



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

JOSÉ CARNEIRO MARANHÃO NETO

REDES ÓPTICAS RECONFIGURÁVEIS
COM RESTRIÇÕES DINÂMICAS DE
CAMADA FÍSICA

CAMPINAS

2015

JOSÉ CARNEIRO MARANHÃO NETO

**REDES ÓPTICAS RECONFIGURÁVEIS
COM RESTRIÇÕES DINÂMICAS DE
CAMADA FÍSICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica** na área de Telecomunicações e Telemática.

ORIENTADOR: PROF. HELIO WALDMAN, PHD

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO JOSÉ CARNEIRO MARANHÃO NETO, E ORIENTADA PELO PROF. DR. HELIO WALDMAN.

CAMPINAS

2015

Agência de fomento: Não se aplica
Nº processo: Não se aplica

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

M325r Maranhão Neto, José Carneiro, 1983-
Redes ópticas reconfiguráveis com restrições dinâmicas de camada física /
José Carneiro Maranhão Neto. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Helio Waldman.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telecomunicações. 2. Redes ópticas. 3. Sistemas WDM. 4. Análise de
redes (Planejamento). I. Waldman, Helio, 1944-. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Reconfigurable optical networks with dynamic physical
impairments

Palavras-chave em inglês:

Telecommunication

Optical networks

WDM systems

Network analysis (Planning)

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Helio Waldman [Orientador]

Joaquim Ferreira Martins Filho

Maurício Ferreira Magalhães

Data de defesa: 05-09-2015


Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: José Carneiro Maranhão Neto

Data da Defesa: 5 de agosto de 2015

Título da Tese: "Redes Ópticas Reconfiguráveis com Restrições Dinâmicas de Camada Física"

Prof. Dr. Hélio Waldman (Presidente): 

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho: 

Prof. Dr. Maurício Ferreira Magalhães: 

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, inicialmente, ao professor Dr. Helio Waldman pela confiança, amizade, disponibilidade e por todos os ensinamentos transmitidos. Além de orientador, foi sempre um exemplo de profissional dedicado, educado e de extrema competência.

Agradeço também aos professores Dr. Joaquim Ferreira e Dr. Maurício Magalhães pelas enriquecedoras sugestões e revisões ao trabalho.

Ao professor Dr. Daniel Chaves por compartilhar o seu modelo de dissertação em Latex, de grande valia para este trabalho.

Ao amigo e companheiro de pesquisa Dr. André Soares pelo incentivo e valiosas contribuições ao longo de todo o trabalho.

Ao amigo Dr. William Giozza, o grande responsável pelo meu ingresso no mundo das comunicações ópticas.

À Padtec S/A pela oportunidade de atuar profissionalmente no setor de comunicações ópticas e fazer parte de um time de excelência na área de P&D no Brasil. Um agradecimento em especial a todos os integrantes da área de Tecnologia da Padtec, além dos meus mentores Marcos Siqueira, Roberto Nakamura e Jorge Salomão. Um privilégio trabalhar ao lado de todos vocês.

Um agradecimento especial à Lígia Maranhão, mãe, amiga e companheira de todos os momentos. Obrigado por sempre me motivar a ir além, em busca da excelência. O seu apoio incondicional foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Ao meu pai, meu anjo da guarda.

À minha esposa Renata Dattoli e à minha princesa Nicole Maranhão pelo carinho.

Aos amigos e companheiros de república Paulo Ducati e Péricles Gumerato pelos momentos de alegria no decorrer da minha estadia em Campinas.

Finalmente, gostaria de agradecer à UNICAMP e ao DECOM pela oportunidade de fazer parte do seu corpo discente, motivo de muito orgulho e satisfação.

JOSÉ CARNEIRO MARANHÃO NETO

Universidade Estadual de Campinas

05 de Agosto de 2015

Resumo da Dissertação apresentada à UNICAMP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

REDES ÓPTICAS RECONFIGURÁVEIS COM RESTRICÇÕES DINÂMICAS DE CAMADA FÍSICA

José Carneiro Maranhão Neto

Agosto/2015

Orientador: Prof. Helio Waldman, PhD

Área de Concentração: Comunicações Ópticas

Palavras-chaves: Telecomunicações, Redes ópticas, Sistemas WDM, Análise de redes (Planejamento)

Número de páginas: 107

As redes ópticas reconfiguráveis compõem o *backbone* de grande parte das redes de transporte em operação ao redor do mundo. No entanto, os desafios para ampliar a capacidade e eficiência destas redes ainda são enormes. Com objetivo de maximizar a carga útil de tráfego suportada nas redes ópticas WDM reconfiguráveis é de fundamental importância adotar eficientes algoritmos RWA. Os algoritmos RWA são responsáveis pela escolha adequada de recursos na rede para provisionar novas conexões de forma a maximizar a probabilidade de atendimento das futuras conexões.

Nesta dissertação, o problema RWA será investigado sob diversas novas perspectivas através de um ambiente de simulação. Com a preocupação de retratar os reais problemas vivenciados pelas redes ópticas reconfiguráveis, os elementos de rede foram modelados de acordo com as tecnologias e arquiteturas atualmente empregadas no mercado. No caso dos elementos de comutação ROADM e amplificadores EDFA, serão adotadas modelagens ainda não exploradas na literatura relacionada ao problema RWA.

Diversos estudos abordam o problema RWA levando em consideração as degradações de camada física na escolha dos recursos apropriados para o provisionamento de novas conexões. Esta abordagem é conhecida na literatura como RWA-IA. Neste trabalho será adotada uma abordagem mais realista, considerando não apenas as condições de camada física para o provisionamento de novas conexões, mas também o impacto na camada física causado pelo estabelecimento de novas conexões nas demais já ativas na rede.

Ainda neste trabalho serão propostos dois novos algoritmos de alocação de comprimento de onda sensíveis às degradações dinâmicas da camada física. Um extenso estudo com a avaliação de desempenho destes algoritmos será realizado, contemplando também um estudo comparativo com outros algoritmos encontrados na literatura e utilizados com frequência no mercado. Os algoritmos propostos demonstraram excelente desempenho, conseguindo inclusive superar o desempenho dos demais algoritmos avaliados em termos de probabilidade de bloqueio.

Abstract of Dissertation presented to UNICAMP as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

RECONFIGURABLE OPTICAL NETWORKS WITH DYNAMIC PHYSICAL IMPAIRMENTS

José Carneiro Maranhão Neto

August/2015

Supervisor: Prof. Helio Waldman, PhD

Area of Concentration: Optical Communications

Keywords: Telecommunication, Optical networks, WDM systems, Network analysis (Planning)

Number of pages: 107

Reconfigurable optical networks has been adopted as the backbone solution by most of transport networks around the world. However, in order to expand the capacity and efficiency of these networks, there are still many challenges to overcome. In order to improve the reconfigurable optical network capacity is very important to work with efficient RWA algorithms capable to find appropriate network resources for new lightpaths and, at the same, to minimize the blocking probability of future demands.

In this dissertation, the RWA problem will be investigated under several new perspectives through a simulation environment. Committed to retract real problems experienced by reconfigurable optical networks, network elements were design according to the technologies and architectures currently employed in the industry. The ROADM switching elements and EDFA amplifiers were design in an unprecedented way in the RWA literature.

Several studies addressing the RWA problem have already incorporated the physical layer impairments in order to find the appropriate resources for establishing new lightpaths. This approach has become known in the literature as Impairment Aware RWA (IA-RWA). In this dissertation, we adopted a more realistic approach to the IA-RWA problem, also considering the impact on the physical layer caused by the establishment of new connections in the others already established in the network.

Moreover, in this work we will propose two new wavelength assignment algorithms aware to the physical layer dynamic impairments. An extensive performance evaluation study about these algorithms will be performed, also contemplating a comparative study with other algorithms from the literature and widely used in the industry. The proposed new algorithms have shown excellent performance, outperforming other algorithms evaluated in terms of blocking probability.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Comparativo entre o número de Usuários de Internet x Assinaturas de Celular x População Mundial.	17
1.2	Comparativo entre o número de Usuários de Internet x Assinaturas de Celular x População no Brasil.	17
1.3	Percentual de Cobertura da População Mundial através de tecnologias de transmissão sem fio.	18
1.4	Nível de adesão da População Mundial com cobertura de redes 2G/3G à Internet.	19
1.5	<i>Forecast</i> do Tráfego de Dados nas Redes Móveis, Fixas e Privadas ao redor do Mundo.	20
1.6	<i>Forecast</i> da Participação das Redes Metro e <i>Long-Haul</i> no Tráfego de Dados ao redor do Mundo.	20
1.7	Participação das Tecnologias SONET/SDH, WDM e OTN no mercado de equipamentos para redes ópticas de transporte.	21
1.8	<i>Forecast</i> da participação das taxas de transmissão em sistemas DWDM de longo alcance.	23
1.9	<i>Forecast</i> da participação das diferentes configurações dos módulos WSS no mercado de redes ópticas WDM.	25
1.10	Distintas abordagens ao problema RWA, com roteamento fixo.	26
1.11	Abordagem RWA-DIA com roteamento fixo.	28
2.1	Elementos envolvidos em uma rota de comunicação.	31
2.2	Degradações de camada física ao longo da rota de comunicação.	35
2.3	Região de Saturação dos Amplificadores Ópticos com tecnologia EDFA.	36
2.4	a) Máscara de operação dos amplificadores ópticos. b) Curva de Nível da Figura de Ruído ao longo da máscara de operação.	37
2.5	Escolha de Ganho Alvo respeitando a Faixa Dinâmica do amplificador. a) Faixa Dinâmica com 19 dB. b) Faixa Dinâmica com 22 dB.	38
2.6	Modelo funcional do ROADM.	39
2.7	Modelagem do ROADM com arquitetura baseada em comutadores por comprimento de onda.	41
2.8	Incidência do <i>co-wavelength crosstalk</i>	42
2.9	Incidência do <i>self-wavelength crosstalk</i>	43
2.10	Incidência do <i>neighbor-wavelength crosstalk</i>	43
2.11	Modelo funcional do WSS.	45
2.12	Modelagem do ROADM com Arquitetura Broadcast&Select com base nos Comutadores WSS.	46
2.13	Incidência de <i>Crosstalk</i> no ROADM Broadcast&Select.	48

3.1	Evolução das abordagens ao problema RWA.	52
3.2	Abordagem RWA-DIA Altruísta com roteamento fixo alternativo.	55
3.3	Fluxograma do algoritmo CIA.	58
3.4	Escolha do melhor comprimento de onda através do Interference Factor do algoritmo CIA e do número de componentes de crosstalk do algoritmo C-RP.	59
4.1	Topologias avaliadas: a)Pacific Bell; b)COST239; c)USNet.	61
4.2	Impacto das diferentes abordagens ao problema RWA na Probabilidade de Bloqueio - Topologia Pacific Bell.	64
4.3	Impacto dos diferentes tipos de bloqueio - Topologia Pacific Bell.	64
4.4	Impacto das diferentes abordagens ao problema RWA na Probabilidade de Bloqueio - Topologia USNet.	66
4.5	Impacto dos diferentes tipos de bloqueio - Topologia USNet.	66
4.6	Impacto das diferentes abordagens ao problema RWA na Probabilidade de Bloqueio - Topologia COST 239.	68
4.7	Impacto dos diferentes tipos de bloqueio - Topologia COST 239.	68
4.8	Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 40 dB.	70
4.9	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 40 dB.	70
4.10	Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 35 dB.	73
4.11	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 35 dB.	73
4.12	Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 40 dB.	75
4.13	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 40 dB.	75
4.14	Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 35 dB.	77
4.15	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 35 dB.	77
4.16	Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 40 dB.	79
4.17	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 40 dB.	79
4.18	Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 35 dB.	80
4.19	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 35 dB.	80
4.20	Ganho percentual de carga de tráfego devido a adoção dos algoritmos CIA-FF e CIA-RD em detrimento ao algoritmo C-RP - Abordagem RWA-DIA Altruísta	82
4.21	Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolação = 35 dB.	85

4.22	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolção = 35 dB.	85
4.23	Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolção = 35 dB.	87
4.24	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolção = 35 dB.	87
4.25	Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolção = 35 dB.	88
4.26	Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolção = 35 dB.	88
4.27	Ganho percentual de carga de tráfego devido a adoção dos algoritmos CIA-FF e CIA-RD em detrimento ao algoritmo C-RP - Abordagem RWA-DIA Egoísta	89
A.1	Janela Topologia - SimRWA-IA.	104
A.2	Janela RWA - SimRWA-IA.	105
A.3	Janela Parâmetros - SimRWA-IA.	106
A.4	Janela Resultados - SimRWA-IA.	106

LISTA DE TABELAS

2.1	Principais parâmetros da Interface de Rede OTU4v.	33
4.1	Principais características das topologias avaliadas.	62
4.2	Principais características dos elementos de rede.	63

LISTA DE SIGLAS

ACO Ausência de Comprimento de Onda disponível. 28–30, 51–53

AGC *Automatic Gain Control*. 36, 37, 39

ASE *Amplified Spontaneous Emission*. 35

AWG *Arrayed Waveguide Gratings*. 34

BER *Bit Error Rate*. 26

C-RP *Crosstalk Aware Random Pick*. 56

CAGR *Compound Annual Growth Rate*. 16–19, 21, 24

CDN *Content Delivery Networks*. 19

CIA *Crosstalk Interference Avoidance*. 57

DGD *Differential Group Delay*. 22, 26, 33

DP-QPSK *Dual Polarization - Quadrature Phase Shift Keying*. 22, 23, 32, 34, 49

EDFA *Erbium Doped Fiber Amplifier*. 34–37, 39

FWHM *Full Width at Half Maximum*. 34, 49

FWM *Four-Wave Mixing*. 33

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 22

ITU-T *International Telecommunication Union Standardization*. 17, 21, 22

LCoS *Liquid Crystal on Silicon*. 24, 44

LSP *Label Switched Path*. 41

LTE *Long Term Evolution*. 18

MEMS *Micro-Electro-Mechanical Systems*. 24, 44

OADM *Optical Add and Drop Multiplexer*. 23

ODUK *Optical Channel Data Unit*. 22

OEO *Optical-Electrical-Optical*. 23

OID OSNR Inadequado para algum dos Demais circuitos ópticos já ativos na rede. 28–30, 53, 83, 93

OIF *Optical Internetworking Forum*. 22

OIN OSNR Inadequado para o Novo circuito óptico candidato. 28–30, 52, 53

OSNR *Optical Signal to Noise Ratio*. 26, 35

OTN *Optical Transport Network*. 21, 22, 31, 32

OXC *Optical Crossconnect*. 40

PNB Produto Nacional Bruto. 17, 18

PNBL Plano Nacional de Banda Larga. 18

QoE *Quality of Experience*. 20

ROADM *Reconfigurable Optical Add and Drop*. 24, 29, 30, 39–45, 52

RSA *Routing and Spectrum Assignment*. 93

RWA *Routing and Wavelength Assignment*. 25, 26, 30, 51, 52, 54

RWA-C RWA Convencional. 63

RWA-DIA *Routing and Wavelength Assignment - Dynamic Impairments Aware*. 27–30, 40, 53, 54, 56, 83

