 4 : 2 : 1. 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, da mesma forma como definido no cenário do Capítulo anterior.

7.2.2 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 proposta no Capítulo 6, e os complementares A2RSAp1 e A2RSAp2 [4]. 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 [4], bem como com o CS [199]. A métrica definida para comparação foi BBR das requisições, que será abordada de forma geral na rede como um todo, BBR específico por área, e BBR por *cluster* de área, apresentados à seguir. Destaca-se que, enquanto [4] aborda como métrica principal o BBR geral da rede, este trabalho adicionalmente estuda o BBR específico por cada área da topologia, bem como por *clusters*, a fim de verificar as diferenças de comportamento dessas soluções sob diferentes perspectivas.

Taxa de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) Geral

Os gráficos mostrados na Figura 7.3 e 7.4 mostram os resultados de BBR geral para cada nível de carga da rede no horário de 10h (Figura 7.3) e 18h (Figura 7.4). 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.

Conforme pode ser visto no horário de 10h (Gráficos da Figura 7.3), as diferenças nas taxas de bloqueio começam a ser mais perceptíveis a partir da carga de 150 *Erlangs*. Tanto o MAARS quanto o MCARS conseguem conter o bloqueio até uma carga de aproximadamente 200 *Erlangs*. Nesta faixa de carga os ganhos chegam até 3 ordens de grandeza em comparação com as outras soluções. Isto indica que, quando a carga relativamente menor, as soluções propostas neste trabalho conseguem melhor aproveitar os enlaces ociosos quando selecionam esses recursos menos utilizados. Neste horário das 10h, a maior sobrecarga de tráfego penaliza a OA, que potencialmente apresenta os enlaces mais utilizados e a disputa por recursos é maior. Os algoritmos A2RSAp1 e A2RSAp2 inicialmente apresentam ligeiras diferenças de comportamento, mas com o aumento da carga essas diferenças tendem a diminuir. A principal razão é que, como o A2RSAp1 seleciona rotas com menos nós na OA e o A2RSAp1, seleciona rotas com o mínimo de

nós na OA e RA, todas as rotas são estabelecidas ao longo da CA e RA. Com isso, os mesmos enlaces tendem a ser utilizados sempre que uma rota é criada, até que os recursos espectrais não sejam mais suficientes para atender uma dada demanda.

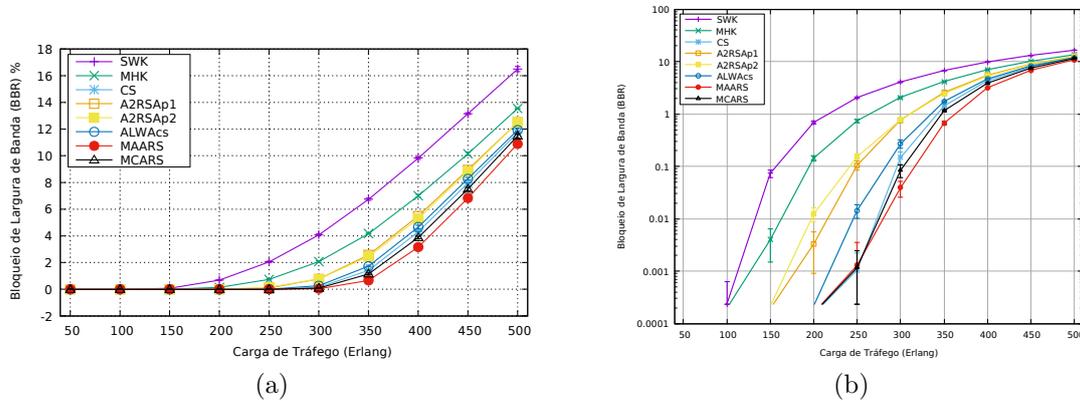


Figura 7.3: Taxa de bloqueio de largura de banda geral dos algoritmos com $k = 3$ no horário de 10h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Para o horário das 18h os resultados de BBR geral são similares. O MAARS apresenta a melhor redução de bloqueio, distanciando-se mais dos resultados do MCARS. Ambos os algoritmos começar a apresentar bloqueio a partir da carga de 250 *Erlangs* neste horário, enquanto às 10h os bloqueios começaram a ocorrer com carga aproximada de 200 *Erlangs*. Outro ponto a ser observado é que, enquanto às 10h o A2RSAp1 tem menor bloqueio em relação ao A2RSAp2 com cargas menores, às 18h essa relação se inverte às 18h. O *Complete Sharing* (CS) é o algoritmo agnóstico que resulta em menor bloqueio, conseguindo superar o A2RSAp1 e o o A2RSAp2.

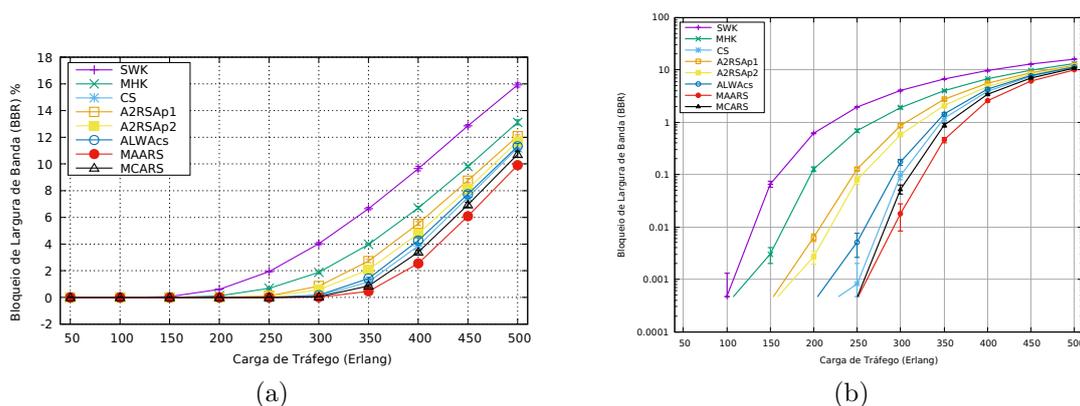


Figura 7.4: Taxa de bloqueio de largura de banda geral dos algoritmos com $k = 3$ no horário de 18h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Nos dois horários analisados, a política MAARS apresentou resultados duas vezes melhores com relação à redução do bloqueio geral em comparação com os algoritmos ag-

nósticos. Além disso, a mudança de horário não influencia o comportamento do MAARS e MCARS, como ocorre com os demais algoritmos cientes da área. Com o aumento da carga na rede, torna-se mais vantajoso utilizar as estratégias propostas neste trabalho. O ALWAcS, apesar de ser ciente da área, tem uma taxa de bloqueio maior que o algoritmo agnóstico CS. Em ambos os horários, tanto o MAARS quanto o MCARS são melhores soluções do que o A2RSAp1 e A2RSAp2, demonstrando que, para a melhoria de desempenho geral na rede, selecionar rotas com nós e enlaces menos utilizados, pode ser uma tática bem sucedida na distribuição do tráfego na rede do que a minimização do número de nós nas áreas residenciais e de negócios.

Taxa 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. O objetivo é analisar o impacto das políticas de verificação por área e por *cluster* de área em relação ao bloqueio pontual nas áreas. Avaliar o BBR por área é uma das principais propostas deste trabalho, uma vez que não foi identificada a aferição desta métrica nos outros trabalhos que apresentam heurísticas cientes das áreas. Na CA os resultados são mostrados nos gráficos da Figura 7.5, para as 10h. Em geral, os bloqueios na CA são maiores do que o bloqueio geral observado anteriormente. O MHK, que no cenário geral representa o segundo pior resultado com as cargas mais altas, na CA as taxas de bloqueio são bem menores, com resultados muito próximos aos obtidos pelos algoritmos cientes A2RSAp1 e A2RSAp2.

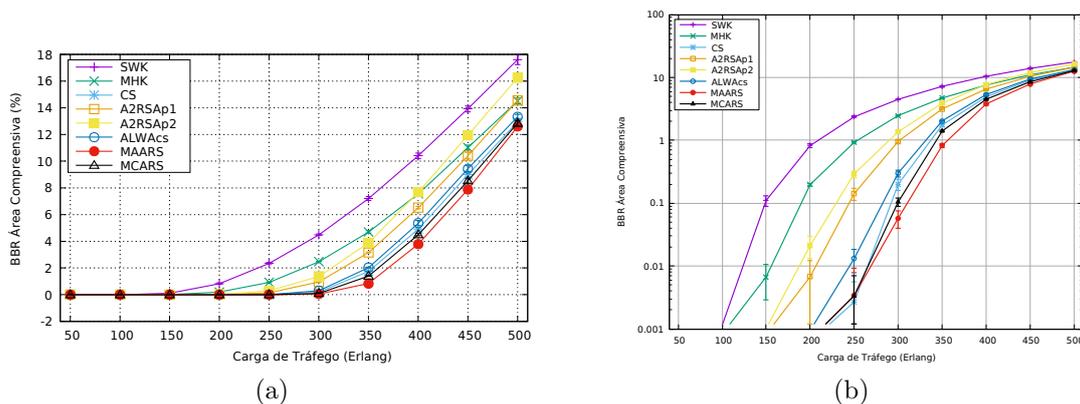


Figura 7.5: Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área intermediária (CA) no horário de 10h mostrados na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Com relação ao horário das 18h, conforme mostra os resultados nos gráficos da Figura 7.6, os resultados das taxas de bloqueio foram menores do que os observados para 10h, com uma diferença bem maior do que a diferença observada no cenário de bloqueio geral.

Com a carga mais baixa, o MAARS resulta em menor bloqueio do que o MCARS, embora as diferenças sejam pequenas. Além disso, ambos os algoritmos começam a apresentar as primeiras taxas de bloqueio com carga mais alta do que às 10h. Diferente do que foi observado às 10h, no horário das 18h o MHK exibe um comportamento pior do que o A2RSAp1 e A2RSAp2.

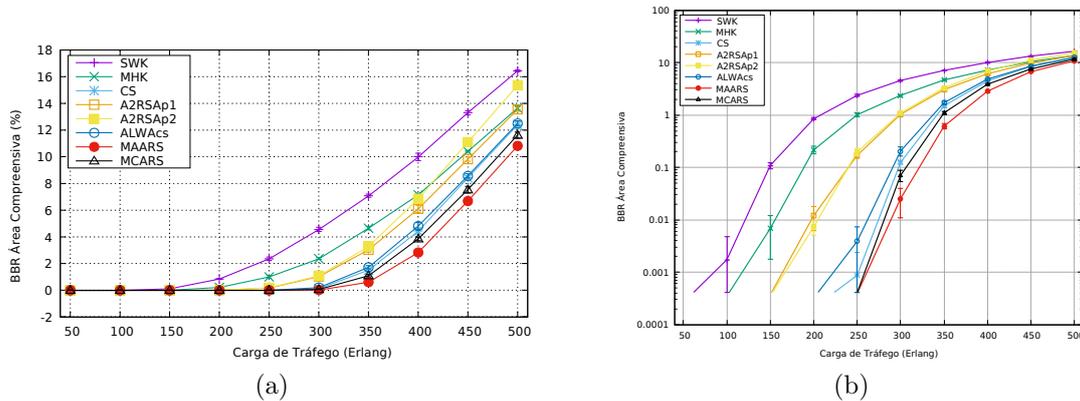


Figura 7.6: Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área intermediária (CA) no horário de 18h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Na RA, cujos resultados são mostrados nos gráficos da Figura 7.7 para o horário das 10h, o MAARS e o MCARS continuam mantendo os melhores desempenhos, sendo que é o MAARS que consegue conter o bloqueio de largura de banda até uma carga de 300 *Erlangs*, com ganhos de até duas ordens de grandeza. É observado que, mais uma vez, o A2RSAp2 apresenta uma mudança de comportamento, mostrando-se melhor na redução do bloqueio em comparação com o A2RSAp1. É importante ressaltar que o A2RSAp2 minimiza a utilização de nós das áreas residenciais e comerciais, sendo por esse motivo, uma possível alternativa para essa área. Entretanto, nesse horário das 10h, a área RA é a menos afetada por picos de tráfego. Com a carga mais alta, os algoritmos SWK e A2RSAp1 apresentam comportamento muito similar, indicando que não há diferenças entre essas soluções agnóstica e ciente da área. No cenário da RA às 10h, o MAARS atinge o menor limite superior de taxa de bloqueio em comparação com o que foi observado na CA e no cenário geral da rede.

Em relação ao horário das 18h na RA, os gráficos na Figura 7.8 mostram que todas as taxas de bloqueio estão mais altas do que o que foi observado às 10h. Este comportamento reflete exatamente o que ocorre nessa área nesses dois pontos do tempo. Às 10h as residências já não concentram tantos moradores porque, em geral, as pessoas tendem a se deslocar para os seus locais de trabalho entre 7h e 9h. Entretanto, com o final do dia de trabalho, o retorno dos moradores para a RA ocorre de maneira mais concentrada às 18h. Devido a isso, o MHK e o A2RSAp1 alternaram de comportamento nos testes com

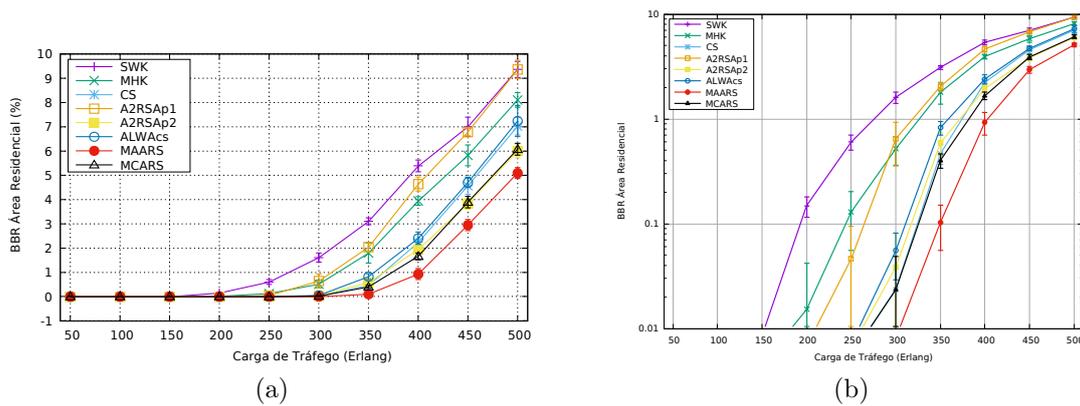


Figura 7.7: Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área residencial (RA) no horário de 10h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

algumas cargas de tráfego, indicando que a seleção da menor rota ou a minimização do número de nós da OA são políticas que resultam em leves diferenças nas taxas de bloqueio. O MCARS começa a ser penalizado com bloqueio a uma carga menor do que o MCARS, mas exibindo os mesmos comportamentos observados na CA e no cenário da rede como um todo.