RWA-IA *Routing and Wavelength Assignment - Impairments Aware*. 26, 27, 52, 53

RWA-SIA *Routing and Wavelength Assignment - Static Impairments Aware*. 27–29, 52, 53

SD-FEC *Software Decision - Forward Error Correction*. 22

SPM *Self-Phase Modulation*. 33

VoD *Video On Demand*. 19

WDM *Wavelength Division Multiplexing*. 21–23, 25, 31, 32, 34–36, 38, 40–42, 44, 45

WSS *Wavelength Selective Switch*. 24, 29, 30, 44, 45, 63

XPM *Cross-Phase Modulation*. 33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Tendências de Mercado das Comunicações Ópticas	21
1.2	Redes Ópticas Reconfiguráveis com Restrições de Camada Física	25
1.3	Trabalhos Relacionados e Contribuições	27
1.4	Estrutura da Dissertação	30
2	MODELAGEM DOS ELEMENTOS DE REDE E RESTRIÇÕES DE CAMADA FÍSICA	31
2.1	Transponders Ópticos	32
2.2	Multiplexadores e Demultiplexadores Ópticos	34
2.3	Amplificadores Ópticos	34
2.4	ROADM - Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers	39
2.4.1	Arquitetura com Comutadores por Comprimento de Onda	40
2.4.2	Arquitetura Broadcast&Select com Comutadores WSS	44
3	ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE ROTA E COMPRIMENTO DE ONDA	50
3.1	Motivação	50
3.2	Evolução das Abordagens ao Problema RWA	51
3.3	Algoritmos RWA Avaliados	54
3.3.1	RANDOM - (RD)	55
3.3.2	FIRST-FIT - (FF)	56
3.3.3	Crosstalk Aware Random Pick - (C-RP)	56
3.3.4	Crosstalk Interference Avoidance - (CIA)	57
4	RESULTADOS	60
4.1	Impacto das Diferentes Abordagens ao Problema RWA	62
4.2	Resultados para a Abordagem RWA-DIA Altruísta	69
4.2.1	Pacific Bell	69
4.2.2	USNet	74
4.2.3	COST 239	78
4.2.4	Conclusões da Abordagem RWA-DIA Altruísta	81
4.3	Resultados para a Abordagem RWA-DIA Egoísta	83
4.3.1	Pacific Bell	84
4.3.2	USNet	86
4.3.3	COST 239	86
4.3.4	Conclusões da Abordagem RWA-DIA Egoísta	89

5 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS	95
Apêndice A SIMULADOR SIMRWA-IA	103
Apêndice B LISTA DE PUBLICAÇÕES	107
B.1 Artigos sobre RWA-DIA Altruísta e Algoritmo CIA	107
B.2 Artigos sobre Amplificadores para Redes Reconfiguráveis	107

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

The future of the world economy is a knowledge economy – the Internet, its backbone.

— Mark Zuckerberg

A comunicação humana passou por diversas revoluções ao longo da história. A começar pela comunicação corporal desenvolvida há milhares de anos, passando pela comunicação oral, a comunicação escrita e finalmente a nova Era da comunicação digital. Através da comunicação escrita foi possível quebrar a barreira temporal do conhecimento, permitindo que uma mensagem pudesse existir independente de um emissor e podendo ser recebida a qualquer momento por alguém que soubesse decifrar o código. O impacto da comunicação escrita na história da humanidade foi suficiente para virar o marco do fim da pré-história. Há menos de um século a comunicação sofreu mais uma grande revolução com a chegada da Era digital. Após a barreira temporal da comunicação ter sido quebrada pela escrita, a Era digital possibilitou a comunicação em massa, com alcance e rapidez. O sucesso da Era digital traduz-se em números de adeptos em tão pouco tempo. A Figura 1.1 apresenta um comparativo entre o crescimento da população mundial, o número de assinaturas de celular e o número de Internautas ao longo dos últimos 10 anos [1–3].

Em 2004, o número de assinaturas de celular correspondia a praticamente 1/3 da população mundial. Com uma taxa de crescimento CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) de 16,3% ao longo dos últimos 10 anos, em 2013 o número de assinaturas de celular atingiu praticamente o número de habitantes no mundo. Neste mesmo período a taxa de crescimento CAGR da população mundial foi de 1,3%. O número de Internautas em 2004 correspondia a 14% da população, e ao longo de 10 anos, com uma taxa CAGR de 13,2%, atingiu 2,7 Bilhões de usuários.

A Era digital no Brasil conquistou, proporcionalmente, um número ainda maior de adeptos. De acordo com a Figura 1.2, desde 2010 o número de assinaturas de celular já ultrapassou a população

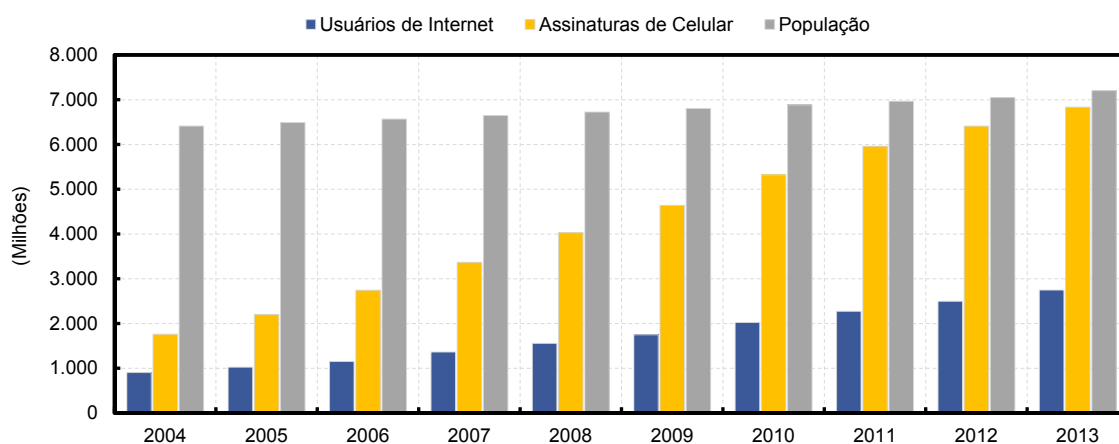


Figura 1.1: Comparativo entre o número de Usuários de Internet x Assinaturas de Celular x População Mundial.

do país. Enquanto a taxa de crescimento CAGR da população foi de 0,9%, o número de assinaturas de celular cresceu em um ritmo de 17,1% ao longo dos últimos 10 anos. Seguindo a tendência mundial, o crescimento do número de usuários de Internet ficou logo atrás, com CAGR de 13,1%. O número de internautas no Brasil em 2013 já era superior à metade da população [1–3].

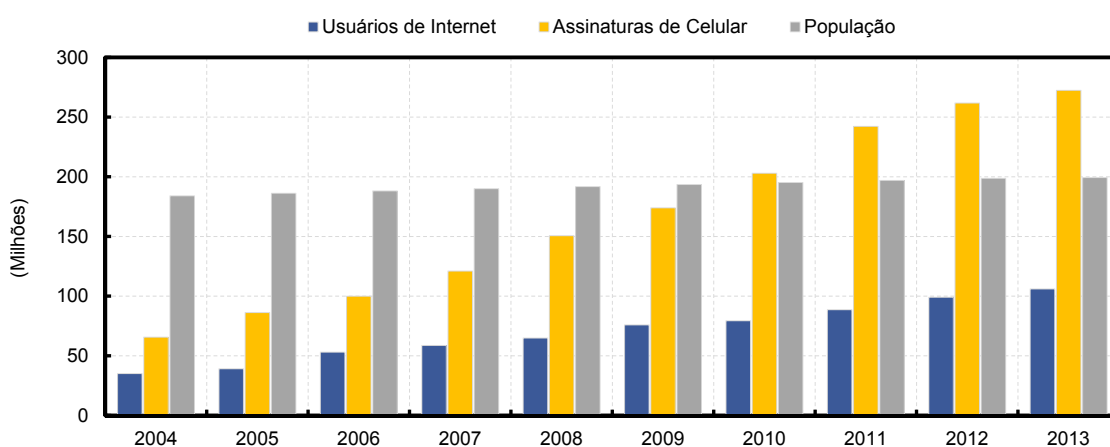


Figura 1.2: Comparativo entre o número de Usuários de Internet x Assinaturas de Celular x População no Brasil.

A partir das Figuras 1.1 e 1.2 é possível concluir que uma grande parcela das assinaturas de celular ainda não aderiu ao plano de dados para navegar na Internet. Dois fatores contribuem para este cenário. O primeiro, e mais relevante, é o alto custo cobrado pelas operadoras de telecomunicações no plano de dados móvel. O segundo fator é o alto custo dos *smartphones*. Segundo o relatório divulgado em 2013 pelo ITU-T (*International Telecommunication Union Standardization*) [1], o custo médio de um plano de voz para celular seria equivalente a 7,4% do PNB (Produto Nacional Bruto) per capita, enquanto o custo do plano de dados móvel seria equivalente a 10% do PNB per capita. Nos países desenvolvidos, esta relação é bem mais atrativa, alcançando apenas 2% e 1,3% para os planos de voz e

dados móvel respectivamente. Ainda segundo [1], o Brasil ocupa a 75ª posição no Ranking dos países com menor custo do plano de dados móvel em relação ao PNB per capita. A redução do custo do plano de dados móvel terá um papel crítico no crescimento do número de usuários de Internet no mundo, e os provedores de conteúdo como o Facebook e o Google estão pressionando bastante as operadoras neste sentido, através dos projetos Internet.org e Google Fiber respectivamente.

De acordo com a Figura 1.3, 10 % da população mundial vive em regiões atendidas pela tecnologia de transmissão sem fio em alta velocidade LTE (*Long Term Evolution*), popularmente chamada de 4G. Mas o que impressiona são os 85% da população mundial que vivem em regiões já atendidas pelas tecnologias EDGE e GSM (2G) [4]. Isto representa um mercado potencial equivalente a 6,1 Bilhões de pessoas das quais apenas 2,7 Bilhões já aderiram a um plano de dados (Figura 1.4).

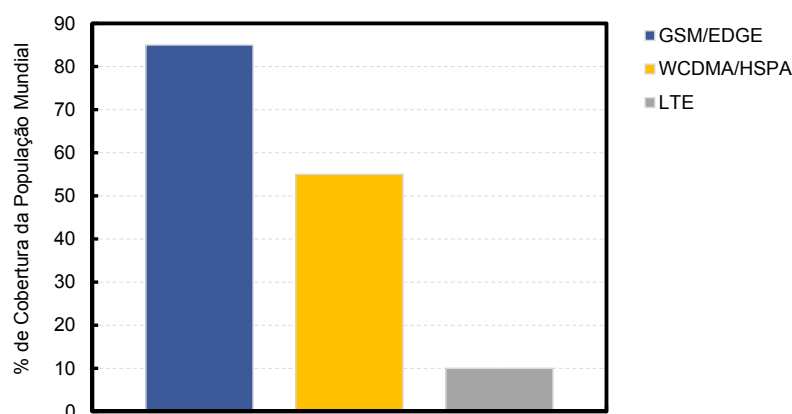


Figura 1.3: Percentual de Cobertura da População Mundial através de tecnologias de transmissão sem fio.

Para atender este mercado potencial de aproximadamente 3,4 Bilhões de usuários de Internet, considerando a taxa de crescimento de CAGR de 11,8% dos últimos 10 anos, ainda seriam necessários mais 7 anos.

Além dos planos de dados móveis, espera-se um crescimento significativo no volume de planos de dados fixos/residenciais nos próximos anos. O Brasil, o Uruguai, e outros países possuem projetos para universalização do acesso à Internet através de planos de dados de baixo custo, regulamentados e subsidiados pelo Governo Federal. Segundo [1], o preço médio do plano de dados fixo no mundo reduziu de 115,1% em 2008 para 22,1% em 2012 em termos de PNB per capita. O Brasil ocupa a 55ª posição no Ranking dos países com menor custo do plano de dados fixo. O PNBL (Plano Nacional de Banda Larga) lançado em 2009 pela Telebrás teve um papel importante para a redução dos preços praticados para os planos de dados no Brasil, quando fixou em R\$35,00 o valor do plano de dados de 1Mbps [5].

O projeto Internet.org [6] liderado por Mark Zuckerberg também promete ajudar a universalização da Internet. O projeto propõe a criação de um pacote básico de plano de dados, exclusivamente

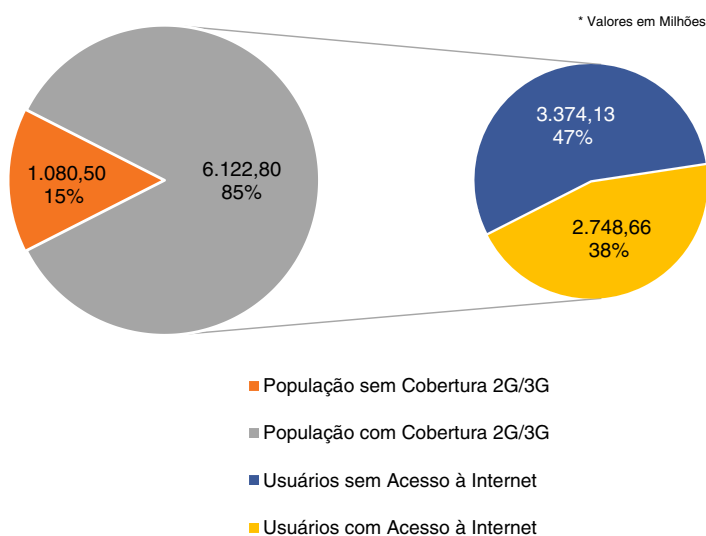


Figura 1.4: Nível de adesão da População Mundial com cobertura de redes 2G/3G à Internet.

para aplicações que consomem pouca banda, como por exemplo, *Text Messaging*, previsão do tempo, Wikipedia, Twitter, e é claro, Facebook. O objetivo é que as operadoras disponibilizem este pacote básico de serviços gratuitamente. Zuckerberg defende a ideia que a parcela da população que ainda não aderiu ao mundo da Internet, após experimentar o pacote básico, pode enxergar o grande valor agregado deste universo e decidir investir em um plano de dados padrão. Grandes empresas como a SAMSUNG, NOKIA e QUALCOMM já aderiram ao projeto Internet.org. Operadoras do Paraguai e Filipinas aceitaram o desafio e estão implantando o projeto, segundo Zuckerberg.