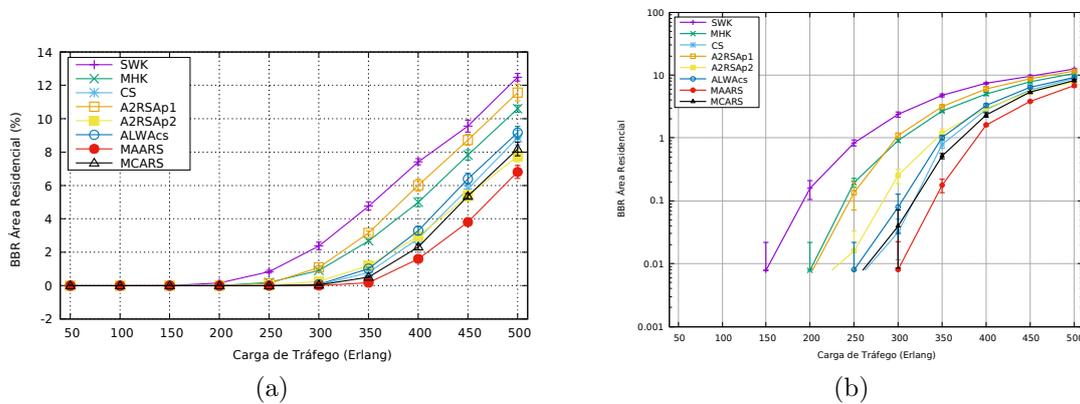


Figura 7.8: Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área residencial (RA) no horário de 18h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Os próximos resultados, mostrados nos gráficos da Figura 7.9, para as 10h, indicam o estado da área mais afetada por pico de tráfego nesse horário. Devido a isso, todos os resultados de bloqueio são os mais elevados em relação aos resultados observados até aqui. As políticas MAARS e MCARS atingem resultados próximos aos dos algoritmos A2RSap2 e A2RSap1, respectivamente, quando a carga vai se elevando. Porém, ambos, MAARS e MCARS são os mais tolerantes a bloqueios. O MCARS resulta em maior bloqueio de largura de banda do que o A2RSap1 com carga de 500 Erlangs, sendo o segundo pior

algoritmo ciente da área neste horário das 10h. O MAARS é melhor do que o algoritmo A2RSAp2 até uma carga de 450 *Erlangs*.

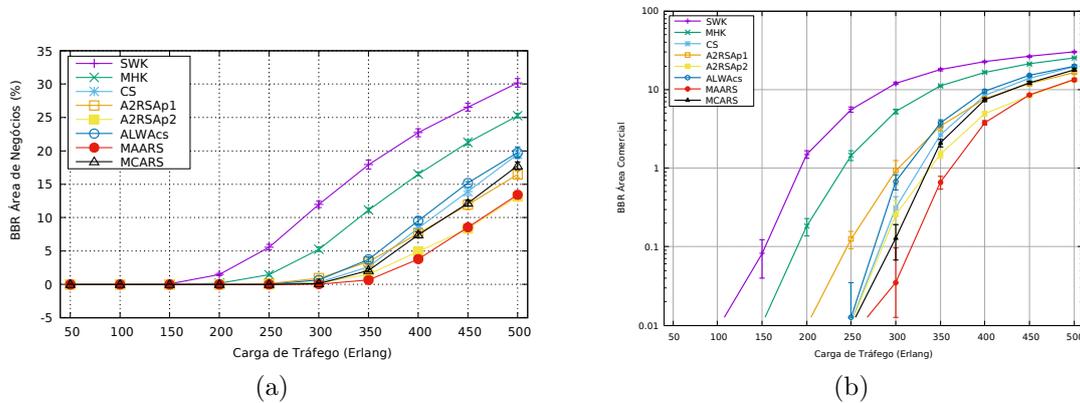


Figura 7.9: Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área de negócios (OA) no horário de 10h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Já para o horário das 18h, o comportamento dos algoritmos é similar ao observado às 10h na OA. A principal diferença é que o MAARS demonstra a maior redução de bloqueio com todos os valores de carga analisados. Já o MCARS mostra-se o segundo algoritmo mais eficiente até uma carga de aproximadamente 350 *Erlangs*.

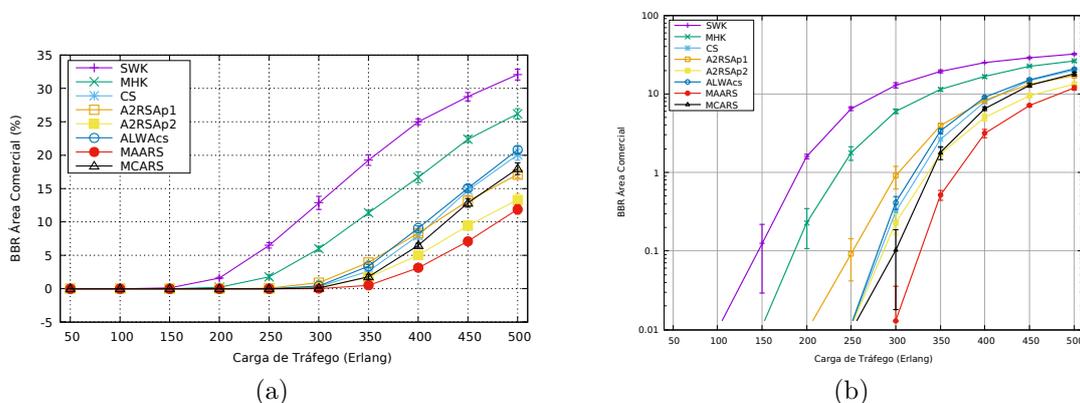


Figura 7.10: Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) na área de negócios (OA) no horário de 18h na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

A análise do BBR nas áreas CA, RA e OA, indica uma grande variabilidade e mudança de comportamento do A2RSAp1 e A2RSAp2 nos dois horários verificados, enquanto o MAARS e MCARS têm exibido o mesmo comportamento, com maior destaque para o MAARS, que resultam na menor taxa de bloqueio em todos os cenários. As taxas de bloqueio que foram observadas pontualmente por área, também estão acima da média observada na rede como um todo.

Taxa de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) Por *Clusteres*

A maneira mais detalhada de aplicar as estratégias de roteamento é considerando-se as regiões da topologia como *clusteres*. A simulação realizada neste trabalho também levou em consideração os *clusteres* configurados na quantidade e sequência mostrada na Figura 7.2. Como às 10h há uma maior predominância de aumento do tráfego na área OA, devido ao horário comercial, selecionou-se alguns resultados entre *clusteres* dessa área para prosseguimento da análise. Entretanto, foram gerados resultados entre todas as unidades de *clusteres*, com resultados similares.

O gráfico na Figura 7.11 exibe os resultados da taxa de bloqueio de largura de bandas das requisições com origem e destino no *cluster* 5, que faz parte da OA. O MCARS, que usa informações dos *clusteres* para tomada de decisão, apresentou um desempenho bem similar ao MAARS, e as diferenças percentuais entre ambos foram as mínimas observadas nos experimentos. Porém, o MAARS se sobressai com cargas mais altas, enquanto o MCARS passa a apresentar bloqueios mais altos em comparação com o A2RSAp1 neste cenário com carga de 500 *Erlangs*. Com carga mais leve, ocorre a sobreposição de resultados de alguns algoritmos, conforme observa-se com o A2RSAp1 e A2RSAp2, assim como com o ALWAcS e o CS.

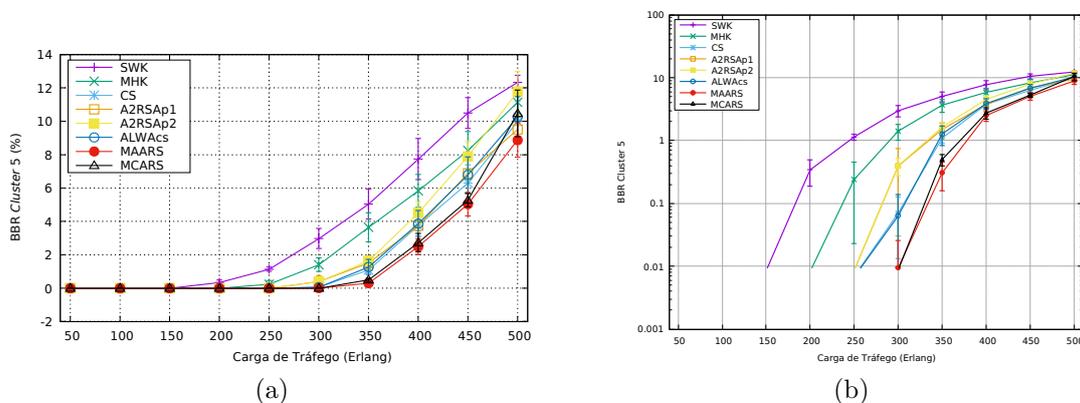


Figura 7.11: Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) no horário de 10h no *cluster* 5, na OA na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Já os gráficos na Figura 7.12 mostram os resultados do BBR para as requisições entre os *clusteres* 6 e 5 no horário das 10h, sendo ambos os *clusteres* pertencentes à OA. Nesse cenário, as taxas de bloqueio estão entre as mais elevadas em comparação com as taxas percebidas na avaliação do BBR geral e BBR por área. O MAARS é capaz de evitar bloqueios enquanto a carga na rede está abaixo de 300 *Erlangs*, e com o aumento da carga, ainda é a solução que resulta em menores taxas de bloqueio, embora com ligeiras diferenças em comparação com o A2RSAp2. Isto ocorre porque, para o MAARS, mesmo

que sejam conhecidos os nós dos *clusters*, que são origem e destino da conexão, de fato o estabelecimento desses caminho ocorrerá por meio dos enlaces externos à área comercial, devido ao pico de tráfego momentâneo nessa região. O A2RSAp2 usa a estratégia da seleção de rotas com minimização do número de nós na RA e OA para balancear o tráfego roteando-o ao longo da CA. Por outro lado, o MCARS, que começa a bloquear com uma carga de 250 *Erlangs*, logo apresenta uma perda de desempenho, sendo superado tanto pelo A2RSAp1 e A2RSAp2.

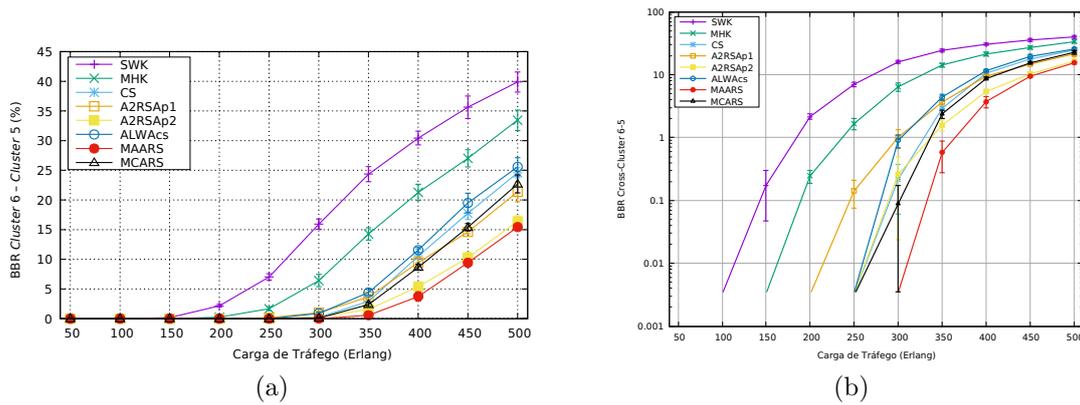


Figura 7.12: Taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) no horário de 10h entre *clusters* 6-5, ambos na OA, mostrados na (a) escala linear e (b) escala logarítmica.

Para o horário das 18h os resultados encontrados são similares aos observados às 10h, porém, com resultados menores de bloqueio. Com relação aos demais *clusters*, que são pertencentes às áreas cujo volume de tráfego é inferior, nestes respectivos horários, o comportamento dos algoritmos também foi similar, sendo que os valores de taxas de bloqueio são significativamente menores. A partir desses resultados, verifica-se que o MAARS é uma boa solução a ser aplicada para melhor utilização dos recursos em um mesmo *cluster* de área, enquanto que, na maioria dos casos, o MCARS é a segunda melhor solução, que resulta em potencialmente menor taxa de bloqueio.

7.3 Resumo Conclusivo

Este capítulo aborda o problema da alocação de rota e recursos espectrais ciente da área em MONs, considerando as segmentações da topologia da rede em áreas 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 RSA ciente da área as quais são denominadas solução de roteamento ciente das área MAARS, e solução de roteamento ciente dos *clusters* de área e MCARS. Ambas as estratégias

foram comparadas com os algoritmos igualmente cientes ALWAcs [204] (Capítulo 6), e os complementares A2RSAp1 e A2RSAp2 [4]. 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 [4], bem como com o CS [199]. O MAARS e MCARS apresentam os mesmos comportamentos e melhores resultados em todos os cenários e horários avaliados, sendo que MCARS pode apresentar um desempenho ruim com cargas mais altas em *clusters* de área com pico de tráfego. Com tais soluções, a redução na taxa de bloqueio é verificada na rede, como um todo, nas áreas específicas, bem como nos respectivos *clusters*. A grande variabilidade de comportamento do A2RSAp1 e A2RSAp2 mostra que, nos mesmos cenários, as diferenças percentuais nas taxas de bloqueio podem ser amplamente discrepantes tanto quanto tais resultados podem se inverter.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

O ecossistema das redes metros tem passado por várias mudanças nos últimos tempos, deixando de ser um segmento estático com clientes que demandam banda mínima, e tornando-se a principal provedora de recursos de telecomunicações para muitos dos novos negócios que estão surgindo [24]. Dentre os principais atores neste cenário, operadoras de rede, provedores de nuvem e provedores de rede móveis, despontam como mais interessados nesse processo de mudança [205]. A razão clara é que, com a distribuição dos recursos de rede e computação ao longo dos vários níveis de infraestrutura da rede, estão surgindo novos pontos estratégicos de negócio que requerem esforços contínuos de melhoria. Os serviços de computação de borda estão sendo posicionados em PoPs, mais próximo dos usuários, de modo a suportar o repentino aumento de demanda desses usuários, bem como o abrupto surgimento de distintos padrões de tráfego. Para escolher esses locais exatos, especialmente no que se refere a novos projetos de implantação e escalabilidade de recursos, o comportamento humano tem representado um forte indicador [192], possibilitando diferentes níveis de sofisticação de equipamentos implantados, com heterogeneidade de diversas gerações de equipamento [38]. Assim, nem todos os nós da rede precisam ser compostos pelos mesmos tipos de equipamentos, o que leva à redução do custo do serviço por *bit*. Os servidores na borda da rede serão alimentados, principalmente, por dados dos veículos autônomos, os recursos utilizados em IoT no âmbito de vários negócios e a disseminação de aplicações de vídeo e *streaming* a partir de qualquer lugar [8]. Devido aos vários requisitos exigidos nessa nova realidade, tais como menor latência, maior precisão de resultados e melhor experiência do usuário, além da computação de borda a comunicação com mínimos saltos tem difundido a necessidade por outros subníveis de computação na rede, como computação de nevoeiro, redes veiculares baseadas em nuvem, computação de borda de multi-acesso, com relevante densificação e distribuição de recursos de computação ao longo dos usuários [8].

Ao longo dessa discussão, o ponto chave que permeia toda essa cadeia de eventos é

a localização do usuário. Os locais frequentados pelas pessoas que consomem os novos serviços, descobertos quase que instantaneamente, tem possibilitado o estudo de ilhas de alta carga de tráfego, a princípio nas redes de acesso, mas principalmente ao longo da rede metropolitana. Em geral, a descoberta dessas regiões tem trazido elevada contribuição para os operadores que, conseqüentemente, tornam-se capazes de estimar as demandas vindouras [5, 7], e assim, provisionar servidores de borda de baixa carga e servidores de borda de alta carga [206]. É devido aos padrões de mobilidade e comportamento humano ao longo do tempo e do espaço que se pode delinear as flutuações no tráfego de dados, de acordo com o que foi discutido nos Capítulos 6 e 7, e assim determinar modelos que ajudem a entender como os recursos na rede são consumidos de forma tão desigual, mediante o tráfego de marés das aplicações.

A análise da mobilidade humana, que recentemente era assunto de interesse restrito das redes de portadoras móveis, tornou-se um campo de possibilidades de pesquisa para outras vertentes de telecomunicações, que incluem desde redes *wi-fi* [193] até redes de centro de dados regionais [52, 207]. Para adaptar-se, no âmbito das MONs, uma variedade de novas arquiteturas têm sido propostas, conforme demonstrado neste trabalho (Capítulos 3 e 4), possibilitando um fértil panorama de combinação e experimentação, tais como: interoperabilidade de sistemas de transmissão e de equipamentos de fornecedores distintos, bem como entre equipamentos de diferentes gerações, desagregação parcial e total da rede e seus elementos e sistemas operacionais de rede *open-source* capazes de integrar com rapidez e simplicidade componentes modulares para escalar a infraestrutura [34, 205, 134]. Como muitas dessas pesquisas ainda são recentes, metade das arquiteturas MONs mais recentes ainda não foram investigadas além dos próprios grupos que as propuseram. A partir do levantamento dessas arquiteturas, conclui-se que as pesquisas estão voltadas para encontrar novas maneiras de utilizar e otimizar recursos de *hardware* e *software* que já estão implantados e em operação atualmente na indústria, juntamente com novos equipamentos que ainda precisam ser fabricados

Embora a comunidade de pesquisa e o mercado/indústria de redes de telecomunicações ajam sobre os mesmos interesses, há neste cenário uma separação de papéis. Outro grande desafio no alvo dessas comunidades de pesquisa é manterem-se livres para escolher tecnologias vencedoras e priorizar o espaço do problema de acordo com as previsões para o futuro, mas ainda considerando todas as combinações possíveis de cenários de implantação buscadas pela indústria, mostrando-se, neste sentido, agnósticas quanto à forma como esse mercado se comporta. E cabe à indústria selecionar o que é viável para implantação dentro dos seus esforços, do retorno esperado e da sua realidade [134].

Assim, as principais lições aprendidas com este trabalho foram as seguintes:

- O ecossistema metropolitano de rede ópticas hospeda a fração dominante, mas ainda

crescente, do tráfego em nuvem, dos serviços em expansão de 5G/6G, aplicações de IoT, realidade virtual e realidade aumentada. São essas aplicações que mais demandarão capacidade e baixa latência, desafiando os provedores quanto ao custo e avanços tecnológicos nos próximos anos nesse segmento [12].

- Devido ao nível avançado das pesquisas e quantidades de trabalhos relacionados, a arquitetura MEON é a mais promissora para ser implantada no futuro. Dentre todas as arquiteturas recentes identificadas, MEON obteve maior interesse pela comunidade de pesquisa [102], também demonstrado no Capítulo 4.
- É possível alcançar uma redução significativa nos custos de mudança de equipamentos na infraestrutura de rede de transporte metropolitano, mas reduzir o custo apenas com equipamentos específicos continua sendo um desafio significativo. É por isso que novas arquiteturas estão sendo propostas [134].
- O avanço no desenvolvimento de transponders mais robustos é limitado principalmente pelos sistemas de processamento de sinal digitais, que ainda não controlam certos limiares de parâmetros da camada física, como a dispersão na fibra, por exemplo. Assim, é difícil alcançar o ajuste fino de banda requerido por alguns dispositivos ópticos, atingindo conseqüentemente o desenvolvimento de comutadores ópticos com novas variações de janelas de transmissão [54, 208]. Esses são os principais entraves para o aumento da capacidade nesse tipo de equipamento.
- A próxima geração de MONs deverá ser baseada em vários níveis hierárquicos, com variação de custos por nível e diversos graus de convergência [149, 56], assim como deverá ter sua infraestrutura separada de acordo com os papéis que cada nó representa para os negócios [209]. Um cenário como este resultará em enormes complexidades para o provedor de rede.
- As MONs terão, pelo menos uma porção da sua infraestrutura sendo do tipo FL. A motivação será principalmente o custo e simplicidade de operação [73]. É assim que surgirão as primeiras MONs do tipo sFL em operação no mercado.
- Arquiteturas com múltiplas bandas de transmissão proporcionam o aumento da capacidade ao custo de uma maior quantidade de dispositivos implantados. A escolha por este tipo de arquitetura pode dobrar a necessidade por espaço físico e aumento dos custos com manutenção para dissipar o calor dos equipamentos, por exemplo, entre outras questões.
- O estudo das áreas afetadas por tráfego de dados flutuante é um importante indicador de padrões de tráfego, fornecendo informações que podem ser aproveitadas para tomadas de decisão mais eficientes em um ambiente de tráfego dinâmico. Essas

soluções sempre são mais vantajosas do que as soluções que não são baseadas na localidade [4]. O campo da engenharia de tráfego em MONs não é o primeiro a seguir por essa perspectiva. Porém, devido à quase inexistência de estudos sobre o tráfego de marés em redes metropolitanas, novos modelos precisam ser desenvolvidos para melhor descrever o comportamento dos fluxos de tráfego. Somente o aprofundamento das pesquisas nessa temática, bem como, o amadurecimento com maior precisão e objetividade.

- Com relação ao tráfego de marés, a redução do bloqueio na rede como um todo não reflete em reduções pontuais por área.
- A estratégia de aproveitamento dos nós menos utilizados possui um desempenho duas vezes melhor, no pior caso, do que outras soluções cientes das áreas, em cenários com carga máxima em torno de 300 *Erlangs*. Entretanto, essa estratégia pode não se adequar para alguns tipos de perfis ou classes de tráfego, devido ao aumento da latência.
- A identificação das áreas e sub-áreas em redes metro é uma tarefa bem complexa, influenciada fortemente pela organização geográfica dos espaços, pelos hábitos culturais, pelo nível de desenvolvimento da metrópole e pelo comportamento/atividades das pessoas que habitam essas regiões [4, 192, 204]. Assim, cada solução bem sucedida proposta nestas condições, deverá ser personalizada antes de ser testada em cada rede específica.
- Os modelos de tráfego de marés identificados (OTTM e MSTM) para a rede metro óptica ainda não conseguem representar a grande variabilidade desse tráfego. Esses modelos é que determinam os parâmetros para a escolha do RSA adequado.

Tais conclusões foram obtidas com essa Tese, após a realização de estudo e análise das arquiteturas MONs recentemente propostas, e a partir disto, identificação da arquitetura potencialmente mais promissora, para que então fossem exploradas as políticas de engenharia de tráfego baseadas nas áreas da metro.

8.1 Trabalhos Futuros

São propostas algumas linhas de pesquisa para cada um dos estudos desenvolvidos. Os Capítulos 3 e 4 trouxeram várias propostas de arquiteturas MONs destacadas na literatura. Entretanto, algumas limitações são deixadas como trabalhos futuros. A principal delas é a comparação entre as propostas de maneira a identificar aspectos comuns de forma que se possa identificar o nível de similaridade entre essas arquiteturas. Até o pre-

sente momento esta é uma tarefa complexa devido a disparidade de trabalhos de pesquisas focados nas arquiteturas. Adicionalmente, não existem outras avaliações de desempenho, sobre algumas das arquiteturas, além daquelas apresentadas pelos próprios autores que as propuseram inicialmente. Outra questão importante é que, enquanto existem trabalhos comparando custo e certos aspectos de desempenho entre duas ou três arquiteturas, incluindo-se nessa conta as arquiteturas legadas, ainda não há uma resposta comparativa com todas as arquiteturas elencadas. Também não há um estudo comparando as arquiteturas por categorias, isto é, comparando todas as arquiteturas do tipo FL ou sFL. O Capítulo 3 apresenta limitações relacionadas a delimitação da base de referências sobre as arquiteturas multicamadas. Isto ocorre porque alguns dos trabalhos sobre redes metro utilizam modelos de redes de núcleo nos seus estudos.

Já os Os Capítulos 6 e 7 refletiram sobre o estudo de técnicas de engenharia de tráfego cientes da localização das áreas afetadas por tráfego de marés nas MONs. Há ainda mais desafios a serem enfrentados a respeito dessa questão, principalmente porque o tema pode ser tratado de maneira diferenciada para cada tipo de rede e de local de implantação. Não há uma base com informações de tráfego de dados atualizada. Assim, muitos trabalhos focam em dados sintéticos ou desatualizados. As topologias de rede metropolitanas mudaram mais rapidamente do que as topologias de rede de núcleo, principalmente no que se refere ao número de nós, tipos de papéis desses nós e suas localizações. Apesar disso, há menos modelos de redes e topologias metro disponíveis para estudo do que de redes de núcleo, sendo que em alguns casos essas topologias não são completamente publicadas devido a restrições de confidencialidade industrial [59]. As soluções apresentadas foram baseadas em apenas uma arquitetura (arquitetura MEON) de classificação WSON. Dentro dessa classificação há ainda outras arquiteturas que precisam ser analisadas. Da mesma forma, há ainda as categorias FL e sFL que também concentram várias outras arquiteturas. Devido as suas restrições de infraestrutura, sabe-se que o tráfego de dados não pode ocorrer da mesma forma em todos os seus nós. O problema das estratégias de engenharia de tráfego cientes da área precisa ser explorado também nesse contexto. Adicionalmente, A caracterização do tráfego de marés também é algo que precisa ser melhor explorado na literatura. A geografia das metrópoles, dentro de uma mesma região, é heterogênea e diversificada, não possibilitando muitas vezes as divisões em áreas e *clusters* regulares como os apresentados em [4]. Este cenário torna-se mais complexo quando o problema é estendido para incluir as classes e perfis de tráfego em cada uma das áreas de zoneamento heterogêneo da metro.

Referências

- [1] Hughes, Mark: *Modified Chalcogenide Glasses for Optical Device Applications*. Tese de Doutoramento, maio 2007. xii, 11
- [2] López, Víctor e Luis Velasco: *Elastic optical networks*. Architectures, Technologies, and Control, Switzerland: Springer Int. Publishing, 2016. xii, 10, 12, 29, 30
- [3] Lin, Wei, Chaoqin Gan, Yuanyuan Chen, Yaqin Guo e Nianfei Zhan: *Three-dimensional grid architecture supporting discretionary direct communication among optical network units in metro-access networks*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(12):613–623, 2019. xiii, 11, 22, 26, 80, 81, 82, 94, 96, 99, 101, 103
- [4] Yan, Boyuan, Yongli Zhao, Wenzheng Chen e Jie Zhang: *Area-aware routing and spectrum allocation for the tidal traffic pattern in metro optical networks*. *IEEE Access*, 8:56501–56509, 2020. xiii, xiv, xv, 5, 13, 26, 34, 75, 77, 78, 94, 99, 101, 105, 106, 108, 110, 117, 118, 126, 127, 133, 134, 135, 139, 143, 144, 149, 150, 158, 162, 163
- [5] Yan, Boyuan, Yongli Zhao, Xiaosong Yu, Wei Wang, Yu Wu, Ying Wang e Jie Zhang: *Tidal-traffic-aware routing and spectrum allocation in elastic optical networks*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(11):832–842, 2018. xiii, 5, 34, 75, 76, 77, 78, 94, 99, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 116, 118, 126, 134, 135, 160
- [6] 2020, European Commission Horizon: *Metro-haul project*. <https://metro-haul.eu/>. xv, 26, 87, 94, 106, 107
- [7] Zhu, Qingcheng, Yuqiao Wang, Xiangyu Meng, Yongli Zhao, Xiaosong Yu e Jie Zhang: *Machine learning based traffic-aware service reconfiguration in metropolitan area networks*. Em *2019 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS)*, páginas 659–663. IEEE, 2019. 1, 46, 69, 99, 107, 160
- [8] Rejiba, Zeineb, Xavier Masip-Bruin e Eva Marín-Tordera: *A survey on mobility-induced service migration in the fog, edge, and related computing paradigms*. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(5):1–33, 2019. 1, 15, 16, 17, 159
- [9] Jia, Zhensheng e L Alberto Campos: *Coherent optics ready for prime time in short-haul networks*. *IEEE Network*, 35(2):8–14, 2021. 1, 44

- [10] Paolucci, F, R Emmerich, A Eira, N Costa, J Pedro, P Wilke Berenguer, C Schubert, JK Fischer, F Fresi, A Sgambelluri *et al.*: *Disaggregated edge-enabled c+l-band filterless metro networks*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 12(3):2–12, 2019. 1, 20, 25, 82, 84, 94, 96, 97, 100, 103
- [11] Paolucci, F., R. Emmerich, A. Eira, N. Costa, J. Pedro, P. Wilke Berenguer, C. Schubert, J. K. Fischer, F. Fresi, A. Sgambelluri e F. Cugini: *Disaggregated edge-enabled c+l-band filterless metro networks*. Journal of Optical Communications and Networking, 12(3):2–12, 2020. 1, 10, 94
- [12] Layec, P., A. Dupas, D. Verchère, K. Sparks e S. Bigo: *Will metro networks be the playground for (true) elastic optical networks?* Journal of Lightwave Technology, 35(6):1260–1266, March 2017, ISSN 0733-8724. 1, 3, 44, 45, 47, 67, 94, 100, 126, 161
- [13] Nance Hall, Matthew, Klaus Tycho Foerster, Stefan Schmid e Ramakrishnan Durairajan: *A survey of reconfigurable optical networks*. Optical Switching and Networking, 41:100621, 2021. 1, 41, 74
- [14] Muqaddas, Abubakar Siddique, Rodrigo Stange Tessinari, Ramon Casellas, Miquel Garrich, Emilio Hugues-Salas, Oscar Gonzalez de Dios, Lourdes Luque, Alessio Giorgetti, Andrea Sgambelluri, Filippo Cugini *et al.*: *Nfv orchestration over disaggregated metro optical networks with end-to-end multi-layer slicing enabling crowd-sourced live video streaming*. Journal of Optical Communications and Networking, 13(8):D68–D79, 2021. 2
- [15] Sarmiento, Samael, Salvatore Spadaro e Jose A. Lazaro: *Cost-effective roadm design to maximize the traffic load capacity of u-dwdm coherent metro-access networks*. Optical Switching and Networking, 30:53–61, 2018. 2, 74
- [16] Le, Giap, Sifat Ferdousi, Andrea Marotta, Sugang Xu, Yusuke Hirota, Yoshinari Awaji, Massimo Tornatore e Biswanath Mukherjee: *Reliable provisioning for dynamic content requests in optical metro networks*. Em *Optical Fiber Communication Conference*, páginas W1F–2. Optica Publishing Group, 2021. 2
- [17] Suzuki, Naoki, Hiroshi Miura, Keita Mochizuki e Keisuke Matsuda: *Simplified digital coherent-based beyond-100g optical access systems for b5g/6g*. Journal of Optical Communications and Networking, 14(1):A1–A10, 2022. 2
- [18] Ranaweera, Chathurika, Jonathan Kua, Imali Dias, Elaine Wong, Christina Lim e Ampalavanapillai Nirmalathas: *4g to 6g: disruptions and drivers for optical access [invited]*. Journal of Optical Communications and Networking, 14(2):A143–A153, 2022. 2
- [19] Mondal, Sourav e Marco Ruffini: *Optical front/mid-haul with open access-edge server deployment framework for sliced o-ran*. IEEE Transactions on Network and Service Management, 19(3):3202–3219, 2022. 2, 41