A universalização da Internet, o crescimento dos serviços em nuvem, a popularização dos serviços de vídeo como o Netflix e a expansão das redes de fornecimento de conteúdo CDN (*Content Delivery Networks*) são alguns dos fatores chaves que contribuirão para o crescimento no volume de dados nas redes de transporte. Segundo [7], o volume de dados mensal nas redes de transporte deve crescer a uma taxa CAGR de 21,4% no período entre 2013 e 2017. Dentre os três segmentos citados na Figura 1.5, a maior taxa de crescimento deve ocorrer no segmento das redes móveis com taxa CAGR de 64,2%.

Outra curiosidade relevante segundo [7] é o crescimento das Redes Metropolitanas frente às Redes *Long-Haul* (Longa Distância). Como pode ser observado na Figura 1.6, já em 2014, a estimativa era que o volume de tráfego transportado nas redes Metro ultrapasse o volume das redes *Long-Haul*.

O grande responsável por esta reviravolta, ainda segundo [7], é a expansão das redes CDN. Em 2017 espera-se que 51% de todo o tráfego Internet esteja localizado nas redes CDN. No Brasil, o serviço de VoD (*Video On Demand*) já é oferecido por diversos provedores de serviços *Triple Play*. Este é um típico serviço que concentra bastante tráfego em redes CDN. Outro exemplo relevante é o Netflix. Para evitar um altíssimo consumo de banda em redes Long-Haul, o Netflix instala grandes

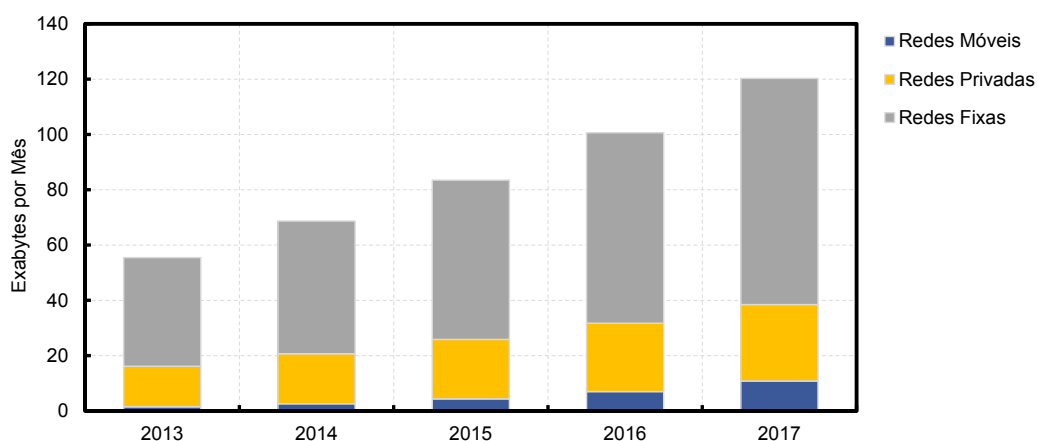


Figura 1.5: Forecast do Tráfego de Dados nas Redes Móveis, Fixas e Privadas ao redor do Mundo.

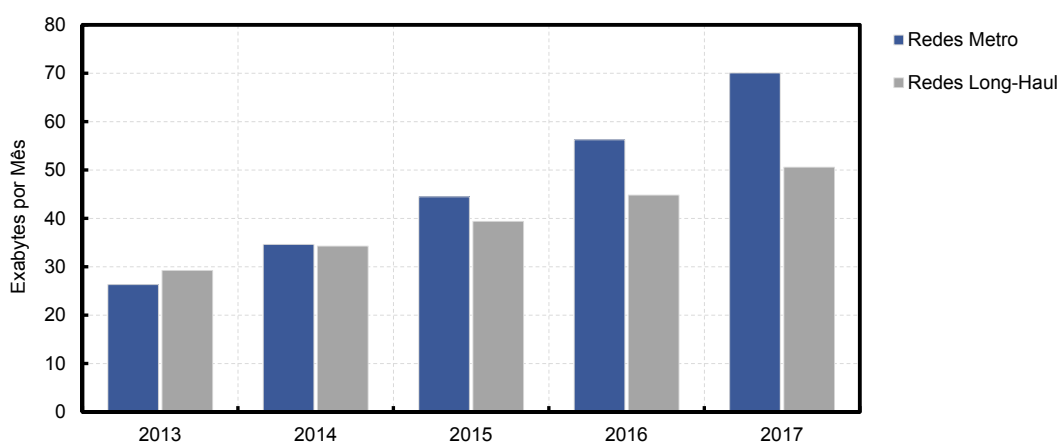


Figura 1.6: Forecast da Participação das Redes Metro e Long-Haul no Tráfego de Dados ao redor do Mundo.

servidores de conteúdo nas redes das principais operadoras ao redor do mundo. Com isso, as operadoras reduzem o consumo de banda dos links ópticos internacionais e possibilitam uma melhor QoE (*Quality of Experience*) aos seus clientes. Empresas como a Akamai Technologies, Inc. faturam Bilhões de USD por ano hospedando uma quantidade enorme de informações em seus milhares de servidores espalhados ao redor do mundo, também com o foco em aproximar a fonte de conteúdo do usuário final. O Google Earth é um exemplo de serviço que utiliza os servidores da Akamai para reduzir o tempo de carregamento das imagens e melhorar a QoE dos usuários. Todos estes fatores impulsionaram o crescimento das Redes Metro ao longo dos últimos anos.

As redes ópticas de comunicação, foco desta dissertação, compõem a *backbone* da maioria das redes de transporte em operação ao redor do mundo. Para suportar o forte crescimento do volume de dados da Era da comunicação digital, conforme discutido anteriormente nesta seção, as redes ópticas precisarão ser ampliadas e modernizadas.

1.1 Tendências de Mercado das Comunicações Ópticas

As redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) compõem a grande maioria das redes de *backbone* da atualidade. Nestas redes de transporte, os dados são transmitidos através de diversos comprimentos de onda multiplexados em uma única fibra óptica, resultando em uma melhor utilização da sua enorme capacidade de transmissão [8]. De acordo com a Figura 1.7, é possível observar que a tecnologia WDM conquistou a liderança do mercado de equipamentos para redes ópticas de transporte a partir de 2011. Entre 2012 e 2016 estima-se uma taxa de crescimento CAGR de 11,8% para o mercado de equipamentos com tecnologia WDM [9].

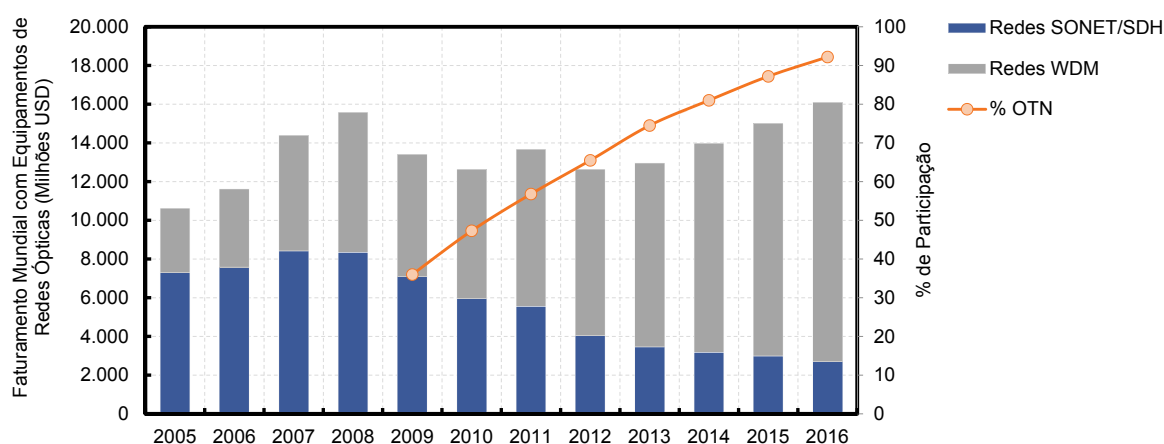


Figura 1.7: Participação das Tecnologias SONET/SDH, WDM e OTN no mercado de equipamentos para redes ópticas de transporte.

A tecnologia SONET/SDH surgiu em meados dos anos 80 e dominou o mercado ao longo de uma geração onde o tráfego transportado nas redes ópticas de comunicação era predominantemente voz. Com a popularização das redes de pacotes, e com o surgimento da tecnologia OTN, padronizada pelo ITU-T, a demanda por redes ópticas de transporte síncronas deixou de ser mandatária. Em 2001, o ITU-T publicou uma nova versão da recomendação G.709 incorporando a estrutura de quadro OTN (*Optical Transport Network*), com foco na transmissão de sinais ópticos de alta velocidade em redes WDM [10]. Após 10 anos esta tecnologia viria a conquistar uma posição de liderança no mercado ocupada até então pela tecnologia SONET/SDH.

Dentre os principais benefícios da tecnologia OTN, é possível destacar:

- Introdução dos códigos corretores de erro que permitem um maior alcance aos circuitos ópticos transportados em redes WDM;
- Padronização de diversos mecanismos de mapeamento de sinais clientes síncronos e não síncronos (Ethernet, SDH, Fibre Channel, etc) em estruturas de quadro OTN;

- Mecanismos para gerenciamento dos circuitos ópticos OTN, inclusive em redes multicanais WDM através de métricas de desempenho e alarmes;
- Estruturas de quadro ODUk (*Optical Channel Data Unit*) que permitem a criação de comutadores digitais agnósticos aos protocolos clientes transportados.

Em 2014, estima-se que mais de 80% do tráfego transportado nas redes ópticas utilizou a tecnologia OTN. Importante ressaltar que as tecnologias WDM e OTN atuam em camadas distintas, e não necessariamente precisam co-existir. A tecnologia OTN pode ser utilizada, por exemplo, em uma rede monocanal. Assim como a tecnologia WDM pode, por exemplo, ser utilizada como camada física para o transporte de tráfego Ethernet. No entanto, devido a grande sinergia entre as duas camadas, o mercado adotou em larga escala a solução OTN *over* WDM (Fig.1.7).

Após esta perspectiva favorável ao crescimento do mercado das redes ópticas de transporte, compostas pelas tecnologias WDM e OTN, serão abordados dois outros temas de grande relevância para ampliação e modernização destas redes: o aumento das taxas de transmissão e o crescimento do mercado de redes ópticas reconfiguráveis.

Ainda em 2001, quando a tecnologia OTN foi incorporada à recomendação G.709, apenas três diferentes taxas de transmissão estavam previstas: OTU1 (2,5 Gbps), OTU2 (10 Gbps) e OTU3 (40 Gbps). A partir de 2008, três entidades trabalhando em diferentes segmentos iniciaram a padronização da taxa de transmissão 100 Gbps. O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) trabalhou na padronização das interfaces tributárias 40 GbE e 100GbE [11]. O ITU-T abriu uma outra frente na padronização da interface de rede OTU4 (100 Gbps). O OIF (*Optical Internetworking Forum*), a partir de uma demanda da indústria, definiu alguns *implementation agreements* para padronizar o hardware a ser desenvolvido para transmissão de sinais OTU4 em sistemas WDM de longo alcance.

Diversos tópicos foram abordados pelo OIF, desde características mecânicas, passando por *layout* de componentes e chegando até a definir qual o formato de modulação deveria ser utilizado pelo mercado. Estas definições foram cruciais para redução do tempo de chegada ao mercado da tecnologia. O formato de modulação DP-QPSK (*Dual Polarization - Quadrature Phase Shift Keying*) sugerido pelo OIF permitiria a transmissão de sinais OTU4 no grid de espaçamento de 50 GHz, o mais estreito até então, padronizado pelo ITU-T e compatível com os sistemas que operavam no mercado a 40 Gbps (OTU3) e 10 Gbps (OTU2). O OIF também ajudou na definição da tecnologia de detecção coerente, que pela primeira vez seria adotada em larga escala em sistemas ópticos de comunicação [12]. Com a ajuda da detecção coerente, foi possível a implementação de poderosos compensadores eletrônicos de dispersão cromática e DGD (*Differential Group Delay*). Por último, mas não menos importante, o OIF sugeriu a utilização de algoritmos corretores de erro adicionais conhecidos como SD-FEC (*Software Decision - Forward Error Correction*) para estender o alcance dos sinais OTU4 e chegar a limites

próximos aos alcançados pelos sinais OTU2 com modulação NRZ, e pelos sinais OTU3 com modulação DQPSK ou DP-QPSK. Todas estas definições foram de grande relevância para a redução do tempo de maturação da tecnologia de transmissão OTU4 em sistemas WDM de longo alcance. Em 2011, após as principais recomendações serem definidas, os primeiros sistemas ópticos WDM com circuitos OTU4 DP-QPSK começaram a chegar ao mercado.

A Figura 1.8 apresenta um comparativo em termos de participação no mercado entre as principais taxas de transmissão adotadas nas redes ópticas WDM de longo alcance [13].

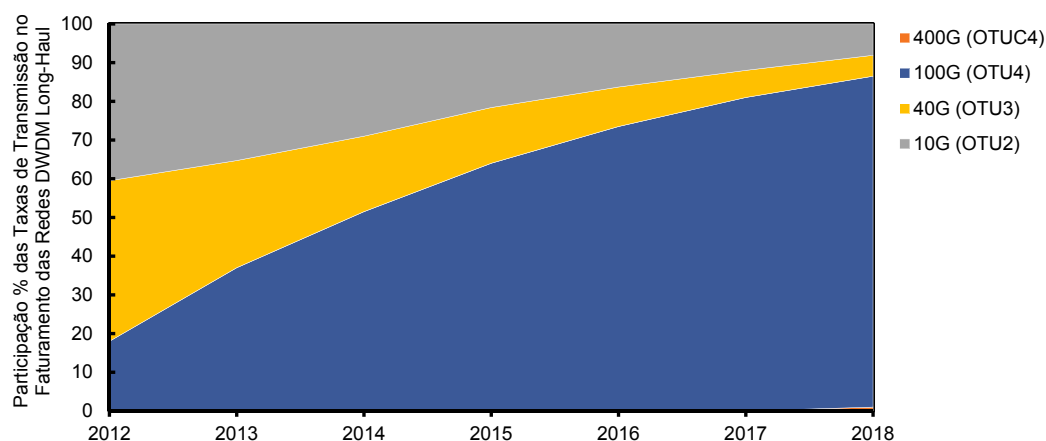


Figura 1.8: Forecast da participação das taxas de transmissão em sistemas DWDM de longo alcance.

Entre 2012 e 2014, estima-se que a taxa de participação do OTU4 no mercado saltou de 20% para 50%. Para 2018, a perspectiva segundo [13] é que mais de 85% do investimento realizado em interfaces de rede WDM de longo alcance sejam em interfaces OTU4. O forte crescimento na adoção da nova tecnologia é reflexo da grande demanda por largura de banda, conforme visto anteriormente nesta seção, e pela rápida maturação da tecnologia, fruto de um trabalho bem realizado na padronização das interfaces de transmissão.