- [20] Gangopadhyay, Bodhisattwa, João Pedro e Stefan Spaelter: *5g-ready multi-failure resilient and cost-effective transport networks*. *Journal of Lightwave Technology*, 37(16):4062–4072, 2019. 2, 3, 4, 23, 54, 55, 56, 75
- [21] Routray, Sudhir K., Abhishek Javali, Laxmi Sharma, Jagrati Gupta e Anindita Sahoo: *The new frontiers of 800g high speed optical communications*. Em *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, páginas 821–825, 2020. 2
- [22] Nokia: *Networks in 2030: Why an open future is essential*. https://www.nokia.com/thought-leadership/articles/networks-2030-open-telecoms-future/?did=D00000004964&gad=1&gclid=Cj0KCQjw0vWnBhC6ARIsAJpJM6e9CrH-6gKwQdwamnx3qJ9QuVL-0onFz6y6g-nWc2YqnL-cftgRy7oaAvbLEALw_wcB. 3
- [23] Muciaccia, Tommaso e Vittorio Passaro: *Proposal for an sdn-like innovative metro-access optical network architecture*. *International Journal of Optics*, 2019, 2019. 3, 15, 78, 79, 94, 96, 99, 103
- [24] Kosmatos, E., C. Matrakidis, D. Uzunidis, A. Stavdas, S. Horlitz, T. Pfeiffer, A. Lord e Emilio Riccardi: *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, Jan 2023. <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-15-1-1>. 3, 159
- [25] Ramachandran, Madanagopal, Anix Anbiah e Krishna M Sivalingam: *Capacity optimization based on traffic grooming in transport networks*. Em *2019 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM)*, páginas 435–441. IEEE, 2019. 3, 25, 56, 75
- [26] Fabrega, Josep M, Laia Nadal e Michela Svaluto Moreolo: *Cost-effective coherent systems for metropolitan networks*. Em *2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 1–3. IEEE, 2020. 3, 18, 31, 44, 69, 99
- [27] Garrich, Miquel, José Luis Romero-Gázquez, Francisco Javier Moreno-Muro, Manuel Hernández-Bastida e Pablo Pavón Mariño: *Joint optimization of it, ip and wdm layers: From theory to practice*. Em *2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 1–4. IEEE, 2020. 3, 37, 46, 47, 69
- [28] Lu, Longjin, Yongcheng Li, Liangjia Zong, Biswanath Mukherjee e Gangxiang Shen: *Asymmetric cdc roadms for efficient support of bi-directionally asymmetric traffic demands*. *Journal of Lightwave Technology*, 39(14):4572–4583, 2021. 4
- [29] Pavon-Marino, P., F. Moreno-Muro, M. Garrich, M. Quagliotti, E. Riccardi, A. Rafel e A. Lord: *Techno-economic impact of filterless data plane and agile control plane in the 5g optical metro*. *Journal of Lightwave Technology*, páginas 1–1, 2020. 4, 14, 15, 20, 22, 99

- [30] Mendiola, Alaitz, Jasone Astorga, Eduardo Jacob e Marivi Higuero: *A survey on the contributions of software-defined networking to traffic engineering*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(2):918–953, 2016. 4, 5, 42
- [31] Feldmann, Anja, Oliver Gasser, Franziska Lichtblau, Enric Pujol, Ingmar Poese, Christoph Dietzel, Daniel Wagner, Matthias Wichtlhuber, Juan Tapiador, Narseo Vallina-Rodriguez *et al.*: *The lockdown effect: Implications of the covid-19 pandemic on internet traffic*. Em *Proceedings of the ACM internet measurement conference*, páginas 1–18, 2020. 4, 119, 123, 125
- [32] Papanikolaou, Panos, Konstantinos Christodoulopoulos e E Varvarigos: *Optimization techniques for incremental planning of multilayer elastic optical networks*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 10(3):183–194, 2018. 4, 70
- [33] Lin, F. P. e Z. Tsai: *Hierarchical edge-cloud sdn controller system with optimal adaptive resource allocation for load-balancing*. IEEE Systems Journal, páginas 1–12, 2019, ISSN 1932-8184. 4, 37
- [34] Le Rouzic, Esther, Olivier Augizeau, Olivier Renais, Julien Meuric, Thierry Marcot, Christophe Betoule, Gilles Thouenon, Ahmed Triki, Maxime Laye, Nicolas Pelloquin *et al.*: *Automation journey in core and metro networks: an operator view*. Em *2021 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, páginas 1–4. IEEE, 2021. 4, 160
- [35] Zhong, Zhizhen, Nan Hua, Massimo Tornatore, Yao Li, Haijiao Liu, Chen Ma, Yanhe Li, Xiaoping Zheng e Biswanath Mukherjee: *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, 2016. 5, 105, 106, 107, 122
- [36] Mukherjee, Biswanath, Ioannis Tomkos, Massimo Tornatore, Peter Winzer e Yongli Zhao: *Springer Handbook of Optical Networks*. janeiro 2020, ISBN 978-3-030-16249-8. 9, 10, 11, 14, 33, 50, 51, 52, 72
- [37] Katsalis, Kostas, Lazaros Gatzikis e Konstantinos Samdanis: *Towards slicing for transport networks: The case of flex-ethernet in 5g*. Em *2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, páginas 1–7. IEEE, 2018. 9, 21, 50, 52, 56, 75
- [38] Kokkinos, Panagiotis, Polyzois Soumplis e Emmanouel A Varvarigos: *Pattern-driven resource allocation in optical networks*. IEEE Transactions on Network and Service Management, 16(2):489–504, 2019. 9, 37, 99, 113, 114, 118, 159
- [39] Kosmatos, Evangelos, Dimitris Uzunidis, Chris Matrakidis, Alexandros Stavdas, Sebastian Horlitz, Thomas Pfeiffer e Andrew Lord: *Building a truly dynamic filterless metro network by reusing a commercial pon’s data-plane and a novel sdn-enabled control-plane*. Journal of Lightwave Technology, 37(24):6033–6039, 2019. 9, 18, 69, 82, 94

- [40] Larrabeiti, David, Juan P Fernández-Palacios, Gabriel Otero, Michela Svaluto Moreolo, Laia Nadal, Josep Maria Fabrega, Pierpaolo Boffi, Alberto Gatto, Paola Parolari, Netsanet Tessema *et al.*: *Upcoming applications driving the design of next-generation metro area networks: dealing with 5g backhaul/fronthaul and edge-cloud computing*. Em *Metro and Data Center Optical Networks and Short-Reach Links III*, volume 11308, página 113080F. International Society for Optics and Photonics, 2020. 9, 19, 42, 43, 63, 64, 65, 98
- [41] Dinarte, Henrique A., Bruno V. A. Correia, Helder A. Pereira, Raul C. Almeida e Daniel A. R. Chaves: *Review of translucent elastic optical networks under dynamic traffic: Enabling devices, design strategies and operational strategies*. Em *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4, 2019. 10
- [42] Thyagaturu, Akhilesh S, Anu Mercian, Michael P McGarry, Martin Reisslein e Wolfgang Kellerer: *Software defined optical networks (sdons): A comprehensive survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18(4):2738–2786, 2016. 10, 14, 16, 28
- [43] International Telecommunication Union (ITU), Study Group 15): *Definitions and descriptions (otnt, otn, mon)*. https://www.itu.int/ITU-T/studygroups/_COM15/otn/definitions.html, Work in Progress. 10
- [44] Li, Zhe, M Sezer Erkilinç, Kai Shi, Eric Sillekens, Lidia Galdino, Tianhua Xu, Benn C Thomsen, Polina Bayvel e Robert I Killey: *Digital linearization of direct-detection transceivers for spectrally efficient 100 gb/s/λ wdm metro networking*. Journal of Lightwave Technology, 36(1):27–36, 2017. 10, 31, 43, 44, 69
- [45] Boffi, Pierpaolo, Paola Parolari, Alberto Gatto, Mariangela Rapisarda, Michela Svaluto Moreolo, Laia Nadal, Josep M Fabrega, Nicola Calabretta, Ripalta Stabile, Netsanet Tessema *et al.*: *Multi-tb/s sustainable man scenario enabled by vcsel-based innovative technological solutions*. Em *Metro and Data Center Optical Networks and Short-Reach Links III*, volume 11308, página 113080G. International Society for Optics and Photonics, 2020. 10, 12, 19, 45, 95
- [46] Sambo, Nicola, Alessio Ferrari, Antonio Napoli, Nelson Costa, João Pedro, Bernd Sommerkorn-Krombholz, Piero Castoldi e Vittorio Curri: *Provisioning in multi-band optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 38(9):2598–2605, 2020. 11
- [47] Calabretta, N, K Prifti, N Tessema, X Xue, Bitao Pan e R Stabile: *Photonic integrated wdm cross-connects for optical metro and data center networks*. Em *Metro and Data Center Optical Networks and Short-Reach Links II*, volume 10946, página 1094603. International Society for Optics and Photonics, 2019. 11, 14, 63, 64, 100
- [48] Sarmiento, S., J. A. Altabas, D. Izquierdo, I. Garces, S. Spadaro e J. A. Lazaro: *Cost-effective dwdm roadm design for flexible sustainable optical metro-access networks*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 9(12):1116–1124, 2017. 12, 55, 58, 76

- [49] Khanna, G., T. Rahman, E. D. Man, E. Riccardi, A. Pagano, A. C. Piat, S. Calabrò, B. Spinnler, D. Rafique, U. Feiste, H. De Waardt, B. Sommerkorn-Krombholz, N. Hanik, T. Drenski, M. Bohn e A. Napoli: *Single-carrier 400g 64qam and 128qam dwdm field trial transmission over metro legacy links*. IEEE Photonics Technology Letters, 29(2):189–192, 2017. 12
- [50] Paolucci, F, R Emmerich, F Fresi, I Sackey, L Poti, C Schubert, JK Fischer e F Cugini: *Filterless optical wdm metro networks exploiting c+ l band*. Em 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), páginas 1–3. IEEE, 2018. 12, 74
- [51] Filer, Mark, Jamie Gaudette, Yawei Yin, Denizcan Billor, Zahra Bakhtiari e Jeffrey L Cox: *Low-margin optical networking at cloud scale*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 11(10):C94–C108, 2019. 12, 16, 39, 56, 69, 75
- [52] Hernandez, Jose Alberto, Marco Quagliotti, Emilio Riccardi, Victor Lopez, Oscar Gonzalez de Dios e Ramon Casellas: *A techno-economic study of optical network disaggregation employing open source software business models for metropolitan area networks*. IEEE Communications Magazine, 58(5):40–46, 2020. 13, 45, 51, 55, 67, 100, 160
- [53] Miladić-Tešić, Suzana, Goran Marković e Valentina Radojičić: *Traffic grooming technique for elastic optical networks: A survey*. Optik, 176:464 – 475, 2019, ISSN 0030-4026. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618313718>. 13, 18, 28, 31, 43
- [54] Ujjwal, Yadav e Jaisingh Thangaraj: *Review and analysis of elastic optical network and sliceable bandwidth variable transponder architecture*. Optical Engineering, 57(11):110802, 2018. 13, 29, 161
- [55] Shiraki, Ryuta, Yojiro Mori, Hiroshi Hasegawa e Ken ichi Sato: *Design and evaluation of quasi-nyquist wdm networks utilizing widely deployed wavelength-selective switches*. Optics express, 27(13):18549–18560, 2019. 13, 76
- [56] Moreolo, M Svaluto, Laia Nadal, Josep M Fabrega, F Javier Vilchez, Ramon Casellas, Raul Muñoz, Christian Neumeyr, Alberto Gatto, Paola Parolari e Pierpaolo Boffi: *Modular sdn-enabled s-bvt adopting widely tunable mems vcsel for flexible/elastic optical metro networks*. Em 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), páginas 1–3. IEEE, 2018. 13, 44, 46, 69, 94, 99, 161
- [57] Zhou, X., W. Jia, Y. Ma, N. Deng, G. Shen e A. Lord: *An ultradense wavelength switched network*. Journal of Lightwave Technology, 35(11):2063–2069, 2017. 13, 19, 26, 28, 29, 50, 56, 57, 76
- [58] Zhang, Ya, Xu Zhou, Ning Deng, Sanjay K. Bose e Gangxiang Shen: *Exploiting efficiency of for carrying metro network traffic*. Photonic Network Communications, 37:265–277, 2018. 13, 19, 29, 53, 57, 58, 69

- [59] Shen, Gangxiang, Ya Zhang, Xu Zhou, Yang Sheng, Ning Deng, Yiran Ma e Andrew Lord: *Ultra-dense wavelength switched network: A special eon paradigm for metro optical networks*. IEEE Communications Magazine, 56(2):189–195, 2018. 13, 14, 15, 17, 18, 20, 43, 47, 53, 56, 57, 76, 94, 95, 110, 112, 114, 126, 163
- [60] Harako, Koudai, Daiki Suzuki, Toshihiko Hirooka e Masataka Nakazawa: *Roll-off factor dependence of nyquist pulse transmission*. Optics express, 24(19):21986–21994, 2016. 13
- [61] Sivaraman, Anirudh, Thomas Mason, Aurojit Panda, Ravi Netravali e Sai Anirudh Kondaveeti: *Network architecture in the age of programmability*. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 50(1):38–44, 2020. 14, 16
- [62] Lashgari, Maryam, Lena Wosinska e Paolo Monti: *End-to-end provisioning of latency and availability constrained 5g services*. IEEE Communications Letters, 2021. 15, 16
- [63] Paul, Udit, Jiamo Liu, Sebastian Troia, Olabisi Falowo e Guido Maier: *Traffic-profile and machine learning based regional data center design and operation for 5g network*. Journal of Communications and Networks, 21(6):569–583, 2019. 16, 38, 39, 46, 120
- [64] Yosuf, Barzan A, Amal A Alahmadi, TEH El-Gorashi e Jaafar MH Elmirghani: *Cloud fog architectures in 6g networks*. arXiv preprint arXiv:2008.04004, 2020. 16, 42
- [65] Hashimoto, R., Y. Mori, H. Hasegawa e K. Sato: *Design of seamlessly and limitlessly expandable oxc and verification tests on its versatile applicability*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 12(5):99–108, 2020. 17, 20, 22, 23, 99, 100
- [66] Sambo, Nicola, Alessio Giorgetti, Filippo Cugini e Piero Castoldi: *Sliceable transponders: pre-programmed oam, control, and management*. Journal of Lightwave Technology, 36(7):1403–1410, 2017. 17, 19, 95, 99
- [67] Cugini, F, C Porzi, N Andriolli, A Bogoni e P Castoldi: *Flexible transceivers and solutions for semi-filterless metro networks*. Em 2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), páginas 1–2. IEEE, 2018. 17, 24, 55, 87, 99
- [68] Faruk, Md. Saifuddin e Seb J. Savory: *Digital signal processing for coherent transceivers employing multilevel formats*. Journal of Lightwave Technology, 35(5):1125–1141, 2017. 17, 18
- [69] Ou, Yanni, Ali Hammad, Shuping Peng, Reza Nejabati e Dimitra Simeonidou: *Online and offline virtualization of optical transceiver*. J. Opt. Commun. Netw., 7(8):748–760, Aug 2015. <http://www.osapublishing.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-7-8-748>. 17, 18, 32

- [70] Uzunidis, Dimitris, Evangelos Kosmatos, Chris Matrakidis, Alexandros Stavdas e Andrew Lord: *DuFinet: architectural considerations and physical layer studies of an agile and cost-effective metropolitan area network*. *Journal of Lightwave Technology*, 37(3):808–814, 2018. 18, 44, 82, 85, 94, 96, 103
- [71] Masood, M Umar, Ihtesham Khan, Arsalan Ahmad, Muhammad Imran e Vittorio Curri: *Smart provisioning of sliceable bandwidth variable transponders in elastic optical networks*. Em *2020 6th IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, páginas 85–91. IEEE, 2020. 19, 122
- [72] Imran, Muhammad, Antonio D’Errico, Andrew Lord e Luca Potì: *Techno-economic analysis of carrier sources in slice-able bandwidth variable transponders*. setembro 2016. 19
- [73] Uzunidis, Dimitris, Marco Presi, Andrea Sgambelluri, Francesco Paolucci, Alexandros Stavdas e Filippo Cugini: *Bidirectional single-fiber filterless optical networks: modeling and experimental assessment*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 13(6):C1–C9, 2021. 19, 84, 161
- [74] Dochhan, Annika, Robert Emmerich, Pablo Wilke Berenguer, Colja Schubert, Johannes K. Fischer, Michael H. Eiselt e Jörg Peter Elbers: *Flexible metro network architecture based on wavelength blockers and coherent transmission*. Em *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*, páginas 1–4, 2019. 20
- [75] Cugini, F, C Porzi, N Sambo, A Bogoni e P Castoldi: *Receiver architecture with filter for power-efficient drop&waste networks*. Em *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, páginas 1–3. IEEE, 2016. 20, 26, 90
- [76] Moniz, Daniela, João Pedro, Nuno Horta e João Pires: *Multi-objective framework for cost-effective otn switch placement using nsga-ii with embedded domain knowledge*. *Applied Soft Computing*, 83:105608, 2019, ISSN 1568-4946. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494619303886>. 21, 69
- [77] Silva, JC da, CJA Bastos-Filho, RC Almeida-Júnior, DAR Chaves, DRB Araújo, AVS Xavier e JF Martins-Filho: *Otn network planning over dwdm using computational intelligence*. Em *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4. IEEE, 2019. 22, 50, 54
- [78] Eira, António e João Pedro: *Metro high bandwidth, 5g application-aware optical network, with edge storage, compute and low latency - deliverable d2.3*, 2020. <https://cordis.europa.eu/project/id/761727/reporting>. 22
- [79] Rottondi, Cristina, Massimo Tornatore, Achille Pattavina e Giancarlo Gavioli: *Routing, modulation level, and spectrum assignment in optical metro ring networks using elastic transceivers*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 5(4):305–315, 2013. 22, 28, 29, 75, 76, 94, 96, 103

- [80] Nadal, Laia, Josep M Fabrega, Michela Svaluto Moreolo, Ramon Casellas, Raul Muñoz, Laura Rodríguez, Ricard Vilalta, F Javier Vílchez e Ricardo Martínez: *Sdn-enabled sliceable transceivers in disaggregated optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 37(24):6054–6062, 2019. 22, 45, 46, 69, 100
- [81] Ji, Yuefeng, Hongxiang Wang, Jiabin Cui, Meitong Yu, Zhitian Yang e Lin Bai: *All-optical signal processing technologies in flexible optical networks*. Photonic Network Communications, 38(1):14–36, 2019. 22
- [82] Zervos, C, M Spyropoulou, I Kanakis, I Lazarou, K O Velthaus, E Rouvalis, Guy Torfs, E Goobar, R Santos, NM Tessema *et al.*: *A new generation of high-speed electro-optical transceivers and flexible bandwidth wavelength selective switches for coherent dci: the gameleon project approach*. Em *Optical Interconnects XIX*, volume 10924, página 109240E. International Society for Optics and Photonics, 2019. 22, 23, 32, 44
- [83] Ya Zhang, X. Zhou, Yang Sheng, N. Deng e G. Shen: *Spectrum defragmentation and partial otn switching in (ud-wsn)*. Em *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4, 2017. 22, 29, 53, 69
- [84] Hadi, M. e E. Agrell: *Joint power-efficient traffic shaping and service provisioning for metro elastic optical networks*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 11(12):578–587, 2019. 22, 34, 75, 76, 94, 99, 101, 126, 127
- [85] Shiraki, Ryuta, Yojiro Mori, Hiroshi Hasegawa, Ken ichi Sato e Paolo Monti: *Highly spectrally efficient metro networks that adopt fiber-level granular routing on overlaid line-/ring-shaped virtual topologies*. Em *Metro and Data Center Optical Networks and Short-Reach Links III*, volume 11308, página 1130809. International Society for Optics and Photonics, 2020. 23, 25, 28, 69
- [86] Liu, Huanlin, Liying Sang, Yong Chen, Min Xiang e Yue Ma: *Space-frequency joint contention scheduling algorithm based on aod in sdm-eons*. Optical Fiber Technology, 47:93–101, 2019. 23, 28, 36
- [87] Ayoub, Omran, Shady Shehata, Francesco Musumeci e Massimo Tornatore: *Filterless and semi-filterless solutions in a metro-haul network architecture*. Em *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4. IEEE, 2018. 24, 25, 87, 88, 94, 96, 103, 112, 114
- [88] Shariati, Behnam, Marc Ruiz, Francesco Fresi, Andrea Sgambelluri, Filippo Cugini e Luis Velasco: *Real-time optical spectrum monitoring in filterless optical metro networks*. Photonic Network Communications, 40(1):1–13, 2020. 24, 99
- [89] Ives, DJ, S Yan, L Galdino, R Wang, DJ Elson, Y Wakayama, FJ Vaquero-Caballero, G Saavedra, D Lavery, R Nejabati *et al.*: *Distributed abstraction and verification of an installed optical fibre network*. Scientific reports, 11(1):1–11, 2021. 25

- [90] Kretsis, Aristotelis, Ippokratis Sartzetakis, Polyzois Soumplis, Katerina Mitropoulou, Panagiotis Kokkinos, Petros Nicopolitidis, Georgios Papadimitriou e Emmanouel Varvarigos: *Armonia: A unified access and metro network architecture*. Applied Sciences, 10(23):8318, 2020. 26, 50, 61, 67, 69
- [91] Zhan, N., C. Gan, J. Hui e Y. Guo: *Fair resource allocation based on user satisfaction in multi-olt virtual passive optical network*. IEEE Access, páginas 1–1, 2020. 26, 135
- [92] Abbas, Huda Saleh e Mark A Gregory: *Feeder fiber and olt protection for ring-and-spur long-reach passive optical network*. Em *2013 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC)*, páginas 63–68. IEEE, 2013. 27, 78
- [93] Nooruzzaman, Md, Nabih Alloune, Feriel Nabet, Zhenyu Xu, Émile Archambault, Christine Tremblay, Marija Furdek, Jiajia Chen, Lena Wosinska, Paul Littlewood et al.: *Filterless architecture for coherent undersea networks*. Em *2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 68–73. IEEE, 2015. 27, 44
- [94] Głąbowski, Mariusz, Hristo Ivanov, Erich Leitgeb, Maciej Sobieraj e Maciej Stasiak: *Simulation studies of elastic optical networks based on 3-stage clos switching fabric*. Optical Switching and Networking, 36:100555, 2020. 28, 29, 34
- [95] Comellas, Jaume, Jordi Perelló, Josep Solé-Pareta e Gabriel Junyent: *Spatial partitioning for proactive spectrum fragmentation avoidance in flex-grid/sdm dynamic optical core networks*. Photonic Network Communications, páginas 1–9, 2020. 29, 69, 99
- [96] Zhang, Ya, Xu Zhou, Ning Deng e Gangxiang Shen: *Ultra dense-wavelength switched network (ud-wsn): a cost, energy, and spectrum efficient metro network architecture*. Em *2016 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, páginas 1–3. IEEE, 2016. 29, 56, 67
- [97] Ahmed, T., S. Rahman, S. Ferdousi, M. Tornatore, A. Mitra, B. Chand Chatterjee e B. Mukherjee: *Dynamic routing, spectrum, and modulation-format allocation in mixed-grid optical networks*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 12(5):79–88, 2020. 30, 40, 44, 75, 76
- [98] Varasteh, Amir, Sai Kireet Patri, Achim Autenrieth e Carmen Mas-Machuca: *Evaluation of lightpath deployment strategies in flexible-grid optical networks*. Em *2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 1–6. IEEE, 2021. 31, 115, 118
- [99] Zhang, Jiawei, Yongli Zhao, Xiaosong Yu, Jie Zhang, Mei Song, Yuefeng Ji e Biswanath Mukherjee: *Energy-efficient traffic grooming in sliceable-transponder-equipped ip-over-elastic optical networks invited*. J. Opt. Commun. Netw., 7(1):A142–A152, Jan 2015. <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-7-1-A142>. 31

- [100] Chatterjee, Bijoy Chand e Eiji Oki: *Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management: Fundamentals, Design, Control, and Management*. CRC Press, 2020. 31, 33
- [101] Wu, Haitao, Fen Zhou, Zuqing Zhu e Yaojun Chen: *Analysis framework of rsa algorithms in elastic optical rings*. *Journal of Lightwave Technology*, 37(4):1113–1122, 2019. 34, 76, 94, 110, 111, 114
- [102] Hadi, M., M. R. Pakravan e E. Agrell: *Dynamic resource allocation in metro elastic optical networks using lyapunov drift optimization*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 11(6):250–259, 2019. 34, 75, 76, 94, 99, 101, 113, 114, 122, 126, 127, 161
- [103] Chen, Haoran, Yongli Zhao, Jie Zhang, Wei Wang e Ruijie Zhu: *Static routing and spectrum assignment for deadline-driven bulk-data transfer in elastic optical networks*. *IEEE Access*, 5:13645–13653, 2017. 34, 35, 37, 38
- [104] Lu, Wei e Zuqing Zhu: *Malleable reservation based bulk-data transfer to recycle spectrum fragments in elastic optical networks*. *Journal of Lightwave Technology*, 33(10):2078–2086, 2015. 35
- [105] Wang, Nannan, Jason P Jue, Xi Wang, Qiong Zhang, Hakki C Cankaya e Motoyoshi Sekiya: *Holding-time-aware scheduling for immediate and advance reservation in elastic optical networks*. Em *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 5180–5185. IEEE, 2015. 35
- [106] Abedifar, Vahid e Mohammad Eshghi: *Routing, modulation format, spectrum and core allocation in space-division-multiplexed programmable filterless networks*. *Optical Fiber Technology*, 49:37–49, 2019. 36
- [107] Iyer, Sridhar e Shree Prakash Singh: *Performance analysis of translucent space division multiplexing based elastic optical networks*. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, 8(1):8–16, 2019. 36
- [108] Vale, VAC e RC Almeida Jr: *Power, routing, modulation level and spectrum assignment in all-optical and elastic networks*. *Optical Switching and Networking*, 32:14–24, 2019. 36
- [109] Rezaee, Mohammad e Mohammad Hossein Yaghmaee Moghaddam: *Sdn-based quality of service networking for wide area measurement system*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019. 37
- [110] Li, Y., L. Peng e G. Shen: *Load-balanced fixed routing for wavelength routed optical networks*. *IEEE Communications Letters*, 17(6):1256–1259, June 2013, ISSN 1089-7798. 37
- [111] Wang, Fu, Bo Liu, Lijia Zhang, Qi Zhang, Qinghua Tian, Feng Tian, Lan Rao e Xiangjun Xin: *Dynamic routing and spectrum assignment based on multilayer virtual topology and ant colony optimization in elastic software-defined optical networks*. *Optical Engineering*, 56(7):076111, 2017. 37

- [112] Mukherjee, M., L. Shu e D. Wang: *Survey of fog computing: Fundamental, network applications, and research challenges*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 20(3):1826–1857, thirdquarter 2018, ISSN 1553-877X. 37
- [113] Chatterjee, B. C., N. Kitsuwon e E. Oki: *Performance evaluation of first-last-exact fit spectrum allocation policy for elastic optical networks*. Em *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4, July 2017. 37, 38
- [114] zhao, jijun, Bowen Bao, Bijoy Chatterjee, Eiji Oki, Jinhua Hu e Danping Ren: *Dispersion based highest-modulation-first last-fit spectrum allocation scheme for elastic optical networks*. IEEE Access, PP:1–1, outubro 2018. 37
- [115] Biernacka, Edyta e Michal Aibin: *On advantages of data driven traffic classification for dynamic routing in optical networks*. Em *2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, páginas 166–170. IEEE, 2020. 38, 118
- [116] CISCO: *Cisco secure firewall management center administration guide, 7.3: Chapter: Traffic profiling*. <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/security/secure-firewall/management-center/admin/730/management-center-admin-73/correlation-traffic-profiling.html>, Work in Progress. 38
- [117] Zhu, Qingcheng, Xiaosong Yu, Yongli Zhao, Avishek Nag e Jie Zhang: *Auxiliary-graph-based energy-efficient traffic grooming in ip-over-fixed/flex-grid optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 39(10):3011–3024, 2021. 38, 121
- [118] Comellas, Jaume e Gabriel Junyent: *Allocating multi-rate requests to single-rate lightpaths in flexgrid optical networks*. Em *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 1–6. IEEE, 2018. 38, 120
- [119] Popescu, Ion, Xiaoyuan Cao, Gang Chen, Hongxiang Guo, Noboru Yoshikane, Takehiro Tsuritani, Jian Wu e Itsuro Morita: *Impact of metro-embedded data centers on metropolitan network design and traffic profile*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 9(10):900–908, 2017. 38, 121
- [120] Xu, Zhenyu, Christine Tremblay, Émile Archambault, Marija Furdek, Jiajia Chen, Lena Wosinska, Michel P. Bélanger e Paul Littlewood: *Flexible bandwidth allocation in filterless optical networks*. IEEE Communications Letters, 19(4):565–568, 2015. 39, 110, 111, 114
- [121] Moreolo, M Svaluto, R Martínez, Laia Nadal, Josep Maria Fabrega, Netsanet Tessema, Nicola Calabretta, Ripalta Stabile, Paola Parolari, Alberto Gatto, Pierpaolo Boffi *et al.*: *Spectrum/space switching and multi-terabit transmission in agile optical metro networks*. Em *2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*, páginas 1–3. IEEE, 2019. 39