Além do crescimento das taxas de transmissão, segundo [14], as redes ópticas adotarão, cada vez mais, as topologias em malha. Por muitos anos, as únicas topologias viáveis em meio puramente óptico foram: ponto a ponto, barramento e anel. Os elementos OADM (*Optical Add and Drop Multiplexer*) utilizados em redes em barramento e anel, embora viabilizem o encaminhamento de sinais em meio puramente óptico, trabalham com matrizes estáticas de encaminhamento. Devido a esta limitação, as operadoras viram-se obrigadas a investir em redes ópticas opacas, onde a comutação do tráfego é realizada na camada digital. As matrizes digitais de comutação trabalham com taxas e protocolos específicos (Ethernet, SDH, Fibre Channel, OTN, etc). Ao levar a responsabilidade da comutação para a camada digital, além do alto custo associado às conversões OEO (*Optical-Electrical-Optical*), as redes ópticas de transporte perdem a transparência à taxa de transmissão e ao protocolo transportado, e sofrem com a elevada latência inserida e elevado consumo de energia dos comutadores digitais.

Ao longo da última década, com a evolução das tecnologias ópticas de comutação MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) e LCoS (*Liquid Crystal on Silicon*) [15], os primeiros elementos ROADM (*Reconfigurable Optical Add and Drop*) chegaram ao mercado. Os elementos ROADM têm como principal aplicação o encaminhamento de circuitos em domínio óptico de maneira reconfigurável. A partir de então, as redes ópticas com topologias em malha passaram a ser viáveis, e as operadoras iniciaram um processo de migração (*offload*) do tráfego comutado nas camadas digitais para a comutação na camada óptica através dos elementos ROADM. Os principais fatores que motivaram a migração foram:

- Redução do custo de comutação;
- Transparência à taxa de transmissão e aos protocolos transportados;
- Redução da latência inserida no transporte do tráfego cliente;
- Redução de consumo de energia.

Segundo levantamento realizado por [16], atualmente cerca de 60% de todo o tráfego IP tratado pelos *IP Routers* são encaminhados através de regras simples baseadas em porta origem e porta destino. Este é o típico cenário favorável à migração da comutação digital para a comutação óptica. Para a parcela restante do tráfego, a camada digital de comutação ainda é a mais indicada devido às regras sofisticadas que envolvem o processamento das mensagens de cabeçalho dos pacotes transportados.

Os elementos ROADM são compostos tipicamente por módulos WSS (*Wavelength Selective Switch*), que por sua vez, empregam, na maioria dos casos, as tecnologias de comutação MEMS ou LCoS [15]. No Capítulo 2 serão apresentadas as principais características funcionais do ROADM e como os elementos WSS conseguem compor um nó ROADM em uma rede óptica em malha.

De acordo com a Figura 1.9, entre 2005 e 2012 o mercado de elementos WSS apresentou um forte crescimento CAGR superior a 56%. Entre 2012 e 2015 a perspectiva de crescimento ainda é bastante significativa, com CAGR de 18,2% [14].

Outra tendência indicada na Fig.1.9 é o crescimento da densidade das redes ópticas em malha. O fator N dos elementos WSS 1xN indica o número máximo de estações vizinhas com que o ROADM consegue se comunicar. Até 2011, a maioria dos módulos WSS comercializados eram $N \leq 1 \times 4$. A partir de 2012, os módulos WSS com fator $N \geq 5$ conquistaram a liderança do mercado. Outro fator interessante é a tendência das redes migrarem do espaçamento de 100 GHz para o espaçamento de 50 GHz, conseguindo assim dobrar a capacidade de transmissão das redes ópticas reconfiguráveis.

Alinhado com as tendências de mercado apresentadas até o momento, este trabalho tem como principal foco o estudo de desempenho de redes ópticas reconfiguráveis, compostas por elementos ROADM, considerando sinais de transmissão OTU4 com modulação DP-QPSK e detecção coerente, e

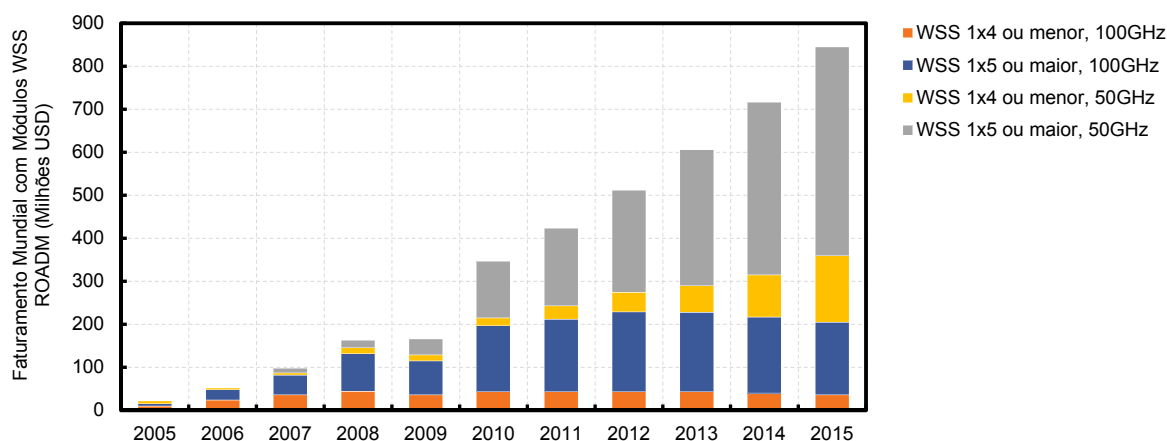


Figura 1.9: Forecast da participação das diferentes configurações dos módulos WSS no mercado de redes ópticas WDM.

considerando o espaçamento entre canais de 50 GHz.

1.2 Redes Ópticas Reconfiguráveis com Restrições de Camada Física

Para o estabelecimento de uma comunicação entre um par de nós de uma rede óptica WDM é necessário construir um circuito óptico fim-a-fim. Cada circuito óptico utiliza uma rota e um comprimento de onda. O problema da escolha de uma rota e um comprimento de onda adequado para cada circuito óptico é conhecido como RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) [17]. Diversos algoritmos de RWA foram propostos na literatura com objetivo de minimizar a probabilidade de bloqueio de futuras conexões em uma rede óptica WDM.

O estabelecimento de um circuito óptico se confirma mediante a reserva de um comprimento de onda disponível. Enquanto não existirem tecnologias disponíveis no mercado para a conversão do comprimento de onda em domínio óptico, o estabelecimento do circuito óptico depende da disponibilidade de um mesmo comprimento de onda ao longo de todos os enlaces que compõem a rota. Esta característica é conhecida na literatura como a propriedade de continuidade de comprimento de onda.

Os fluxogramas apresentados na Figura 1.10 descrevem as principais etapas seguidas para o estabelecimento de circuitos ópticos em distintas abordagens do problema RWA. Com o objetivo de simplificar os fluxogramas deste capítulo e facilitar o entendimento das principais diferenças entre as abordagens ao problema RWA, não foram detalhados os algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda. No capítulo 3 os fluxogramas serão apresentados na configuração final, de acordo com a modelagem adotada neste trabalho.

Diversos trabalhos encontrados na literatura assumem a abordagem RWA convencional (Fig.1.10.a), considerando a camada física um meio ideal de transmissão e, portanto, qualquer escolha de rota e comprimento de onda é considerada válida do ponto de vista de desempenho da camada física

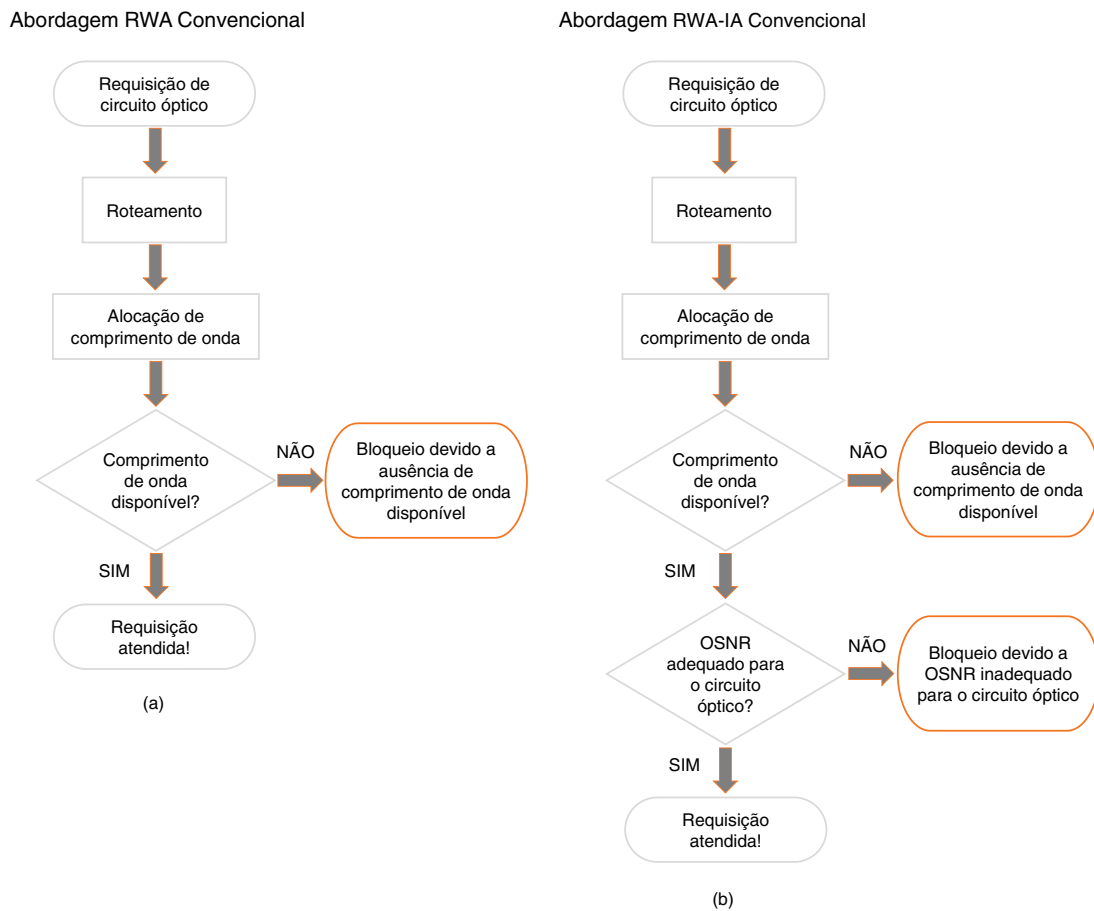


Figura 1.10: Distintas abordagens ao problema RWA, com roteamento fixo.

[17–22]. Na abordagem RWA convencional, os bloqueios ocorrem exclusivamente por ausência de comprimento de onda disponível. Na prática, o sinal óptico sofre degradações ao se propagar através de enlaces de fibra óptica, matrizes de comutação, amplificadores ópticos e outros elementos. Com o acúmulo destas degradações ao longo da rota, a taxa de erro de bit BER (*Bit Error Rate*) no receptor se torna cada vez maior e pode atingir níveis intoleráveis [23]. Requisitos como sensibilidade, OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*), Dispersão Cromática e DGD devem ser atendidos para que a taxa de erro de bit seja mantida em níveis aceitáveis.

Em [23], foi investigado pela primeira vez o desempenho dos algoritmos RWA em redes ópticas modeladas com degradações de camada física. Os resultados comprovaram que os algoritmos avaliados não estavam preparados para lidar com as degradações, e de uma forma geral, o desempenho avaliado foi bastante degradado com a nova abordagem. Além de avaliar a disponibilidade de rotas e comprimentos de onda, ficou evidente a necessidade dos algoritmos RWA considerarem as degradações de camada física para a escolha de um recurso apropriado para o estabelecimento de conexões. Para suprir esta limitação dos algoritmos RWA, foram concebidos os algoritmos RWA-IA (*Routing and Wavelength Assignment - Impairments Aware*). O objetivo destes algoritmos consiste em encontrar uma

rota e um comprimento de onda para o estabelecimento de uma conexão óptica levando em consideração as degradações da camada física [24].

Na abordagem convencional do problema RWA-IA (Fig.1.10.b), o estabelecimento de um circuito óptico se confirma mediante a reserva de uma rota e um comprimento de onda disponível e em condições adequadas em termos de degradação da camada física. Após a definição de uma rota e um comprimento de onda disponível, é necessária uma análise para verificar se o circuito óptico possui condições adequadas em termos de degradação de camada física para ser estabelecido. Caso o limiar de degradação não seja atendido, a requisição é bloqueada. Para evitar os bloqueios por condições inadequadas de camada física, os algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda devem aplicar estratégias para evitar a escolha de recursos que embora disponíveis, não atendam os requisitos de camada física. Diversos algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda sensíveis às degradações de camada física foram propostos na literatura [25–30].

Embora a abordagem RWA-IA convencional leve em consideração as degradações de camada física, ela o faz de maneira limitada. A análise sobre as condições de camada física é realizada no momento do estabelecimento de um novo circuito óptico. Se as condições de camada física estiverem adequadas no momento do estabelecimento do novo circuito, assume-se que as condições permanecerão adequadas enquanto o circuito estiver ativo. Na realidade, o estabelecimento de novos circuitos em uma rede óptica pode ocasionar degradações adicionais em circuitos ópticos já ativos na rede, assim como a finalização de circuitos pode reduzir as degradações em circuitos ainda ativos. Portanto, as degradações de camada física de um determinado circuito óptico podem variar enquanto ele permanece ativo na rede. Neste trabalho, a abordagem RWA-IA convencional será chamada de RWA-SIA (*Routing and Wavelength Assignment - Static Impairments Aware*) devido à abordagem estática dada às degradações de camada física dos circuitos ópticos já ativos na rede.

1.3 Trabalhos Relacionados e Contribuições

Neste trabalho o problema RWA-IA será abordado considerando o dinamismo das degradações de camada física enquanto os circuitos ópticos permanecem ativos. Nesta abordagem, as degradações de camada física são atualizadas a cada novo circuito óptico estabelecido ou finalizado. Conforme pode ser observado na Figura 1.11, na abordagem RWA-DIA (*Routing and Wavelength Assignment - Dynamic Impairments Aware*) com restrições dinâmicas de camada física, um novo circuito óptico é estabelecido se, e somente se, as seguintes premissas forem atendidas:

- Haver disponibilidade de rota e comprimento de onda;
- Limiar de degradação na camada física deve ser atendido para o novo circuito óptico;

- Assumindo que o novo circuito óptico seja atendido, os limiares de degradação para todos os demais circuitos ópticos já ativos na rede também devem ser atendidos.

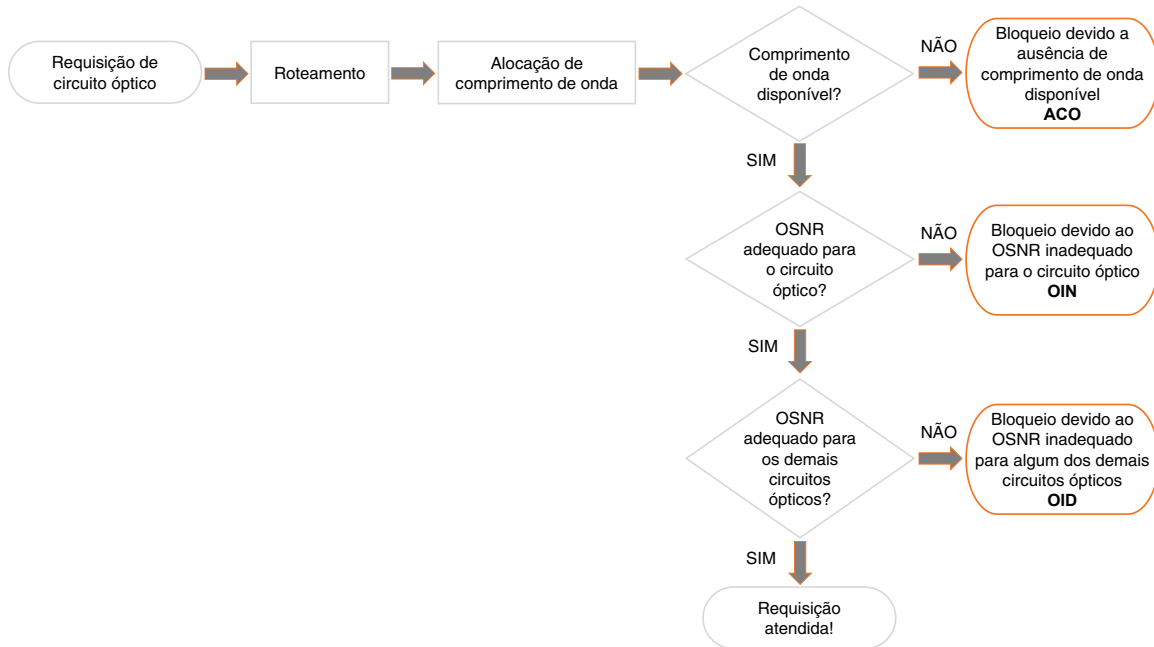


Figura 1.11: Abordagem RWA-DIA com roteamento fixo.

Na abordagem RWA-DIA, as requisições para o estabelecimento de novos circuitos ópticos podem ser bloqueadas por três distintas razões: ACO (Ausência de Comprimento de Onda disponível); OIN (OSNR Inadequado para o Novo circuito óptico candidato); OID (OSNR Inadequado para algum dos Demais circuitos ópticos já ativos na rede). Neste trabalho utilizaremos as siglas ACO, OIN e OID para representar os três tipos de bloqueio.

Com a abordagem estática para as restrições de camada física (RWA-SIA), apenas os bloqueios ACO e OIN eram foco dos algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda. A introdução da abordagem dinâmica para as restrições de camada física, leva em consideração que, enquanto os circuitos ópticos estiverem ativos na rede, eles devem permanecer com um limiar mínimo de degradação, o suficiente para manter a taxa de erro de bit em níveis aceitáveis. Na abordagem RWA-DIA, os algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda têm uma preocupação extra de minimizar as degradações inseridas nos demais circuitos ópticos ativos da rede, para evitar os bloqueios do tipo OID.

Na evolução da abordagem RWA-SIA para abordagem RWA-DIA tivemos a introdução dos bloqueios do tipo OID. No entanto, segundo o nosso conhecimento, nenhum estudo de avaliação de desempenho de algoritmos RWA-DIA investigou o impacto dos bloqueios OID de forma isolada no desempenho das redes ópticas WDM. Os bloqueios eram classificados em apenas duas categorias: ausência de comprimento de onda disponível (ACO), e condições inadequadas de camada física (OIN +

OID). Neste trabalho, pela primeira vez será avaliada a participação de cada um dos tipos de bloqueio (ACO, OIN e OID) no desempenho de diferentes algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda conhecidos na literatura. Neste trabalho, também serão propostos dois novos algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda com foco na redução dos três tipos de bloqueio.

Dentre as principais degradações de camada física, o *crosstalk* originado nos elementos ROADM possui uma grande influência na abordagem RWA-DIA. À medida em que novos circuitos ópticos são provisionados ou finalizados, o *crosstalk* acumulado nos demais circuitos ativos é afetado. Embora tenha sido um estudo baseado na abordagem RWA-SIA, [23] foi o primeiro a estudar o impacto do *crosstalk* originado em elementos ROADM nos algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda sensíveis às degradações de camada física.

O estudo realizado em [31], um dos pioneiros na abordagem RWA-DIA, destacou a influência do *crosstalk* na probabilidade de bloqueio da rede. Os autores sugeriram um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda com foco na redução do *crosstalk* gerado pelos novos circuitos nos demais circuitos ativos da rede. Desta forma, mesmo sem realizar um estudo sobre o impacto dos três tipos de bloqueio no desempenho da rede, os autores visaram a redução dos bloqueios OIN e OID. Outros estudos seguiram a mesma linha, onde novos algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda foram propostos com foco na redução do impacto causado pelo estabelecimento de novos circuitos ópticos nos demais já estabelecidos na rede [32–35]. O algoritmo proposto por [31] será um dos avaliados neste trabalho.

Ainda em [23], foi proposta uma nova arquitetura para o elemento ROADM. Diversos estudos posteriores com abordagens RWA-SIA [36–39], abordagens RWA-DIA [40–42], e inclusive os anteriormente citados [31–35], seguiram a mesma arquitetura de ROADM proposta em [23]. Nestes estudos foram propostos e avaliados diversos algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda, todos eles levando em consideração o *crosstalk* originado nos elementos ROADM de acordo com a arquitetura proposta em [23].

Embora a arquitetura de ROADM proposta em [23] fosse factível do ponto de vista técnico, a indústria de comunicações ópticas adotou uma arquitetura diferente, baseada na tecnologia WSS para construção dos elementos ROADM [15]. As diferenças entre as arquiteturas envolvem, inclusive, a modelagem do *crosstalk* originado nestes elementos. No capítulo 2 serão evidenciadas as diferenças na modelagem do *crosstalk* entre as duas arquiteturas.

Nesta dissertação o problema RWA-DIA será investigado, segundo o nosso conhecimento, pela primeira vez considerando uma arquitetura de ROADM mais moderna se comparada à proposta em [23], e amplamente utilizada nas redes ópticas reconfiguráveis das operadoras ao redor do mundo. No Capítulo 2 a arquitetura utilizada será apresentada em detalhes. Em [43–45] foram realizados al-

guns estudos de transmissão considerando o *crossstalk* originado em elementos ROADM com a mesma arquitetura adotada neste trabalho. No entanto, estes estudos não abordaram o problema RWA.

As principais contribuições desta dissertação estão resumidas a seguir:

1. Introduzir a arquitetura de ROADM baseada em elementos de comutação WSS, no estudo dos algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda considerando a abordagem RWA-DIA;
2. Avaliar o impacto dos bloqueios ACO, OIN e OID no desempenho dos algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda encontrados na literatura;
3. Propor um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda que procure reduzir o impacto dos três tipos de bloqueio no desempenho da rede;
4. Propor uma nova abordagem ao problema RWA-DIA levando em consideração limitações atualmente vivenciadas por grande parcela das redes ópticas de transporte;
5. Desenvolver uma ferramenta de simulação capaz de avaliar o desempenho de redes ópticas reconfiguráveis sensíveis às restrições dinâmicas de camada física.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada da seguinte forma: no Capítulo 2 serão apresentadas as principais características, com enfoque na camada física, das redes ópticas reconfiguráveis. Serão apresentados os principais elementos empregados nas redes ópticas reconfiguráveis e como eles foram modelados neste trabalho. Ainda no Capítulo 2, as restrições de camada física adotadas neste trabalho serão apresentadas. No Capítulo 3, o enfoque será na camada de provisionamento de recursos das redes ópticas reconfiguráveis. Serão apresentadas diferentes abordagens ao problema de alocação de rota e comprimento de onda. Ainda no Capítulo 3, serão apresentados os algoritmos RWA avaliados, além dos novos algoritmos propostos. No Capítulo 4, o desempenho dos algoritmos de RWA considerados neste trabalho serão comparados através dos resultados de simulação. No Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões bem como os planos para trabalhos futuros. No Apêndice A será apresentada a ferramenta de simulação desenvolvida para este trabalho.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DOS ELEMENTOS DE REDE E RESTRIÇÕES DE CAMADA FÍSICA

Stay hungry. Stay foolish.

— Steve Jobs

Conforme observado no Capítulo 1, a maioria das redes ópticas de transporte da atualidade são implantadas com o auxílio das tecnologias WDM e OTN. Neste capítulo serão apresentadas as principais características, com enfoque na camada física, das redes ópticas reconfiguráveis baseadas em ambas as tecnologias.

A Figura 2.1 apresenta os principais elementos envolvidos no transporte de circuitos ópticos em redes reconfiguráveis, com o auxílio das tecnologias WDM e OTN.

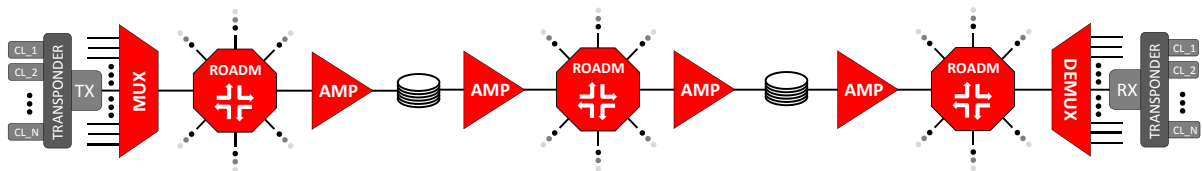


Figura 2.1: Elementos envolvidos em uma rota de comunicação.

As seções seguintes deste capítulo descreverão as principais características de cada elemento presente na Fig.2.1, como eles foram modelados neste trabalho e como estes elementos interagem com os sinais transportados em termos de degradações de camada física.

2.1 Transponders Ópticos

Os transponders são os elementos responsáveis pela transmissão e recepção dos circuitos ópticos na rede. Estes elementos são compostos basicamente por interfaces clientes, com suporte a tributários diversos (Ethernet, SDH, Fibre Channel etc.) e interfaces de rede, com tecnologia de transmissão WDM e encapsulamento OTN.

As redes ópticas de transporte com encapsulamento OTN foram padronizadas pelo ITU-T, principalmente nas recomendações G.709 e G.798 [10, 46]. Com informações incluídas no cabeçalho do quadro OTN é possível monitorar alarmes e localizar pontos de falha ao longo da rota de transmissão, sem afetar o tráfego cliente transportado. A partir do cabeçalho OTN também é possível monitorar o desempenho dos circuitos provisionados. Através desta monitoração é possível, inclusive, atuar de forma proativa para evitar a ocorrência de degradações que levem a interrupção do tráfego. Durante a fase de instalação da rede e provisionamento dos serviços é possível identificar se as conexões na rede foram feitas corretamente para garantir que os serviços sejam entregues corretamente em seus destinos. Outra importante função do quadro OTN é viabilizar o uso de códigos corretores de erros.

As estruturas OTN padronizadas pelo ITU-T suportam circuitos com capacidade a partir de 2,5Gb/s (OTU1). Em 2012 a recomendação G.709 foi atualizada para contemplar a estrutura de quadro OTU4 capaz de transportar tributários de 100Gb/s. Atualmente o ITU-T está trabalhando em uma nova estrutura de quadro OTN capaz de suportar uma capacidade flexível, múltipla de 100Gb/s, e denominada OTUCn ($n \times 100\text{Gb/s}$). A padronização de uma estrutura de quadro com capacidade flexível mostra que o ITU-T está alinhado com a tendência das redes ópticas se tornarem elásticas, onde a capacidade de transmissão do circuito óptico pode variar em função das restrições de camada física da rota e do espectro disponível.

Neste trabalho serão considerados transponders com capacidade de transmissão de 127 Gbps (OTU4v), com formato de modulação DP-QPSK e tecnologia de detecção coerente [47]. Conforme observado na Fig.1.8, a previsão é que este modelo de transponder seja o líder de mercado por pelo menos mais 4 anos [13].

A Tabela 2.1 traz um resumo das principais características da interface de rede modelada neste trabalho. Os parâmetros foram especificados com base em produtos disponíveis no mercado [48].

À medida em que o sinal óptico se propaga ao longo da rede, podem ocorrer severas degradações na camada física. Neste trabalho foram modeladas as seguintes degradações de camada física: ruído ASE originado nos amplificadores ópticos, *in-band crosstalk* originado nos elementos ROADM, e as atenuações originadas nos elementos MUX/DEMUX, ROADM e na fibra óptica. Ao longo deste Capítulo, as degradações de camada física relacionadas aos elementos serão detalhadas.

Interface de Rede OTU4v DP-QPSK com Detecção Coerente	Especificação
Taxa de Transmissão [Gb/s]	127,156
Frequência de Transmissão [THz]	Mín: 192,10 Máx: 196,05
Espaçamento entre Canais [GHz]	50
Potência de Transmissão [dBm]	0
Sensibilidade [dBm]	-18
Saturação [dBm]	0
Tolerância a Dispersão Cromática [ps/nm]	+/- 40.000
Tolerância a DGD [ps]	100
OSNR Mínimo para BER pós-FEC @ 10E-12 [dB]	15

Tabela 2.1: Principais parâmetros da Interface de Rede OTU4v.

Algumas outras degradações de camada física foram desconsideradas neste trabalho. Os efeitos não lineares, tais como o SPM (*Self-Phase Modulation*), XPM (*Cross-Phase Modulation*) e FWM (*Four-Wave Mixing*), embora sejam ofensores importantes dos sinais ópticos de alta taxa, podem ser evitados desde que a potência óptica de transmissão seja mantida em níveis controlados ao longo dos enlaces da rede. Diversos estudos [49, 50], inclusive alguns liderados pelos fabricantes de sistemas ópticos de transmissão [51, 52], analisaram a relação entre as penalidades originadas pelos efeitos não lineares em função da potência óptica de transmissão utilizada. Em geral estes estudos buscavam encontrar a potência limite de transmissão para que o sistema óptico de transmissão WDM pudesse operar imune aos efeitos não lineares.

Em [52], foi realizado um experimento com 40 sinais ópticos de 120 Gb/s, com espaçamento de 50 GHz, transmitidos através de fibra óptica monomodo *standard* (G.652 [53]) por uma rota composta por 10 enlaces de 100 Km. O estudo avaliou a penalidade em OSNR à medida em que a potência de transmissão nos enlaces era elevada. Considerando uma potência de transmissão de +3 dBm por canal ao longo dos 10 enlaces, a penalidade em OSNR foi inferior a 1 dB em relação ao cenário *Back-to-Back* (sem acúmulo de efeitos não lineares). Neste trabalho, embora os efeitos não lineares tenham sido desconsiderados, consideramos uma potência limite de transmissão em cada enlace de + 2 dBm.