- [122] Ramanathan, Shunmugapriya, Koteswararao Kondepu, Tianliang Zhang, Behzad Mirkhanzadeh, Miguel Razo, Marco Tacca, Luca Valcarengi e Andrea Fumagalli: *Orchestrating virtualized core network migration in openroadm sdn-enabled network*. Em *2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 1–6, 2021. 41, 42
- [123] Keshavarz, Mohammad Hossein, Mohammad Hadi, Maryam Lashgari, Mohammad Reza Pakravan e Paolo Monti: *Optimal qos-aware allocation of virtual network resources to mixed mobile-optical network slices*. Em *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, páginas 01–06, 2021. 41
- [124] Rane, Jayesh, Niteshkumar Agrawal e Rajashri Narwade: *Role of artificial intelligence and machine learning in fiber optics*. *Sensors and Fiber Optics: Recent Trends*, página 15, 2022. 41
- [125] Yang, Zeyuan, Rentao Gu e Yuefeng Ji: *Energy efficient service provisioning in computing power network over osu-based otn*. Em *2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, páginas 1306–1311, 2022. 41
- [126] Chen, Feng, Man Song, Fen Zhou e Zuqing Zhu: *Security-aware planning of packet-over-optical networks in consideration of otn encryption*. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 18(3):3209–3220, 2021. 41
- [127] Jing, Ruiquan, Chengliang Zhang, Heng Zhou, Junjie Li, Wu Qiuyou, Yuanbin Zhang, Yaqin Wang, Wei Su, Yadong Gong e Xiaoli Huo: *Innovation and demonstration of optical service unit-based metro-optimized otn technologies*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(4):236–247, 2022. 41, 42
- [128] Vilalta, Ricard, Raul Muñoz, Ramon Casellas, Ricardo Martínez, Fei Li e Pengcheng Tang: *Experimental validation of resource allocation in transport network slicing using the adrenaline testbed*. *Photonic Network Communications*, 40(2):82–93, 2020. 42, 45, 69, 74, 135
- [129] Davis, Zziff: *Networking technology: Trends in 2020 and beyond*. <https://swzd.com/resources/networking-trends-in-2020-and-beyond/>, Report. 42
- [130] Cooney, Michael: *What's next for ethernet?* <https://www.networkworld.com/article/3652340/what-s-next-for-ethernet.html>, Report. 42
- [131] Wu, Meihan, Nelson L. S. da Fonseca e Zuqing Zhu: *Dynamic cross-layer restoration to resolve packet layer outages in flexe-over-eons*. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, páginas 1–1, 2022. 42, 94, 117, 118
- [132] Troia, Sebastian, Alberto Cibari, Rodolfo Alvizu e Guido Maier: *Dynamic programming of network slices in software-defined metro-core optical networks*. *Optical Switching and Networking*, 36:100551, 2020, ISSN 1573-4277. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427719300980>. 42, 45, 69, 99, 107, 108, 119

- [133] Iyer, Sridhar: *Investigation of cost and spectrum utilization in internet protocol-over-elastic optical networks*. Journal of Optics, páginas 1–12, 2020. 43, 76
- [134] Welch, Dave, Antonio Napoli, Johan Bäck, Warren Sande, João Pedro, Fady Ma-soud, Chris Fludger, Thomas Duthel, Han Sun, Steven J Hand *et al.*: *Point-to-multipoint optical networks using coherent digital subcarriers*. Journal of Lightwave Technology, 39(16):5232–5247, 2021. 43, 160, 161
- [135] Kądziołka, Bartosz, Maciej Skala, Robert WóJCIK, Piotr Jurkiewicz e Jerzy Domżał: *Employing famtar and ahb to achieve an optical resource-efficient mul-tilayer ip-over-eon sdn network*. IEEE Access, 10:94089–94099, 2022. 43
- [136] King, D., A. Farrel, Emiko Nishida King, R. Casellas, L. Velasco, R. Nejabati e A. Lord: *The dichotomy of distributed and centralized control: Metro-haul, when control planes collide for 5g networks*. Optical Switching and Networking, 33:49–55, 2019. 43, 46
- [137] Liu, X., N. Deng, M. Zhou, Y. Wang, M. Tao, L. Zhou, S. Li, H. Zeng, S. Megeed, A. Shen e F. Effenberger: *Enabling technologies for 5g-oriented optical networks*. Em *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, páginas 1–3, 2019. 44, 54
- [138] Nadal, Laia, Josep M Fàbrega, Michela Svaluto Moreolo, F Javier Vílchez, Ramon Casellas, Raul Muñoz, Ricard Vilalta e Ricardo Martínez: *Programmable disaggre-gated multi-dimensional s-bvt as an enabler for high capacity optical metro networks*. Journal of Optical Communications and Networking, 13(6):C31–C40, 2021. 44, 75
- [139] Shariati, B., L. Velasco, J. J. Pedreno-Manresa, A. Dochhan, R. Casellas, A. Muqad-das, O. Gonzalez de Dios, L. Luque Canto, B. Lent, J. E. Lopez de Vergara, S. Lopez-Buedo, F. Moreno, P. Pavon, M. Ruiz, S. K. Patri, A. Giorgetti, F. Cugini, A. Sgambelluri, R. Nejabati, D. Simeonidou, R. P. Braun, A. Autenrieth, J. P. El-bers, J. K. Fischer e R. Freund: *Demonstration of latency-aware 5g network slicing on optical metro networks*. Journal of Optical Communications and Networking, 14(1):A81–A90, 2022. 45, 94, 99
- [140] Troia, Sebastian, Alberto Cibari e Rodolfo Alvizu: *Dynamic network slicing based on tidal traffic patterns in metro-core optical networks*. Em *2019 IEEE 20th Inter-national Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, páginas 1–7. IEEE, 2019. 45, 69, 99
- [141] Casellas, Ramon, Ricardo Martínez, Luis Velasco, Ricard Vilalta, Pablo Pavón, Daniel King e Raül Muñoz: *Enabling data analytics and machine learning for 5g services within disaggregated multi-layer transport networks*. Em *2018 20th Interna-tional Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4. IEEE, 2018. 45, 47, 99
- [142] ROADM, Open: *Open roadm msa*. <http://www.openroadm.org/home.html>, 2019. 46

- [143] Paolucci, F. e A. Sgambelluri: *Telemetry in disaggregated optical networks*. Em *2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 1–3, 2020. 46, 69
- [144] Beletsioti, Georgia A, Georgios I Papadimitriou, Petros Nicopolitidis, Emmanouel Varvarigos e Stathis Mavridopoulos: *A learning-automata-based congestion-aware scheme for energy-efficient elastic optical networks*. *IEEE Access*, 2020. 46, 99, 115, 118, 135
- [145] Velasco, L, S Barzegar, F Tabatabaeimehr e M Ruiz: *Intent-based networking and its application to optical networks [invited tutorial]*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(1):A11–A22, 2022. 46
- [146] Alabarce, Miquel Garrich e Pablo Pavón Mariño: *Optical network design and analysis tools: A test of time*. *Optical Switching and Networking*, 44:100651, 2022. 47
- [147] Li, Y., J. Zhang, Z. Liu e Y. Ji: *Joint optimization for combined jobs scheduling and routing in the edge computing based con*. Em *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, páginas 1–3, 2018. 47, 75, 76
- [148] She, Qingya, Tomohiro Hashiguchi, Kirsten Rundberget e Weisheng Xie: *Metro transport, from mesh to hub*. Em *Optical Fiber Communication Conference*, páginas M2G–6. Optical Society of America, 2017. 50, 59, 61, 67
- [149] Larrabeiti, David, Juan Fernández-Palacios, Gabriel Otero, Michela Svaluto Moreolo, Jose M Fabrega, Ricardo Martínez, Pedro Reviriego e Víctor López: *All-optical paths across multiple hierarchical levels in large metropolitan area networks*. Em *2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, páginas 1–3. IEEE, 2019. 50, 63, 64, 67, 69, 161
- [150] Infinera, Ćiril Rožić, Sayish Kumar Nagaraju, Bodhisattwa Gangopadhyay, Joao Santos e Harshad Sardesai: *Cost-effective metro optical network architectures*. Em *2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 1–6. IEEE, 2020. 53, 67, 69
- [151] ITU-T, Telecommunication Standardization Sector: *5g - fifth generation of mobile technologies*. <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>, 2010. 54
- [152] Liu, Xiang: *Evolution of fiber-optic transmission and networking towards the 5g era*. *Iscience*, 2019. 54
- [153] C, Govardan, Sri Krishna Chaitanya K, Krishna Kumar Naik B, Shreeshha Rao D S, Jagadeesh C, Gowrishankar R, Siva Sankara Sai S, Prabhat Beherey e Bhyri Sai Kishorez: *A heuristic algorithm for network optimization of otn over dwdm network*. Em *2015 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, páginas 1–6, 2015. <https://doi.org/10.1109/ANTS.2015.7413606>. 54, 67

- [154] She, Qingya, Kirsten Rundberget e Weisheng Xie: *When cord meets hub*. Em *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, páginas 1–3, 2018. 59, 60
- [155] Yang, Lei, Jing Tian, Bo Wu, Zhongfeng Wang e Hao Ren: *An rs-bch concatenated fec code for beyond 400 gb/s networking*. Em *2022 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)*, páginas 212–216, 2022. 60
- [156] Santana, Henrique, Rafael Kraemer, Ali Mefleh e Nicola Calabretta: *Photonically interconnected federated edge-computing networks using fast reconfigurable soa-based oadms*. Em *2022 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, páginas 1–4. IEEE, 2022. 64
- [157] Yu, Hao, Francesco Musumeci, Jiawei Zhang, Massimo Tornatore e Yuefeng Ji: *Isolation-aware 5g ran slice mapping over wdm metro-aggregation networks*. *Journal of Lightwave Technology*, 38(6):1125–1137, 2020. 66
- [158] Uzunidis, Dimitris, Evangelos Kosmatos, Chris Matrakidis, Alexandros Stavdas e Andrew Lord: *Strategies for upgrading an operator’s backbone network beyond the c-band: Towards multi-band optical networks*. *IEEE Photonics Journal*, 13(2):1–18, 2021. 67
- [159] Le, G., S. Ferdousi, A. Marotta, S. Xu, Y. Hirota, Y. Awaji, M. Tornatore e B. Mukherjee: *Survivable virtual network mapping with content connectivity against multiple link failures in optical metro networks*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 12(11):301–311, 2020. 69, 99
- [160] Zhang, Weiyi, Balagangadhar G Bathula, Rakesh K Sinha, Robert Doverspike, Peter Magill, Aswatnarayan Raghuram e Gagan Choudhury: *Cost comparison of alternative architectures for ip-over-optical core networks*. *Journal of Network and Systems Management*, 24:607–628, 2016. 69
- [161] Triki, Ahmed, Annie Gravey e Philippe Gravey: *The potential savings of sdn compliant sub-wavelength switching as a future carrier grade solution for the metropolitan network*. *Optical Switching and Networking*, 31:52–61, 2019. 72, 73, 74, 75
- [162] Jin, Wei, Chongfu Zhang, Xiao Duan, Mohammad R Kadhum, Yi X Dong, Roger P Giddings, Ning Jiang, Kun Qiu e JM Tang: *Improved performance robustness of dsp-enabled flexible roadms free from optical filters and oeo conversions*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(8):521–529, 2016. 73
- [163] Kozdrowski, Stanisław, Mateusz Żotkiewicz e Sławomir Sujecki: *Ultra-wideband wdm optical network optimization*. *Photonics*, 7(1), 2020, ISSN 2304-6732. <https://www.mdpi.com/2304-6732/7/1/16>. 73, 75, 96
- [164] Sharma, Jahnavi, Zhe Xuan, Hao Li, Taehwan Kim, Ranjeet Kumar, Meer N. Sakib, Chun Ming Hsu, Chaoxuan Ma, Haisheng Rong, Ganesh Balamurugan e James Jaussi: *Silicon photonic microring-based 4×112 gb/s wdm transmitter with photocurrent-based thermal control in 28-nm cmos*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 57(4):1187–1198, 2022. 73, 74

- [165] Ali, Mustafa H, Ali M Almufti e Suaad M Saber: *Experimental investigation between wdm-pon and dwdm-pon using different channel spacing*. Em *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 745, página 012037. IOP Publishing, 2020. 73, 74
- [166] Yuan, Yuan, Wayne V Sorin, Stanley Cheung, Yiwei Peng, Di Liang, Zhihong Huang, Marco Fiorentino e Raymond G Beausoleil: *A 4× 100 gb/s dwdm optical link with all-silicon microring transmitters and receivers*. Em *Asia Communications and Photonics Conference*, páginas T2D–4. Optical Society of America, 2021. 73, 94, 99
- [167] Pittalà, Fabio, Georg Böcherer, Patrick Schulte, Maximilian Schaedler, Stefano Calabrò, Bofang Zheng, Changsong Xie e Maxim Kuschnerov: *72.64 tb/s dwdm transmission over 100 km g.654d fiber using super c-band erbium-doped fiber amplification*. Em *2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, páginas 1–3, 2022. 73
- [168] Han, Xiao, Mingwei Yang, Ivan B. Djordjevic e An Li: *Probabilistically-shaped four-dimensional ldpc-coded modulation in 100 km dwdm optical transmission for metro network applications*. Em *2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, páginas 1–3, 2019. 73
- [169] Mitra, Abhijit, Daniel Semrau, Nishant Gahlawat, Anand Srivastava, Polina Bayvel e Andrew Lord: *Effect of channel launch power on fill margin in c+ l band elastic optical networks*. *Journal of Lightwave Technology*, 38(5):1032–1040, 2019. 73
- [170] Pedro, Joao, Nelson Costa e Steve Sanders: *Cost-effective strategies to scale the capacity of regional optical transport networks*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(2):A154–A165, 2022. 73
- [171] Liu, Tonghui, Dongfang Jia, Tianxin Yang, Zhaoying Wang e Ying Liu: *Stable l-band multi-wavelength soa fiber laser based on polarization rotation*. *Applied Optics*, 56(10):2787–2791, 2017. 74
- [172] Liu, Zhen, Jiawei Zhang, Yanan Li, Lin Bai e Yuefeng Ji: *Joint jobs scheduling and lightpath provisioning in fog computing micro datacenter networks*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(7):B152–B163, 2018. 75, 76, 99
- [173] Paz, Esteban e Gabriel Saavedra: *Maximum transmission reach for optical signals in elastic optical networks employing band division multiplexing*. arXiv preprint arXiv:2011.03671, 2020. 77
- [174] Martín González, Laura: *Programmable dsp-enabled multi-adaptive optical transceivers based on ofdm technology for software defined networks*. 2019. 77
- [175] Din, Der Rong e Meng Xun Zhan: *The rbcmlsa problem on eons with flexible transceivers*. *Photonic Network Communications*, 38(1):62–74, 2019. 78, 99

- [176] Zaouga, Aziza, Amaro de Sousa, Monia Najja e Paulo Monteiro: *Low latency dynamic bandwidth allocation algorithms for ng-pon2 to support 5g fronthaul and data services*. Em *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4. IEEE, 2019. 78
- [177] Mantelet, Guillaume, Andrew Cassidy, Christine Tremblay, David V. Plant, Paul Littlewood e Michel P. Bélanger: *Establishment of dynamic lightpaths in filterless optical networks*. *J. Opt. Commun. Netw.*, 5(9):1057–1065, Sep 2013. <http://jocn.osa.org/abstract.cfm?URI=jocn-5-9-1057>. 82
- [178] Serafino, G., A. Malacarne, C. Porzi, F. Fresi, G. Meloni, P. Velha, L. Potì, A. Bogoni e F. Cugini: *Semi filter-less drop waste network demonstration with integrated soi optical filter*. Em *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, páginas 1–3, 2017. 87, 89, 90, 94, 96, 103
- [179] Mohammed, Nidhal A e Haider J Abd: *A new suppression approach of fwm crosstalk effect in optical communication link based on polarization combiner method*. Em *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1973, página 012169. IOP Publishing, 2021. 94, 99
- [180] Ibrahimov, B. G., M. H. Hasanov e A. D. Tagiyev: *Research of the quality of functioning of fiber-optical transmission systems on the basis of modern technologies*. Em *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, páginas 1–5, 2022. 94, 99
- [181] Pittalà, Fabio, Ralf Peter Braun, Georg Böcherer, Patrick Schulte, Maximilian Schaedler, Stefano Bettelli, Stefano Calabrò, Maxim Kuschnerov, Andreas Gladisch, Fritz Joachim Westphal, Changsong Xie, Rongfu Chen, Qibing Wang e Bofang Zheng: *1.71 tb/s single-channel and 56.51 tb/s dwdm transmission over 96.5 km field-deployed ssmf*. *IEEE Photonics Technology Letters*, 34(3):157–160, 2022. 94, 99
- [182] Ayoub, Omran, Memedhe Ibrahim, Francesco Musumeci, Andrea Castoldi, Rosanna Pastorelli e Massimo Tornatore: *Routing and spectrum allocation with amplifier placement in elastic metro-aggregation networks*. Em *European Conference on Optical Communication (ECOC) 2019*, páginas 1–4, 2019. 94, 99, 115, 118
- [183] Bao, Bowen, Hui Yang, Yu Wan, Qiuyan Yao, Ao Yu, Jie Zhang, Bijoy Chand Chatterjee e Eiji Oki: *Node-oriented traffic prediction and scheduling based on graph convolutional network in metro optical networks*. Em *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, páginas 1–3, 2021. 94, 99, 105, 106, 120, 123
- [184] Amjad, Saquib, Sai Kireet Patri e Carmen Mas-Machuca: *Towards regeneration in flexible optical network planning*. Em *2022 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 1–6, 2022. 94