As dispersões cromáticas e por modo de polarização também foram desconsideradas neste trabalho. Os transponders com tecnologia de detecção coerente trabalham com poderosos compensadores eletrônicos de dispersão cromática e DGD, o que viabiliza a construção de redes ópticas sem a necessidade de compensadores ópticos de dispersão para rotas de até aproximadamente 2.000 Km [48]. Para rotas menores, as dispersões acumuladas não interferem no desempenho do sistema. Neste trabalho, dentre as topologias avaliadas, nenhuma rota ultrapassou 2.000 Km.

2.2 Multiplexadores e Demultiplexadores Ópticos

Os elementos MUX/DEMUX são utilizados para multiplexar e demultiplexar os comprimentos de onda transportados nas fibras ópticas. Estes elementos são compostos por filtros ópticos periódicos, com espaçamento pré-definido entre filtros. Distintas tecnologias para construção dos filtros ópticos periódicos para aplicações WDM estão disponíveis no mercado, sendo a tecnologia AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*) a mais popular neste mercado.

Além da função de multiplexar e demultiplexar os sinais ópticos WDM, os elementos MUX/DEMUX também contribuem para as degradações de camada física dos sinais transportados. Dentre as degradações mais relevantes estão a perda de inserção e a filtragem óptica. Os elementos MUX/DEMUX com espaçamento de 50 GHz e tecnologia AWG possuem banda óptica passante FWHM (*Full Width at Half Maximum*) mínima em torno de 35 GHz [54]. Com o cascadeamento de elementos MUX/DEMUX ao longo de uma rota, o filtro resultante tende a ser mais estreito.

Em [43, 55] foram realizados testes experimentais para avaliar o impacto da filtragem óptica em sinais de 111 Gbps com modulação DP-QPSK e detecção coerente. Os resultados indicaram que filtros gaussianos de alta ordem, com até 30 GHz de banda passante resultante FWHM são satisfatórios para evitar impactos relevantes no desempenho do sinal transportado.

Nas redes ópticas reconfiguráveis, as rotas que compõem os circuitos ópticos possuem tipicamente apenas um elemento MUX no site origem e um elemento DEMUX no site destino, conforme apresentado na Fig.2.1. Devido ao número reduzido de elementos MUX/DEMUX em cascata nas redes reconfiguráveis, as penalidades originadas por filtragem óptica destes elementos foram desconsideradas neste trabalho.

Os elementos MUX/DEMUX foram modelados neste trabalho com suporte a 80 comprimentos de onda, espaçamento de 50 GHz entre filtros, e perda de inserção de 6 dB. Conforme observado na Figura 1.9, as redes de 50 GHz se tornaram mais populares em relação às redes de 100 GHz.

2.3 Amplificadores Ópticos

Os amplificadores compõem uma parte vital dos sistemas ópticos de comunicação. À medida que o sinal óptico se propaga ao longo da fibra e dos demais elementos de rede, a potência do sinal é atenuada. Os amplificadores ópticos com tecnologia EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) são utilizados para compensar as atenuações inseridas pelos demais elementos de rede. Outras tecnologias de amplificação estão disponíveis no mercado, porém neste trabalho serão abordados apenas os amplificadores EDFA.

Os amplificadores EDFA devem ser planejados de tal forma que a potência óptica do sinal

transportado respeite a faixa de potência tolerada pelo receptor óptico do transponder.

Além de amplificar o sinal óptico transportado, o amplificador EDFA contribui para a degradação da relação sinal ruído OSNR devido a introdução do ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). A potência do ruído ASE é dado por [56] :

$$N_{ASE}(v) = \frac{h.v.B_o.NF.(G - 1)}{2} \tag{2.1}$$

onde h representa a constante de Planck, v é a frequência do sinal (Hz), B_o representa a banda óptica de referência (Hz), NF indica a Figura de Ruído do amplificador, e por último, G representa o Ganho do amplificador.

A Figura 2.2 apresenta uma ilustração didática sobre influência dos elementos de rede na potência óptica e na relação sinal ruído (OSNR) do sinal transportado.

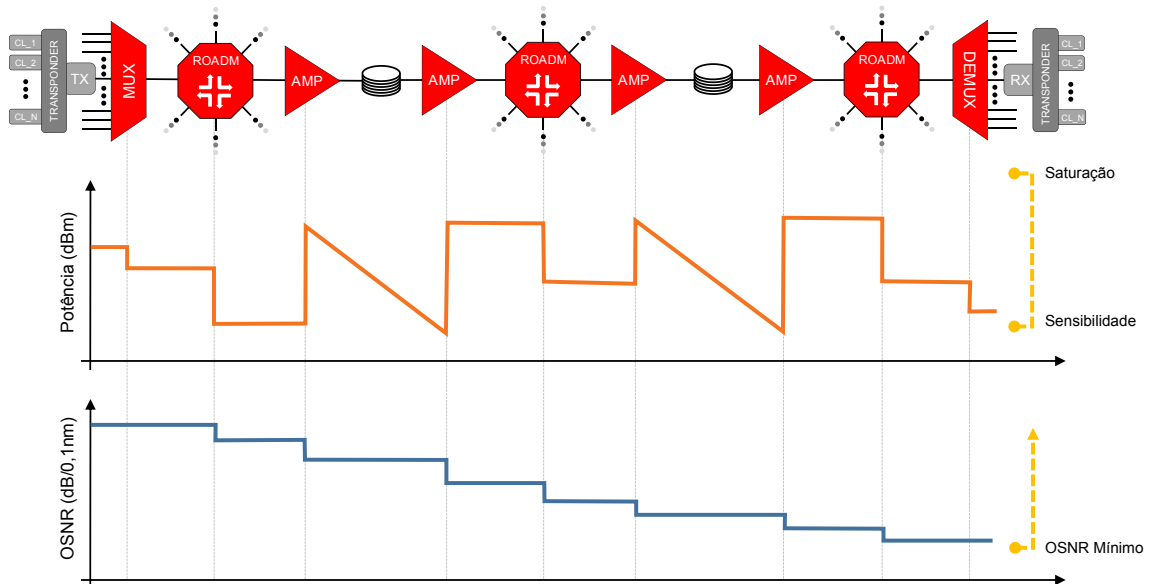


Figura 2.2: Degradações de camada física ao longo da rota de comunicação.

Nas redes ópticas WDM reconfiguráveis, à medida em que os circuitos ópticos são estabelecidos ou finalizados, a potência óptica de entrada dos amplificadores pode variar. Caso os amplificadores operem sem controle de ganho, ou na região de saturação, as variações de potência de entrada são refletidas em variações no ganho dos amplificadores. Para os circuitos ópticos que permanecem ativos, variações de ganho nos amplificadores colocam em risco a qualidade do sinal transportado. Conforme observado na equação 2.1, variações no ganho refletem diretamente em variações no ruído ASE introduzido pelos amplificadores, e portanto, o OSNR residual dos circuitos ativos flutuaria à medida que novos circuitos fossem estabelecidos ou finalizados na rede. Além do impacto em OSNR, variações de ganho também refletiriam em variações na potência do sinal no receptor dos transponders. Estas variações representam um risco para a rede, já que, a qualquer momento, os serviços em operação poderiam ser

interrompidos devido às degradações de camada física.

Para evitar que variações na potência de entrada dos amplificadores afetem o ganho dos circuitos ópticos ativos na rede, é de fundamental importância adotar amplificadores EDFAs com suporte a funcionalidade AGC (*Automatic Gain Control*) [57]. Com o AGC ativo, uma malha de controle é responsável por comparar os níveis de potência de entrada e saída do amplificador. A malha de controle deve manter um intervalo fixo entre estes dois parâmetros, em função do Ganho Alvo configurado em dB ($G_{ALVO} = P_{OUT} - P_{IN}$).

Além da funcionalidade AGC, para manter o Ganho Alvo fixo à medida em que os circuitos ópticos são estabelecidos ou finalizados, é necessário evitar a região de saturação do amplificador. Os amplificadores EDFA possuem uma potência máxima de saída em função de algumas características do seu projeto, como por exemplo, quantidade de fibra dopada com *erbium*, potência dos lasers de bombeio e comprimento de onda dos lasers. Enquanto o AGC está atuando, à medida em que a potência de entrada aumenta, a de saída aumenta na mesma proporção. O amplificador entra em regime de saturação quando a potência de saída atinge a potência nominal suportada. A partir daí, mesmo com o AGC atuando, se a potência de entrada aumentar, o amplificador não conseguirá mais elevar a potência de saída, e com isso, o Ganho Alvo será penalizado conforme observado na Figura 2.3.

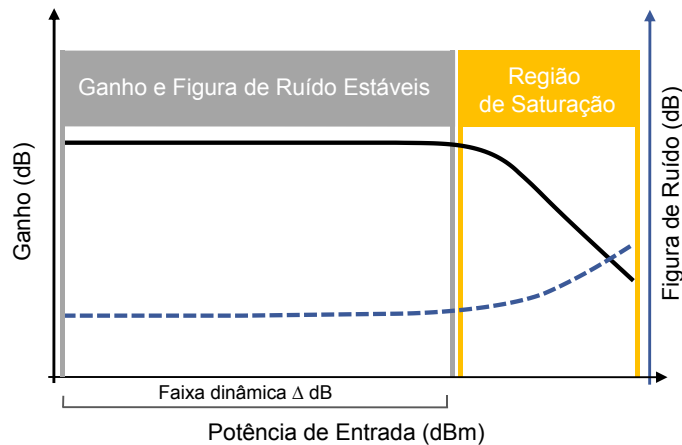


Figura 2.3: Região de Saturação dos Amplificadores Ópticos com tecnologia EDFA.

Além da variação do ganho, a figura de ruído também tende a aumentar na região de saturação devido à redução do ganho.

A faixa dinâmica representada em dB na Fig.2.3 define o intervalo de potência de entrada em que o amplificador consegue trabalhar com ganho e figura de ruído estáveis. Para evitar a região de saturação, medidas devem ser tomadas desde a fase de projeto do amplificador EDFA. Se um amplificador é projetado para uma rede com suporte a até 80 canais WDM, a faixa dinâmica de operação deve ser de, no mínimo, $10 \cdot \log_{10} 80 \cong 19$ dB.

Outra importante característica para os amplificadores ópticos EDFA empregados em redes

ópticas reconfiguráveis é a flexibilidade para a escolha do Ganho Alvo a ser atribuído ao modo de operação AGC. No momento da instalação e alinhamento da rede, o operador geralmente possui a liberdade para definir um Ganho Alvo dentre os ganhos disponíveis para cada modelo de amplificador utilizado na rede.

Para o projeto de um amplificador EDFA com suporte a AGC, a partir dos requisitos de potência nominal, ganho mínimo, ganho máximo e faixa dinâmica, é possível definir uma máscara de potência [58] relacionando todas as combinações possíveis de potência de entrada e potência de saída, fora do regime de saturação, conforme observado na Figura 2.4.a).

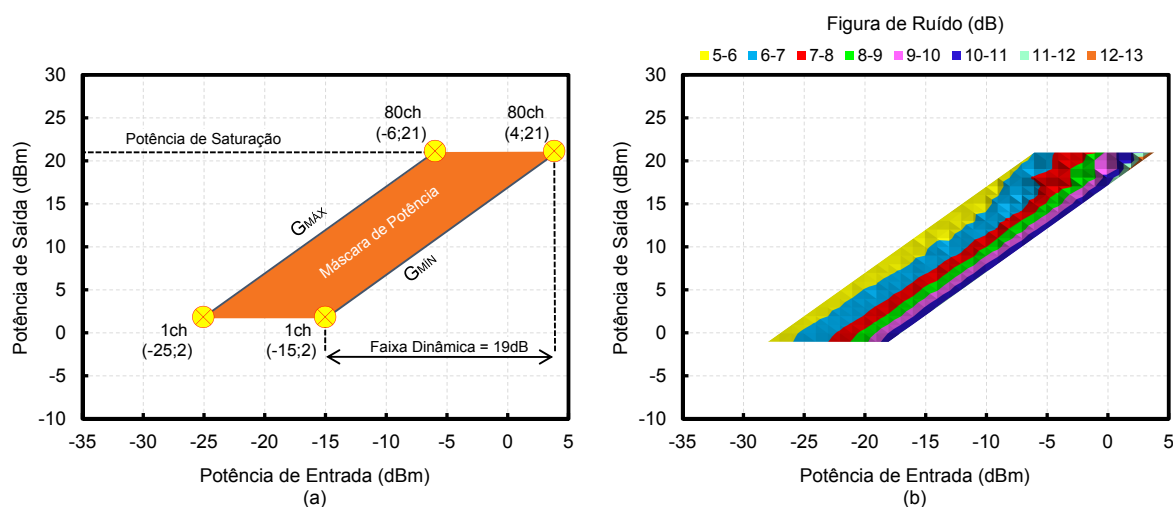


Figura 2.4: a) Máscara de operação dos amplificadores ópticos. b) Curva de Nível da Figura de Ruído ao longo da máscara de operação.

O formato da máscara de potência da Fig.2.4.a) é definido a partir da premissa que para qualquer Ganho Alvo possível de configuração no amplificador, a faixa dinâmica suportada é a mesma. Neste exemplo, o amplificador foi projetado com Faixa Dinâmica de 19 dB, Ganho Mínimo de 17 dB, Ganho Máximo de 27 dB, e Potência Nominal de 21 dBm.

A Figura 2.4.b) apresenta o resultado de um experimento realizado com um amplificador comercial, com faixa dinâmica de 22 dB. No experimento foram observados os níveis de figura de ruído ao longo de toda a máscara de potência projetada para o amplificador. É possível observar na Fig.2.4.b) que os níveis de figura de ruído permanecem relativamente estáveis para um determinado ganho à medida em que a potência de entrada varia.

Conforme observado anteriormente, ganho e figura de ruído estáveis são importantes características para os amplificadores utilizados em redes reconfiguráveis. Desta forma, à medida em que novos circuitos ópticos são estabelecidos ou finalizados, os amplificadores não modificam o desempenho dos circuitos que permanecem ativos na rede.

A última preocupação, ainda para evitar o regime de saturação, é a escolha adequada do

Ganho Alvo em função do cenário encontrado pelo amplificador inserido na rede. No exemplo a seguir, será abordada a metodologia para escolha do Ganho Alvo proposta neste trabalho.

A Figura 2.5 apresenta dois amplificadores ópticos com as seguintes características em comum: Ganho Mínimo de 17 dB, Ganho Máximo de 27 dB e Potência Nominal de 21 dBm. A única diferença entre eles está na faixa dinâmica suportada. Neste exemplo, o amplificador da Fig.2.5.a) possui 19 dB enquanto o amplificador da Fig.2.5.b) possui 22 dB de faixa dinâmica. Ainda neste exemplo, o cenário encontrado em campo no momento da ativação do sistema apresenta 4 canais WDM ativos com potência total de entrada de -15 dBm. Vamos assumir que esta rede foi projetada para suportar no máximo 80 canais. Vamos assumir também uma premissa que os canais de entrada do amplificador permanecerão sempre equalizados.

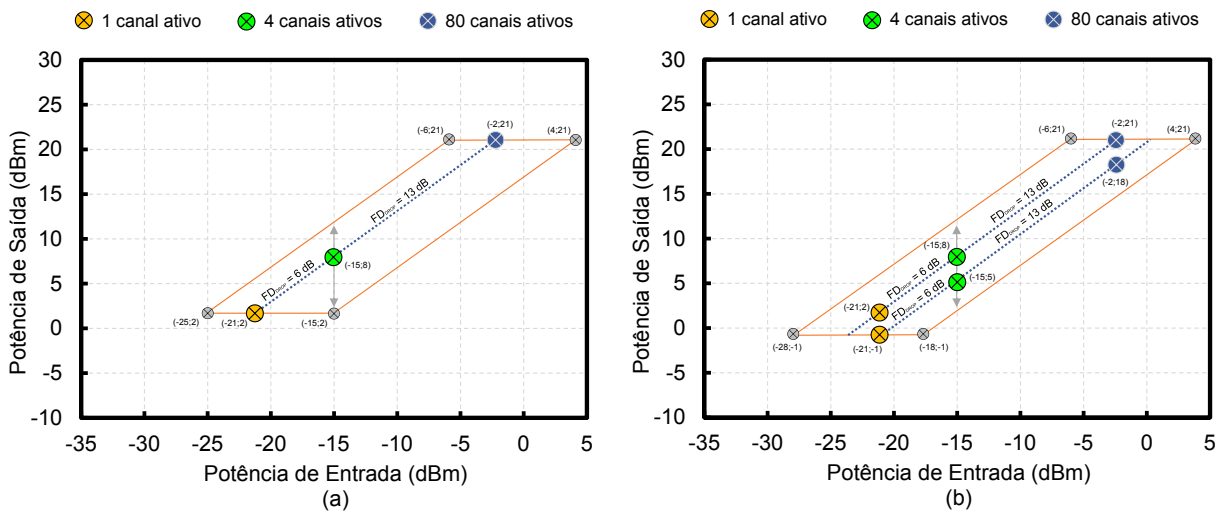


Figura 2.5: Escolha de Ganho Alvo respeitando a Faixa Dinâmica do amplificador. a) Faixa Dinâmica com 19 dB. b) Faixa Dinâmica com 22 dB.

Em se tratando de uma rede reconfigurável, independente do Ganho Alvo, o amplificador deve estar preparado para lidar com variações de potência de entrada devido a variação do número de canais ativos. Neste exemplo, a potência de entrada inicial de -15 dBm pode reduzir para até -21 dBm caso apenas um canal permaneça ativo, ou pode aumentar para até -2 dBm caso 80 canais permaneçam ativos. A excursão de potência de entrada necessária para alcançar o número mínimo de canais será chamada de Faixa Dinâmica de Drop (FDDROP), enquanto a excursão de potência de entrada necessária para alcançar o número máximo de canais será chamada de Faixa Dinâmica de Add (FDADD).

A partir deste exemplo, considerando o primeiro modelo de amplificador da Fig.2.5.a), apenas com o Ganho Alvo em 23 dB é possível respeitar as excursões necessárias de FDADD e FDDROP. Se o Ganho Alvo for menor que 23 dB, a FDDROP será desrespeitada limitando o sistema a permanecer com um número mínimo de canais ativos maior que 1. Se o Ganho Alvo for configurado acima de 23 dB, a FDADD será desrespeitada limitando o sistema a uma capacidade máxima de canais inferior à prevista.

Com o segundo modelo de amplificador apresentado na Fig.2.5.b), e considerando a mesma condição inicial de 4 canais ativos com potência total de -15 dBm, a região de Ganho Alvo possível vai de 20 dB a 23 dB. Qualquer ganho nesta região é capaz de respeitar as condições de FDADD e FDDROP. Nestes casos, a metodologia adotada neste trabalho considera o maior Ganho Alvo possível.

Neste exemplo ficou evidente o benefício dos amplificadores com maior faixa dinâmica devido a sua maior flexibilidade na definição de um Ganho Alvo que respeite as condições de reconfiguração dos sistemas ópticos de comunicação. Em [57], foi projetado um amplificador EDFA com faixa dinâmica superior a 33 dB.

Neste trabalho foram considerados amplificadores com suporte a funcionalidade AGC, e com faixa dinâmica superior a 19 dB para evitar a operação em regime de saturação. A metodologia utilizada para definição do Ganho Alvo foi a mesma descrita nesta seção, onde as excursões necessárias de FDADD e FDDROP são respeitadas. Neste trabalho também foi considerado o ruído ASE gerado pelos amplificadores EDFA no cálculo do OSNR dos circuitos ópticos.

2.4 ROADM - Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers

Os elementos ROADM têm como principal aplicação comutar sinais em domínio óptico de maneira reconfigurável, transparente à taxa, e transparente ao protocolo. A Figura 2.6 apresenta uma ilustração funcional do elemento ROADM com 4 graus (*degrees*).

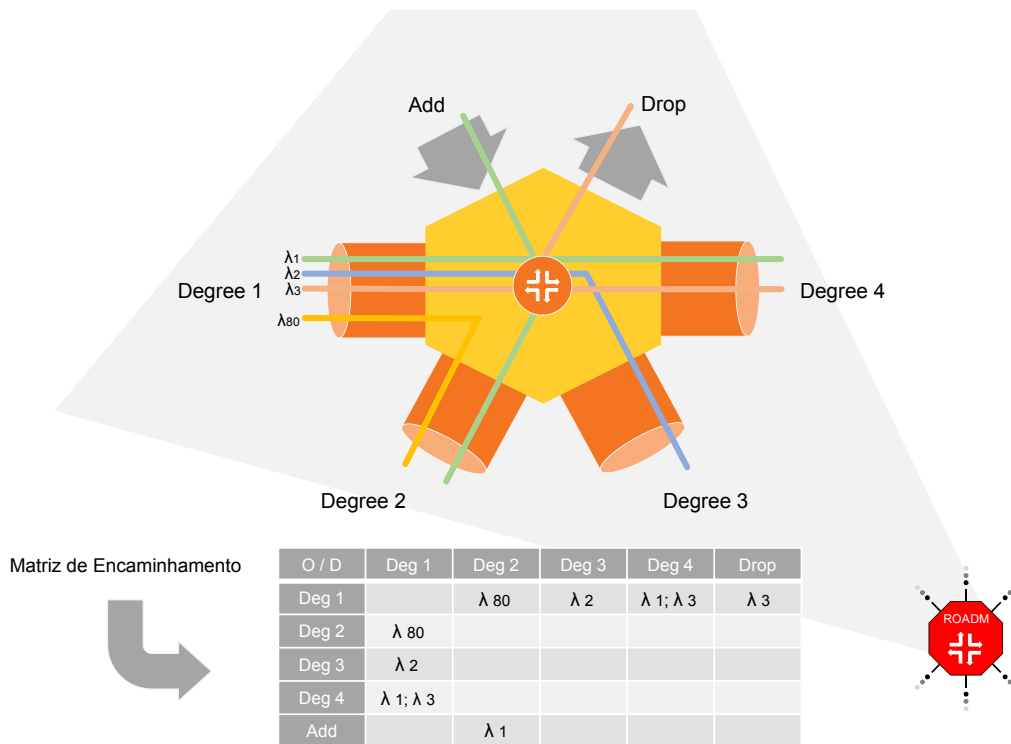


Figura 2.6: Modelo funcional do ROADM.

Cada grau representa uma interface WDM suportada, composta por um par de fibras ópticas. A matriz de comutação do ROADM é capaz de comutar qualquer comprimento de onda transportado no sistema WDM entre qualquer grau origem e grau destino. Além das distintas interfaces WDM para conectar-se aos demais elementos da rede, o ROADM tipicamente possui interfaces de Add/Drop para lidar com os circuitos ópticos que possuem terminação no mesmo site do ROADM. Uma tabela de encaminhamento define a configuração das comutações. A tabela pode ser dinamicamente ajustada conforme a necessidade de encaminhamento de tráfego na rede óptica reconfigurável.

Os elementos ROADM trabalham com matrizes de comutação tipicamente não bloqueantes. Nestes casos, os bloqueios originados em elementos ROADM ocorrem exclusivamente por indisponibilidade de comprimento de onda nas interfaces WDM.

Além da função de encaminhamento reconfigurável de circuitos ópticos, o elemento ROADM contribui para a degradação dos sinais ópticos transportados em virtude do ruído *crossstalk* inserido. As características do ruído de *crossstalk* originado nos elementos ROADM dependem da tecnologia e da arquitetura de comutação empregada. Diferentes tecnologias e arquiteturas de comutação foram propostas na literatura para a construção dos elementos ROADM, também conhecidos na literatura como elementos OXC (*Optical Crossconnect*).

2.4.1 Arquitetura com Comutadores por Comprimento de Onda

Em [23] foi proposta uma arquitetura para o elemento ROADM referenciada por diversos trabalhos posteriores que estudaram o problema RWA-DIA [31–35, 40–42]. A Figura 2.7 apresenta os principais elementos da arquitetura proposta em [23]. Neste exemplo foi considerado um elemento ROADM composto por N interfaces WDM de entrada e mais N interfaces WDM de saída.

As N interfaces WDM de entrada indicadas por D estão conectadas a N elementos DEMUX. Cada elemento DEMUX é responsável por encaminhar os comprimentos de onda para as matrizes de comutação correspondentes. Nesta arquitetura são empregadas M matrizes de comutação em função do número de comprimentos de onda (M) suportados pelo ROADM. Cada matriz é responsável pela comutação de um único comprimento de onda. O número de portas de entrada de cada matriz de comutação é dado por $2.N$, onde N portas são destinadas às N interfaces WDM de entrada e mais N portas para o banco de transmissores da interface de Add. As N portas destinadas à interface de Add serão ocupadas se forem criados N circuitos ópticos neste site ROADM, todos com mesmo comprimento de onda, sendo cada um destinado a uma interface WDM de saída distinta.

O número de portas de saída de cada matriz de comutação também é dado por $2.N$, onde N portas são destinadas às N interfaces WDM de saída e mais N portas para o banco de receptores da interface de Drop. As N portas destinadas à interface de Drop serão ocupadas se forem criados N

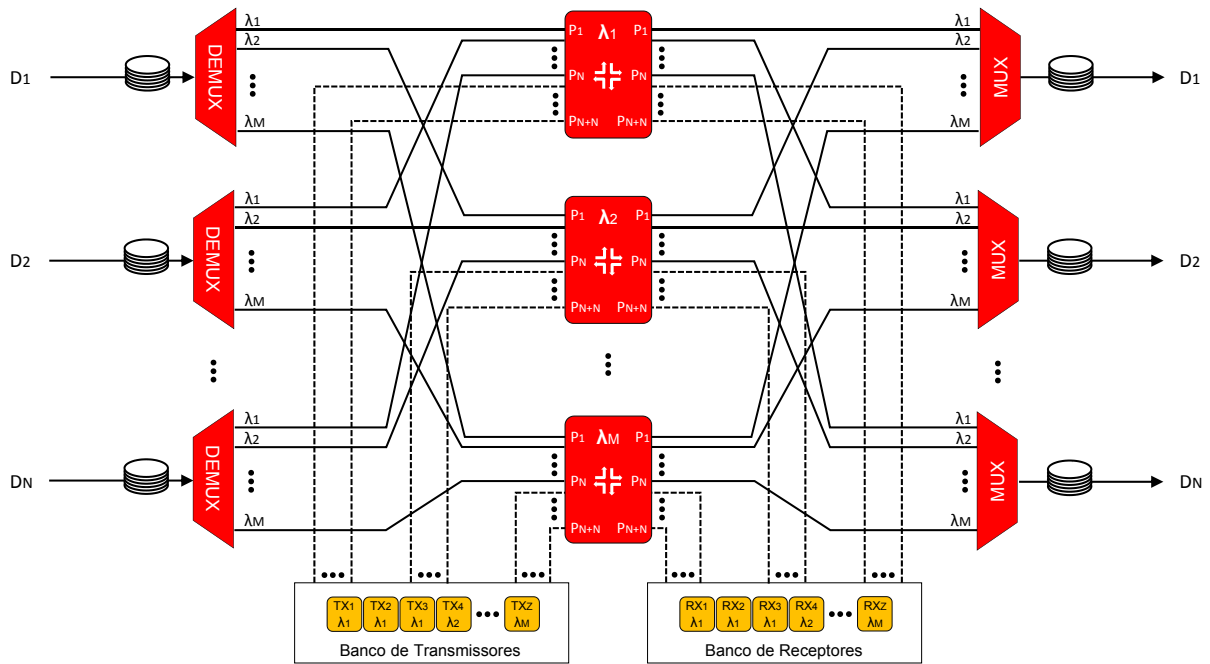


Figura 2.7: Modelagem do ROADM com arquitetura baseada em comutadores por comprimento de onda.

circuitos ópticos destinados a este site ROADM, todos com mesmo comprimento de onda, e cada um chegando ao site por interfaces WDM de entrada distintas. Por fim, são empregados N elementos MUX responsáveis por multiplexar os sinais ópticos encaminhados pelas matrizes de comutação para cada interface WDM de saída.

A partir da arquitetura proposta em [23] e apresentada na Fig.2.7, o estudo [31] apresentou três distintas fontes de *crossstalk* originadas neste modelo de ROADM: *co-wavelength crossstalk* originado nas matrizes de comutação; *self-wavelength crossstalk* e *neighbor crossstalk* originados devido às imperfeições dos elementos DEMUX.

A Figura 2.8 apresenta um exemplo onde o *co-wavelength crossstalk* é introduzido em dois circuitos ópticos. Os circuitos ópticos serão identificados na figura como LSP (*Label Switched Path*). Neste exemplo, inicialmente o LSP₁ é estabelecido entre a interface WDM de entrada D₁ e a interface de saída D₁. Em seguida, um segundo circuito óptico identificado como LSP₂ é estabelecido no mesmo comprimento de onda λ_1 entre as interfaces de entrada D₂ e de saída D₂.

Na matriz de comutação de comprimentos de onda, para cada sinal óptico encaminhado, é necessária a alocação de uma porta de entrada e outra de saída disponíveis. As demais $((2.N) - 1)$ portas de entrada são isoladas da porta de saída selecionada. Infelizmente as matrizes de comutação não conseguem isolar completamente as portas não interconectadas. O fator de isolamento típico é de 35 dB entre portas de entrada e saída não interconectadas.