- [185] Li, Xingfeng, Chaoqin Gan, Yujie Chen, Hubao Qiao e Yuqi Yan: *Dual-fiber-ring architecture supporting discretionary peer-to-peer intra-communication and bidirectional inter-communication in metro-access network*. *IEEE Access*, 7:52360–52370, 2019. 94
- [186] Ayoub, Omran, Faryal Fatima, Andrea Bovio, Francesco Musumeci e Massimo Tornatore: *Traffic-adaptive re-configuration of programmable filterless optical networks*. Em *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 1–6, 2020. 94
- [187] Song, Zerui, Wei Ji, Rui Yin, Jingyao Li, Zisu Gong e Hao Yun: *Highly reliable metro-access network based on a dual-fiber ring architecture and optimized protection mechanisms*. *IEEE Access*, 9:136419–136437, 2021. 94, 99
- [188] Dochhan, Annika, Johannes K Fischer, Bodo Lent, Achim Autenrieth, Behnam Shariati, Pablo Wilke Berenguer e Jörg Peter Elbers: *Metro-haul project vertical service demo: Video surveillance real-time low-latency object tracking*. Em *Optical Fiber Communication Conference*, páginas M2D–4. Optical Society of America, 2020. 94, 99, 101, 107
- [189] Gu, Yu, Yongcheng Li, Ningning Guo, Xiaodi You e Gangxiang Shen: *L-band amplifier placement in c+ l-band elastic optical networks*. Em *2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, páginas 1–3. IEEE, 2021. 98
- [190] Uzunidis, Dimitris, Chris Matrakidis, E Kosmatos, A Stavdas e Andrew Lord: *On the benefits of power optimization in the s, c and l-band optical transmission systems*. *Computer Networks*, 211:108958, 2022. 98
- [191] Ruiz, Marc, Andrea Sgambelluri, Filippo Cugini e Luis Velasco: *Smart filterless optical networks based on optical spectrum analysis*. Em *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–5. IEEE, 2019. 99
- [192] Troia, S., Gao Sheng, R. Alvizu, G. A. Maier e A. Pattavina: *Identification of tidal-traffic patterns in metro-area mobile networks via matrix factorization based model*. Em *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, páginas 297–301, 2017. 105, 123, 159, 162
- [193] Alvizu, Rodolfo, Xingyu Zhao, Guido Maier, Yajing Xu e Achille Pattavina: *Energy efficient dynamic optical routing for mobile metro-core networks under tidal traffic patterns*. *Journal of Lightwave Technology*, 35(2):325–333, 2016. 105, 123, 160
- [194] Varet, Antoine e Nicolas Larrieu: *How to generate realistic network traffic?* Em *2014 IEEE 38th annual computer software and applications conference*, páginas 299–304. IEEE, 2014. 110
- [195] Archambault, Emile, Nabih Alloune, Marija Furdek, Zhenyu Xu, Christine Tremblay, Ajmal Muhammad, Jiajia Chen, Lena Wosinska, Paul Littlewood e Michel

- P. Belanger: *Routing and spectrum assignment in elastic filterless optical networks*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 24(6):3578–3592, 2016. 110, 111, 114
- [196] Zhang, Ya, Xu Zhou, Ning Deng, Sanjay K Bose e Gangxiang Shen: *Exploiting efficiency of ultra-dense wavelength switched network for carrying metro network traffic*. Photonic Network Communications, 37:265–277, 2019. 110, 112, 114
- [197] Pedreno-Manresa, Jose Juan, Jose Luis Izquierdo-Zaragoza, Filippo Cugini e Pablo Pavon-Marino: *On the benefits of elastic spectrum management in multi-hour filterless metro networks*. Em *2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 184–189. IEEE, 2018. 116, 118
- [198] Feldmann, Anja, Oliver Gasser, Franziska Lichtblau, Enric Pujol, Ingmar Poesse, Christoph Dietzel, Daniel Wagner, Matthias Wichtlhuber, Juan Tapiador, Narseo Vallina-Rodriguez *et al.*: *A year in lockdown: how the waves of covid-19 impact internet traffic*. Communications of the ACM, 64(7):101–108, 2021. 119, 125
- [199] Wang, Rui e Biswanath Mukherjee: *Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks*. Optical Switching and Networking, 11:83–91, 2014. 126, 130, 132, 147, 150, 158
- [200] Yen, Jin Y: *Finding the k shortest loopless paths in a network*. management Science, 17(11):712–716, 1971. 131, 133, 146, 147
- [201] Costa, Lucas R. e André C. Drummond: *ONS – optical network simulator*. //ons-simulator.com, 2020. 133
- [202] Liu, Boyan, Hao Yu, Lin Bai, Jiawei Zhang e Yuefeng Ji: *Isolation-aware 5g-ran slice embedding over otn/wdm metro-aggregation networks*. Em *2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*, páginas 1–3, 2020. 135
- [203] Zhu, Qingcheng, Xiaosong Yu, Yongli Zhao, Avishek Nag e Jie Zhang: *Auxiliary-graph-based energy-efficient traffic grooming in ip-over-fixed/flex-grid optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 39(10):3011–3024, 2021. 135
- [204] Sousa, Léia, Lucas Costa e André Drummond: *Solução ciente da Área para alocação de recursos em redes Ópticas metropolitanas*. Em *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, páginas 363–376, Porto Alegre, RS, Brasil, 2022. <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/21183>. 158, 162
- [205] Peterson, Larry, Tom Anderson, Sachin Katti, Nick McKeown, Guru Parulkar, Jennifer Rexford, Mahadev Satyanarayanan, Oguz Sunay e Amin Vahdat: *Democratizing the network edge*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 49(2):31–36, maio 2019, ISSN 0146-4833. <https://doi.org/10.1145/3336937.3336942>. 159, 160
- [206] Yin, Shan, Wei Zhang, Yutong Chai e Shanguo Huang: *Dependency-aware task cooperative offloading on edge servers interconnected by metro optical networks*. Journal of Optical Communications and Networking, 14(5):376–388, 2022. 160

- [207] Tedjopurnomo, David Alexander, Zhifeng Bao, Baihua Zheng, Farhana Murtaza Choudhury e Alex Kai Qin: *A survey on modern deep neural network for traffic prediction: Trends, methods and challenges*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 34(4):1544–1561, 2020. 160
- [208] Gangopadhyay, Bodhisattwa, João Pedro e Stefan Spälter: *Next-generation transport networks leveraging universal traffic switching and flexible optical transponders*. Optical Fiber and Wireless Communications, página 211, 2017. 161
- [209] Ruffini, M, M Achouche, A Arbelaez, R Bonk, A Di Giglio, NJ Doran, Marija Furdek, R Jensen, J Montalvo, N Parsons *et al.*: *Access and metro network convergence for flexible end-to-end network design*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 9(6):524–535, 2017. 161

Apêndice A

Algoritmos Propostos Neste Trabalho

Os algoritmos propostos neste trabalho são descritos à seguir. Tais algoritmos foram implementados na linguagem Java para os experimentos de simulação no ONS (ons-simulator.com/). O ONS é um simulador especialmente desenvolvido com foco em redes ópticas de núcleo. Algumas adaptações foram implementadas para configurar um cenário de redes ópticas metropolitanas, tais como categorizações da topologia com relação aos papéis dos nós, bem como a representação do tráfego de marés.

A.1 ALWAcS

```
1 public class ALWAcS implements RA {
2
3     private ControlPlaneForRA cp;
4     private WeightedGraph graph;
5     private MyStatistics st = MyStatistics.getMyStatisticsObject
        ();
6     private int modulation;
7     private int G0_ComprehensiveArea = 0;
8     private int G1_ResidentialArea = 1;
9     private int G2_OfficeArea = 2;
10    private int ksp = 3;
11    private int a = 0;
12    private int b = 0;
13
14    // For 18h
15    private double WeightLinksInnerArea0 = 0.6;
```

```

16 private double WeightLinksInnerArea1 = 1.5;
17 private double WeightLinksInnerArea2 = 1.7;
18 private double WeightLinksCrossArea = 1.4;
19
20
21 @Override
22 public void simulationInterface(ControlPlaneForRA cp) {
23     this.cp = cp;
24     this.graph = cp.getPT().getWeightedGraph();
25     this.modulation = Modulation._QPSK;
26
27 }
28
29 @Override
30 public void setModulation(int modulation) {
31 }
32
33 @Override
34 public void flowArrival(Flow flow) {
35     int[] nodes;
36     int[] links;
37     long id;
38     LightPath[] lps = new LightPath[1];
39
40     int clusterOfSource = cp.getPT().getNode(flow.getSource()
41         ).getCluster();
42     int clusterofDestination = cp.getPT().getNode(flow.
43         getDestination()).getCluster();
44
45     if(clusterOfSource==clusterofDestination){
46         if(clusterOfSource==1 || clusterOfSource==2){// CA
47             KSPwithWeightedLinks(flow);
48         }else{
49             KSPwithWeightedLinks(flow);
50         }
51     }else{
52         CS(flow, ksp);
53     }
54 }

```

```

54  @Override
55  public void flowDeparture(long id) {
56  }
57
58  @Override
59  public void simulationEnd() {
60  }
61
62  //*****\\
63
64  private int[] route(ArrayList<Integer>[] kpaths, int k) {
65      if (kpaths[k] != null) {
66          int[] path = new int[kpaths[k].size()];
67          for (int i = 0; i < path.length; i++) {
68              path[i] = kpaths[k].get(i);
69          }
70          return path;
71      } else {
72          return null;
73      }
74  }
75
76  private void sortRoutes(ArrayList<Integer>[] kpaths, double[]
77      sortRouteByLinksWeightByArea) {
78      ArrayList<Integer> auxPath = new ArrayList<>();
79      double auxIndex;
80      for (int i = 0; i < sortRouteByLinksWeightByArea.length;
81          i++) {
82          for (int j = 0; j < sortRouteByLinksWeightByArea.
83              length; j++) {
84              if(sortRouteByLinksWeightByArea[i] <
85                  sortRouteByLinksWeightByArea[j]){
86                  auxPath = kpaths[i];
87                  kpaths[i] = kpaths[j];
88                  kpaths[j] = auxPath;
89                  auxIndex = sortRouteByLinksWeightByArea[i];
90                  sortRouteByLinksWeightByArea[i] =
91                      sortRouteByLinksWeightByArea[j];
92                  sortRouteByLinksWeightByArea[j] = auxIndex;
93              }
94          }
95      }

```

```

89         }
90     }
91 }
92
93 public void CS(Flow flow, int ksp) {
94     int[] nodes;
95     int[] links;
96
97     long id;
98     LightPath[] lps = new LightPath[1];
99     int[] listFF = new int[ksp];
100    for (int i = 0; i < ksp; i++) {
101        listFF[i] = Integer.MAX_VALUE;
102    }
103
104    ArrayList<Integer>[] kpaths = YenKSP.kShortestPaths(graph
105        , flow.getSource(), flow.getDestination(), ksp);
106
107    for (int k = 0; k < kpaths.length; k++) {
108        nodes = route(kpaths, k);
109        if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
110            cp.blockFlow(flow.getID());
111            return;
112        }
113        links = new int[nodes.length - 1];
114        for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
115            links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes[j +
116                1]).getID();
117        }
118
119        requiredSlots = Modulation.convertRateToSlot(flow.
120            getRate(), EONPhysicalTopology.getSlotSize(),
121            modulation);
122
123        int[] firstSlot;
124        firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink(links[0])).
125            firstFit(requiredSlots);
126
127        for (int j = 0; j < firstSlot.length; j++) {

```

```

124         EONLightPath lp = cp.createCandidateEONLightPath(
125             flow.getSource(), flow.getDestination(), links,
126             firstSlot[j], (firstSlot[j] +
127                 requiredSlots - 1), modulation);
128
129         if ((id = cp.getVT().createLightpath(lp)) >= 0) {
130             // Single-hop routing (end-to-end lightpath)
131             lps[0] = cp.getVT().getLightpath(id);
132             listFF[k] = ((EONLightPath) lps[0]).
133                 getFirstSlot();
134             cp.getVT().deallocatedLightpaths(lps);
135             break;
136         }
137     }
138 }
139
140 int indexMenor = 0;
141 for (int m = 0; m < listFF.length; m++) {
142     if (listFF[m] < listFF[indexMenor]) {
143         indexMenor = m;
144     }
145 }
146
147 if (listFF[indexMenor] != Integer.MAX_VALUE) {
148     nodes = route(kpaths, indexMenor);
149
150     // If no possible path found, block the call
151     if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
152         cp.blockFlow(flow.getID());
153         return;
154     }
155
156     // Create the links vector
157     links = new int[nodes.length - 1];
158     for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
159         links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes[j +

```

```

160         requiredSlots = Modulation.convertRateToSlot(flow.
            getRate(), EONPhysicalTopology.getSlotSize(),
            modulation);
161
162         int[] firstSlot;
163
164         // Try the slots available in each link
165         firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink(links[0])).
            firstFit(requiredSlots);
166         for (int j = 0; j < firstSlot.length; j++) {
167             EONLightPath lp = cp.createCandidateEONLightPath(
                flow.getSource(), flow.getDestination(), links,
168                 firstSlot[j], (firstSlot[j] +
                    requiredSlots - 1), modulation);
169             if ((id = cp.getVT().createLightpath(lp)) >= 0) {
170                 lps[0] = cp.getVT().getLightpath(id);
171                 if (!cp.acceptFlow(flow.getID(), lps)) {
172                     cp.getVT().deallocatedLightpaths(lps);
173                 } else {
174                     return;
175                 }
176             }
177         }
178     }
179     // Block the call
180     cp.blockFlow(flow.getID());
181 }
182
183 public void KSPwithWeightedLinks(Flow flow) {
184     int[] nodes;
185     int[] links;
186     long id;
187     LightPath[] lps = new LightPath[1];
188     ArrayList<Integer>[] kpaths = YenKSP.kShortestPaths(graph
        , flow.getSource(), flow.getDestination(), ksp);
189
190     double[] sortRouteByLinksWeightByArea = new double[ksp];
191     for (int k = 0; k < kpaths.length; k++) {
192         sortRouteByLinksWeightByArea[k]=0;
193         nodes = route(kpaths, k);

```

```

194     if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
195         cp.blockFlow(flow.getID());
196         return;
197     }else{
198         links = new int[nodes.length - 1];
199         for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
200             links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes
201                 [j + 1]).getID();
202
203             switch(cp.getPT().getNode(j).getGroup()){
204                 case 0:
205                     if(cp.getPT().getNode(j+1).getGroup()
206                         ==0){
207                         sortRouteByLinksWeightByArea[k]+=
208                             WeightLinksInnerArea0;
209                     }else{
210                         sortRouteByLinksWeightByArea[k]+=
211                             WeightLinksCrossArea;
212                     }
213                     break;
214                 case 1:
215                     if(cp.getPT().getNode(j+1).getGroup()
216                         ==1){
217                         sortRouteByLinksWeightByArea[k]+=
218                             WeightLinksInnerArea1;
219                     }else{
220                         sortRouteByLinksWeightByArea[k]+=
221                             WeightLinksCrossArea;
222                     }
223                     break;

```

```

224         default:
225             break;
226     }
227 }
228 }
229 }
230
231 sortRoutes(kpaths, sortRouteByLinksWeightByArea);
232 for (int k = 0; k < kpaths.length; k++) {
233     nodes = route(kpaths, k);
234     if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
235         cp.blockFlow(flow.getID());
236         return;
237     }
238
239     links = new int[nodes.length - 1];
240     for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
241         links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes[j +
242             1]).getID();
243     }
244
245     int requiredSlots = Modulation.convertRateToSlot(flow
246         .getRate(), EONPhysicalTopology.getSlotSize(),
247         modulation);
248
249     int[] firstSlot;
250     for (int i = 0; i < links.length; i++) {
251         firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink(links[i]
252             ])).firstFit(requiredSlots);
253         for (int j = 0; j < firstSlot.length; j++) {
254             EONLightPath lp = cp.
255                 createCandidateEONLightPath(flow.getSource
256                     (), flow.getDestination(), links,
257                     firstSlot[j], (firstSlot[j] +
258                         requiredSlots - 1), modulation);
259             if ((id = cp.getVT().createLightpath(lp)) >=
260                 0) {
261                 lps[0] = cp.getVT().getLightpath(id);
262                 cp.acceptFlow(flow.getID(), lps);
263                 return;

```

```

256         }
257     }
258 }
259 }
260 cp.blockFlow(flow.getID());
261 }
262
263 public void pseudoPartition(Flow flow) {
264     int[] nodes;
265     int[] links;
266     long id;
267     LightPath[] lps = new LightPath[1];
268
269     int ksp = 3;
270     int clusterOfSource = cp.getPT().getNode(flow.getSource()
271         ).getCluster();
272     int clusterofDestination = cp.getPT().getNode(flow.
273         getDestination()).getCluster();
274
275     ArrayList<Integer>[] kpaths = YenKSP.kShortestPaths(graph
276         , flow.getSource(), flow.getDestination(), ksp);
277
278     for (int k = 0; k < kpaths.length; k++) {
279         nodes = route(kpaths,k);
280         if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
281             cp.blockFlow(flow.getID());
282             return;
283         }
284         links = new int[nodes.length - 1];
285         for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
286             links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes[j +
287                 1]).getID();
288         }
289         int requiredSlots = Modulation.convertRateToSlot(flow
290             .getRate(), EONPhysicalTopology.getSlotSize(),
291             modulation);
292
293         int[] firstSlot = null;
294         for (int i = 0; i < links.length; i++) {
295             if(clusterOfSource==clusterofDestination){

```

```

290         if(clusterOfSource==3 || clusterOfSource==4){
291             firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink
292                 (links[i])).firstFit(requiredSlots);
293         }else{
294             firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink
295                 (links[i])).lastFit(requiredSlots);
296         }
297     } else {
298         firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink(
299             links[i])).lastFit(requiredSlots);
300     }
301     for (int j = 0; j < firstSlot.length; j++) {
302         EONLightPath lp = cp.
303             createCandidateEONLightPath(flow.getSource
304                 (), flow.getDestination(), links,
305                 firstSlot[j], (firstSlot[j] +
306                     requiredSlots - 1), modulation);
307         if ((id = cp.getVT().createLightpath(lp)) >=
308             0) {
309             lps[0] = cp.getVT().getLightpath(id);
310             if (!cp.acceptFlow(flow.getID(), lps)) {
311                 cp.getVT().deallocatedLightpaths(lps)
312                 ;
313             } else {
314                 return;
315             }
316         }
317     }
318     cp.blockFlow(flow.getID());
319 }

```

A.2 MAARS

```
1 public class MAARS implements RA {
2     private ControlPlaneForRA cp;
3     private WeightedGraph graph;
4     private int modulation;
5     private int[] pesos;
6     private final int ksp = 3;
7     private final int incremento = 1;
8
9     @Override
10    public void simulationInterface(ControlPlaneForRA cp) {
11        this.cp = cp;
12        this.graph = cp.getPT().getWeightedGraph();
13        this.modulation = Modulation._QPSK;
14        this.pesos = new int[graph.size()];
15        for (int i = 0; i < pesos.length; i++) {
16            pesos[i] = 1;
17        }
18    }
19
20    @Override
21    public void setModulation(int modulation) {
22    }
23
24    @Override
25    public void simulationEnd() {
26    }
27
28    @Override
29    public void flowArrival(Flow flow) {
30        int[] nodes;
31        int[] links;
32        long id;
33        LightPath[] lps = new LightPath[1];
34
35        int sourceGroup = cp.getPT().getNode(flow.getSource()).
36            getGroup();
37        int dstGroup = cp.getPT().getNode(flow.getDestination())
38            .getGroup();
```

```

37
38     WeightedGraph grafo_pesos;
39
40     if (sourceGroup == dstGroup) {
41         grafo_pesos = get_grafo_pesos(graph);
42     } else {
43         grafo_pesos = graph;
44     }
45
46     ArrayList<Integer>[] kpaths = YenKSP.kShortestPaths(
47         grafo_pesos, flow.getSource(), flow.getDestination(),
48         ksp);
49
50     int[] listFF = new int[ksp];
51     for (int i = 0; i < ksp; i++) {
52         listFF[i] = Integer.MAX_VALUE;
53     }
54
55     for (int k = 0; k < kpaths.length; k++) {
56         nodes = route(kpaths, k);
57         if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
58             continue;
59         }
60
61         links = new int[nodes.length - 1];
62         for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
63             links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes[j +
64                 1]).getID();
65         }
66
67         int requiredSlots = Modulation.convertRateToSlot(flow
68             .getRate(), EONPhysicalTopology.getSlotSize(),
69             modulation);
70         int[] firstSlot;
71         firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink(links[0])).
72             firstFit(requiredSlots);
73         for (int j = 0; j < firstSlot.length; j++) {
74             EONLightPath lp = cp.createCandidateEONLightPath(
75                 flow.getSource(), flow.getDestination(), links,
76                 firstSlot[j], (firstSlot[j] +
77                     requiredSlots - 1), modulation);

```

```

69         if ((id = cp.getVT().createLightpath(lp)) >= 0) {
70             lps[0] = cp.getVT().getLightpath(id);
71             listFF[k] = ((EONLightPath) lps[0]).
                getFirstSlot();
72             cp.getVT().deallocatedLightpaths(lps);
73             break;
74         }
75     }
76 }
77
78 int indexMenor = 0;
79 for (int m = 0; m < listFF.length; m++) {
80     if (listFF[m] < listFF[indexMenor]) {
81         indexMenor = m;
82     }
83 }
84
85 if (listFF[indexMenor] != Integer.MAX_VALUE) {
86     nodes = route(kpaths, indexMenor);
87     if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
88         cp.blockFlow(flow.getID());
89         return;
90     }
91
92     links = new int[nodes.length - 1];
93     for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
94         links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes[j +
                1]).getID();
95     }
96
97     int requiredSlots = Modulation.convertRateToSlot(flow
            .getRate(), EONPhysicalTopology.getSlotSize(),
            modulation);
98     int[] firstSlot;
99     firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink(links[0])).
            firstFit(requiredSlots);
100    for (int j = 0; j < firstSlot.length; j++) {
101        EONLightPath lp = cp.createCandidateEONLightPath(
            flow.getSource(), flow.getDestination(), links,

```

```

102         firstSlot[j], (firstSlot[j] +
103             requiredSlots - 1), modulation);
104     if ((id = cp.getVT().createLightpath(lp)) >= 0) {
105         lps[0] = cp.getVT().getLightpath(id);
106         if (!cp.acceptFlow(flow.getID(), lps)) {
107             cp.getVT().deallocatedLightpaths(lps);
108         } else {
109             setPesos(nodes);
110             return ;
111         }
112     }
113 }
114 cp.blockFlow(flow.getID());
115 }
116
117 private int[] route(ArrayList<Integer>[] kpaths, int k) {
118     if (kpaths[k] != null) {
119         int[] path = new int[kpaths[k].size()];
120         for (int i = 0; i < path.length; i++) {
121             path[i] = kpaths[k].get(i);
122         }
123         return path;
124     } else {
125         return null;
126     }
127 }
128
129 @Override
130 public void flowDeparture(long id) {
131 }
132
133 private WeightedGraph get_grafo_pesos(WeightedGraph graph) {
134     WeightedGraph g = new WeightedGraph(graph.size());
135     for (int i = 0; i < graph.size(); i++) {
136         for (int j = 0; j < graph.size(); j++) {
137             if (i != j && graph.isEdge(i, j)) {
138                 g.addEdge(i, j, pesos[j]);
139             }
140         }
141     }

```

```
141     }
142     return g;
143 }
144
145 private void setPesos(int[] nodes) {
146     for (int i = 0; i < nodes.length; i++) {
147         if (cp.getPT().getNode(nodes[i]).getGroup() == 1){
148             this.pesos[nodes[i]] = this.pesos[nodes[i]] +
149                 incremento;
150         } else {
151             this.pesos[nodes[i]]++;
152         }
153     }
154 }
155 }
```

A.3 MCARS

```
1 public class MCARS implements RA {
2
3     private ControlPlaneForRA cp;
4     private WeightedGraph graph;
5     private int modulation;
6
7     private int[] pesos;
8     private final int ksp = 3;
9     private final int incremento = 1;
10
11     @Override
12     public void simulationInterface(ControlPlaneForRA cp) {
13         this.cp = cp;
14         this.graph = cp.getPT().getWeightedGraph();
15         this.modulation = Modulation._QPSK;
16         this.pesos = new int[graph.size()];
17         for (int i = 0; i < pesos.length; i++) {
18             pesos[i] = 1;
19         }
20     }
21
22     @Override
23     public void setModulation(int modulation) {
24     }
25
26     @Override
27     public void simulationEnd() {
28     }
29
30     @Override
31     public void flowArrival(Flow flow) {
32         int[] nodes;
33         int[] links;
34         long id;
35         LightPath[] lps = new LightPath[1];
36
37         int sourceCluster = cp.getPT().getNode(flow.getSource()).
            getCluster();
```

```

38     int dsteCluster = cp.getPT().getNode(flow.getDestination
39         ()).getCluster();
40
41     WeightedGraph grafo_pesos;
42
43     if (sourceCluster == dsteCluster) {
44         grafo_pesos = get_grafo_pesos(graph);
45     } else {
46         grafo_pesos = graph;
47     }
48     ArrayList<Integer>[] kpaths = YenKSP.kShortestPaths(
49         grafo_pesos, flow.getSource(), flow.getDestination(),
50         ksp);
51
52     int[] listFF = new int[ksp];
53     for (int i = 0; i < ksp; i++) {
54         listFF[i] = Integer.MAX_VALUE;
55     }
56
57     for (int k = 0; k < kpaths.length; k++) {
58         nodes = route(kpaths, k);
59         if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
60             continue;
61         }
62         links = new int[nodes.length - 1];
63         for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
64             links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes[j +
65                 1]).getID();
66         }
67         int requiredSlots = Modulation.convertRateToSlot(flow
68             .getRate(), EONPhysicalTopology.getSlotSize(),
69             modulation);
70         int[] firstSlot;
71         firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink(links[0])).
72             firstFit(requiredSlots);
73         for (int j = 0; j < firstSlot.length; j++) {
74             EONLightPath lp = cp.createCandidateEONLightPath(
75                 flow.getSource(), flow.getDestination(), links,

```

```

69         firstSlot[j], (firstSlot[j] +
70             requiredSlots - 1), modulation);
71     if ((id = cp.getVT().createLightpath(lp)) >= 0) {
72         lps[0] = cp.getVT().getLightpath(id);
73         listFF[k] = ((EONLightPath) lps[0]).
74             getFirstSlot();
75         cp.getVT().deallocatedLightpaths(lps);
76         break;
77     }
78 }
79
80 int indexMenor = 0;
81 for (int m = 0; m < listFF.length; m++) {
82     if (listFF[m] < listFF[indexMenor]) {
83         indexMenor = m;
84     }
85 }
86
87 if (listFF[indexMenor] != Integer.MAX_VALUE) {
88     nodes = route(kpaths, indexMenor);
89     if (nodes.length == 0 || nodes == null) {
90         cp.blockFlow(flow.getID());
91         return;
92     }
93
94     links = new int[nodes.length - 1];
95     for (int j = 0; j < nodes.length - 1; j++) {
96         links[j] = cp.getPT().getLink(nodes[j], nodes[j +
97             1]).getID();
98     }
99     int requiredSlots = Modulation.convertRateToSlot(flow
100         .getRate(), EONPhysicalTopology.getSlotSize(),
101         modulation);
102     int[] firstSlot;
103     firstSlot = ((EONLink) cp.getPT().getLink(links[0])).
104         firstFit(requiredSlots);
105     for (int j = 0; j < firstSlot.length; j++) {
106         EONLightPath lp = cp.createCandidateEONLightPath(
107             flow.getSource(), flow.getDestination(), links,

```

```

102         firstSlot[j], (firstSlot[j] +
103             requiredSlots - 1), modulation);
104     if ((id = cp.getVT().createLightpath(lp)) >= 0) {
105         lps[0] = cp.getVT().getLightpath(id);
106         if (!cp.acceptFlow(flow.getID(), lps)) {
107             cp.getVT().deallocatedLightpaths(lps);
108         } else {
109             setPesos(nodes);
110             return ;
111         }
112     }
113 }
114 cp.blockFlow(flow.getID());
115 }
116
117 private int[] route(ArrayList<Integer>[] kpaths, int k) {
118     if (kpaths[k] != null) {
119         int[] path = new int[kpaths[k].size()];
120         for (int i = 0; i < path.length; i++) {
121             path[i] = kpaths[k].get(i);
122         }
123         return path;
124     } else {
125         return null;
126     }
127 }
128
129 @Override
130 public void flowDeparture(long id) {
131 }
132
133 private WeightedGraph get_grafo_pesos(WeightedGraph graph) {
134     WeightedGraph g = new WeightedGraph(graph.size());
135     for (int i = 0; i < graph.size(); i++) {
136         for (int j = 0; j < graph.size(); j++) {
137             if (i != j && graph.isEdge(i, j)) {
138                 g.addEdge(i, j, pesos[j]);
139             }
140         }
141     }

```

```
141     }
142     return g;
143 }
144
145 private void setPesos(int[] nodes) {
146     for (int i = 0; i < nodes.length; i++) {
147         if (cp.getPT().getNode(nodes[i]).getGroup() == 1){
148             this.pesos[nodes[i]] = this.pesos[nodes[i]] +
149                 incremento;
150         } else {
151             this.pesos[nodes[i]]++;
152         }
153     }
154 }
```