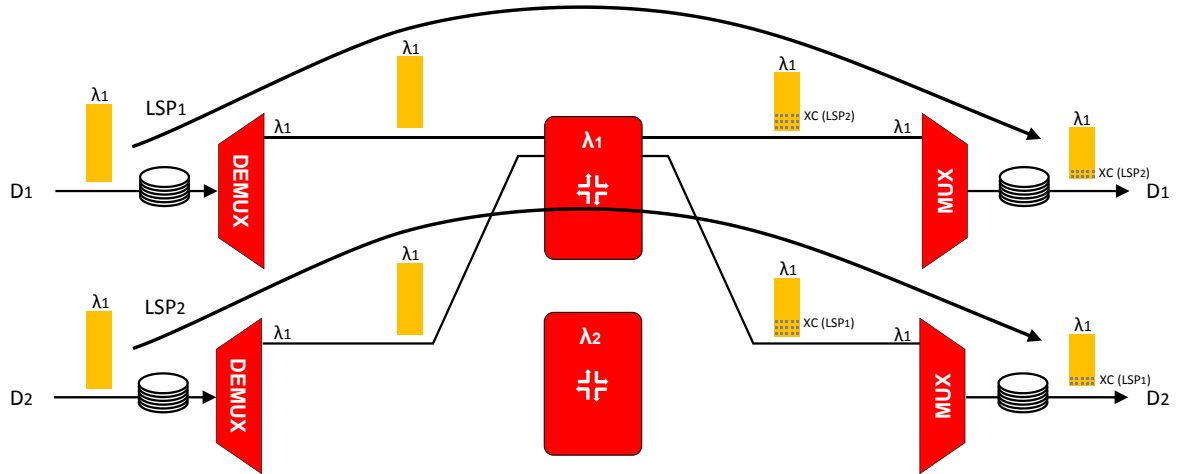


Figura 2.8: Incidência do *co-wavelength crosstalk*.

O ruído *co-wavelength crosstalk* gerado em cada LSP que atravessa um elemento ROADM com arquitetura baseada em comutadores por comprimento de onda é dado por [33] :

$$N_{co-wavelength}(\lambda) = \varepsilon \times \sum_{i=1, i \neq k}^n P_{SW_i}(\lambda) \quad (2.2)$$

onde λ indica o comprimento de onda do LSP avaliado, ε indica o fator de isolamento da matriz de comutação, P_{SW_i} indica a potência do sinal óptico presente na i -ésima porta de entrada da matriz de comutação SW responsável pelo comprimento de onda λ e k indica a porta de entrada da matriz de comutação SW ocupada pelo sinal avaliado.

No exemplo apresentado na Fig.2.8, a matriz de comutação responsável pelo λ_1 possui duas portas de entrada e duas portas de saída alocadas. Conforme observado na Eq. 2.2, se ao menos dois sinais ópticos de mesmo comprimento de onda chegarem a um determinado ROADM haverá incidência do ruído *co-wavelength crosstalk*. Desta forma, a incidência do *co-wavelength crosstalk* em redes ópticas reconfiguráveis que adotam este tipo de arquitetura de ROADM é bastante frequente.

O segundo tipo de *crosstalk* introduzido em elementos ROADM que adotam a arquitetura apresentada na Fig.2.7 é o *self-wavelength crosstalk*. O elemento DEMUX possui uma porta de entrada WDM e M portas de saída. Cada porta de saída é responsável por transportar um determinado comprimento de onda. No entanto, devido às imperfeições de isolamento do elemento DEMUX, em cada porta de saída é possível encontrar, além do comprimento de onda específico da porta, uma fração de potência dos demais comprimentos de onda presentes na porta de entrada do DEMUX. Para os comprimentos de onda imediatamente vizinhos ao comprimento de onda de referência de cada porta de saída, o fator de isolamento típico é de 25 dB a 30 dB. Para os demais comprimentos de onda o fator de isolamento típico é superior a 40 dB.

Um exemplo da incidência do *self-wavelength crosstalk* é apresentado na Figura 2.9. Dois LSPs alocados em comprimentos de onda vizinhos chegam ao elemento ROADM pela mesma direção D_1 e são encaminhados também para uma mesma direção de saída D_1 . Neste exemplo, devido a isolamento não ideal do DEMUX, uma fração de potência do LSP₂ (λ_2) é encontrada na porta de saída do elemento DEMUX responsável pelo transporte de λ_1 , e vice-versa. Se ambos os sinais forem encaminhados para o mesmo elemento MUX, a fração de potência que havia vazado para a porta vizinha no DEMUX retorna como ruído *self-wavelength crosstalk* após a multiplexação.

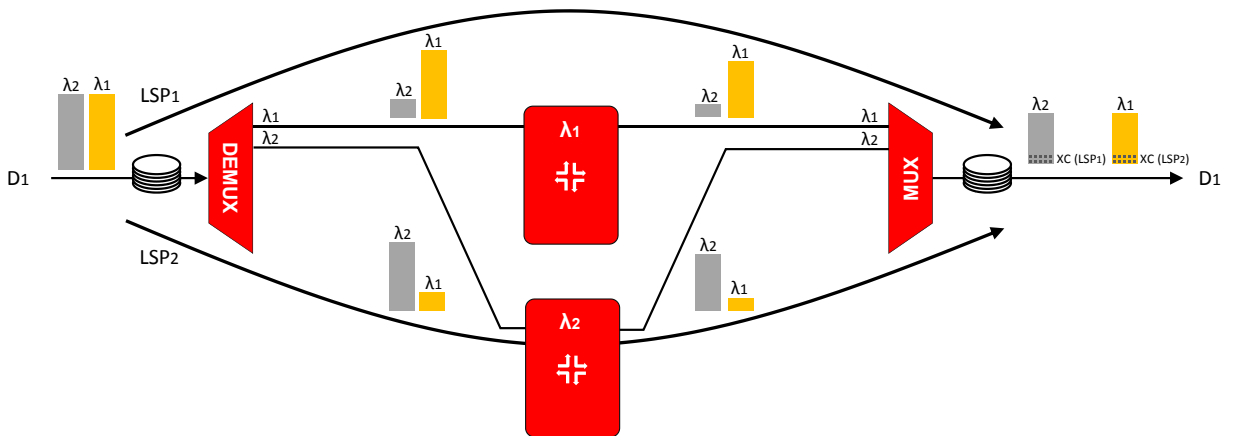


Figura 2.9: Incidência do *self-wavelength crosstalk*.

No *self-wavelength crosstalk*, a fração de potência responsável pelo ruído *crosstalk* em um determinado LSP é originada pelo próprio LSP. Como pode ser observado na Figura 2.10, no caso do ruído *neighbor-wavelength crosstalk*, a diferença é que o LSP afetado e o LSP que origina o *crosstalk* são distintos.

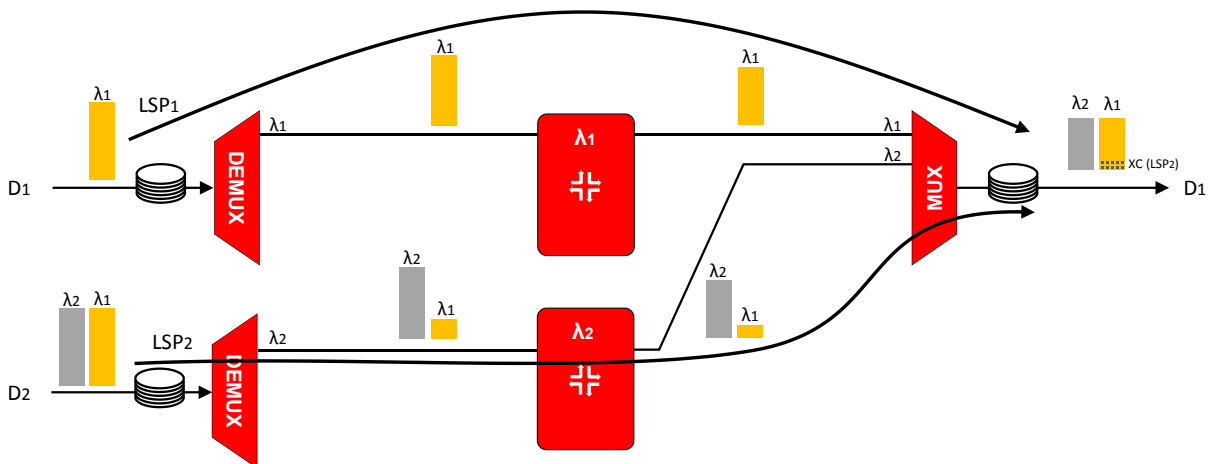


Figura 2.10: Incidência do *neighbor-wavelength crosstalk*.

A modelagem utilizada em [31] ainda considera que os três tipos de ruído *crosstalk* originados nos elementos ROADM são gaussianos, e portanto, podem ser somados ao ruído ASE, também gaussiano, originado nos amplificadores. Estudos mais recentes também adotaram esta estratégia, onde os ruídos ASE e *crosstalk* são considerados gaussianos, e portanto, podem ser somados para composição do ruído total acumulado nos circuitos ópticos [30, 59].

Embora a arquitetura proposta em [23] seja factível para a construção de elementos ROADM, alguns fatores limitaram a sua adoção na indústria de comunicações ópticas. Dentre os principais fatores é possível destacar a escalabilidade limitada desta arquitetura. Uma arquitetura escalável deve permitir a construção de elementos ROADM com número reduzido de Graus, com possibilidade de expansão *hot swap* para um maior número de Graus. Desta forma, o custo do elemento ROADM se torna modular em função do número de interfaces WDM suportadas, acompanhando o crescimento da rede, e consequentemente, acompanhando o nível de receita gerada pela rede óptica de transporte. A arquitetura proposta em [23] é escalável em relação ao número de canais suportados, mas não em relação ao número de Graus suportados.

2.4.2 Arquitetura Broadcast&Select com Comutadores WSS

Os elementos ROADM se tornaram uma realidade no mercado de comunicações ópticas a partir de 2004 com o advento da tecnologia de comutação WSS aliada à arquitetura Broadcast&Select. Alguns relatórios de mercado, como por exemplo [14], ao estimarem o volume de mercado dos elementos ROADM, citam o volume de módulos WSS comercializados conforme observado na Fig.1.9.

Ao longo dos últimos anos, distintas tecnologias foram empregadas na construção dos módulos WSS [15]. Dentre as mais populares temos as tecnologias MEMS e LCoS. A tecnologia MEMS é mais popular no mercado de ROADM de Grau 2 devido ao seu menor custo. Já a tecnologia LCoS ganhou bastante visibilidade nos últimos anos por viabilizar os módulos de comutação WSS com configuração flexível do espectro, importante característica para as redes ópticas elásticas [60].

A Figura 2.11 apresenta o modelo funcional do módulo WSS $N \times 1$ composto por N interfaces WDM de entrada e uma interface WDM de saída.

O módulo WSS consegue lidar com até M comprimentos de onda em cada interface WDM. Portanto, o módulo WSS consegue lidar com até $M.N$ distintos comprimentos de onda de entrada. Através da sua matriz de comutação, o módulo WSS permite a composição do sinal WDM de saída com até M comprimentos de onda dentre os $M.N$ disponíveis nas interfaces WDM de entrada. Os demais $M.(N - 1)$ comprimentos de onda são bloqueados. O modelo funcional do módulo WSS pode ser comparado ao de um comutador de portas com $M.N$ portas lógicas de entrada, e apenas M portas lógicas de saída. Cada porta de saída pode ser interligada a apenas uma porta de entrada. A tabela

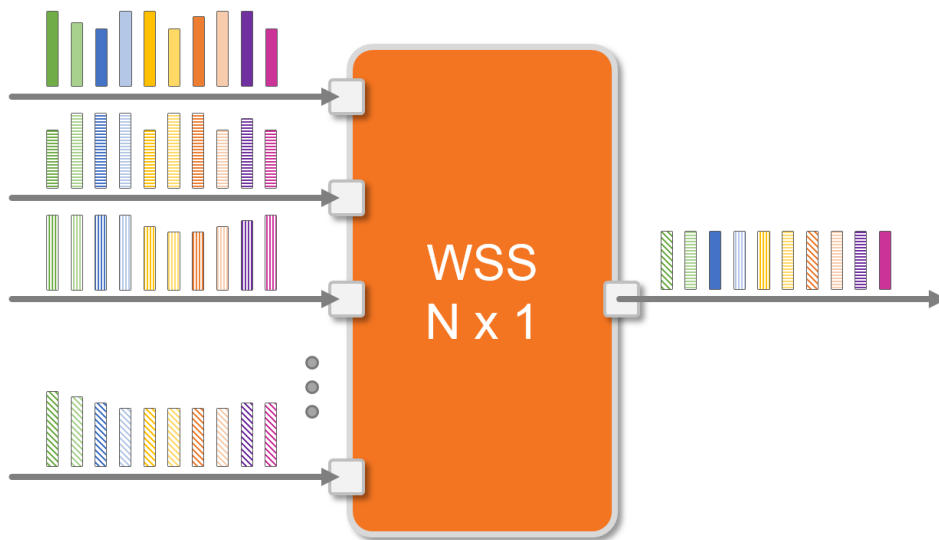


Figura 2.11: Modelo funcional do WSS.

dinâmica de encaminhamento do módulo WSS define quais portas de entrada e saída são interligadas ao longo do tempo.

Além da função de comutação, o módulo WSS possui atenuadores ópticos variáveis que atuam de forma independente em cada comprimento de onda presente na interface WDM de saída. A atenuação variável suportada pelos módulos WSS cumpre um papel importante nas redes ópticas reconfiguráveis, pois permite que a rede trabalhe com sinais ópticos equalizados nos enlaces de saída dos elementos ROADM.

A Figura 2.12 apresenta a arquitetura Broadcast&Select utilizada para construção do elemento ROADM de Grau N a partir de N módulos WSS $N \times 1$. As N interfaces WDM de entrada indicadas por D ao lado esquerdo da figura estão conectadas a N *splitters*. Cada *splitter* possui N portas de saída, onde $N - 1$ portas são utilizadas para encaminhar o sinal WDM de entrada para todos os módulos WSS, com exceção do WSS posicionado na mesma interface D do sinal de entrada. Esta exceção leva em consideração que o sinal óptico será encaminhado para uma interface WDM de saída distinta da interface WDM de entrada. A última porta do *splitter* é interligada ao DEMUX responsável pelo Drop dos circuitos ópticos.

Os *splitters* são os responsáveis pela característica *Broadcast* da arquitetura, ou seja, todos os circuitos ópticos que chegam ao site ROADM por uma determinada interface WDM de entrada são encaminhados para os módulos WSS presentes em todas as demais interfaces WDM de saída.

A função *Select* da arquitetura fica por conta dos módulos WSS. Dentre as N interfaces de entrada de cada módulo WSS, $N - 1$ interfaces estão conectadas às interfaces WDM de entrada do elemento ROADM, e uma interface é interligada ao MUX responsável pelo Add dos circuitos ópticos. De posse de todos os $N.M$ comprimentos de onda candidatos, o módulo WSS, através da sua matriz de

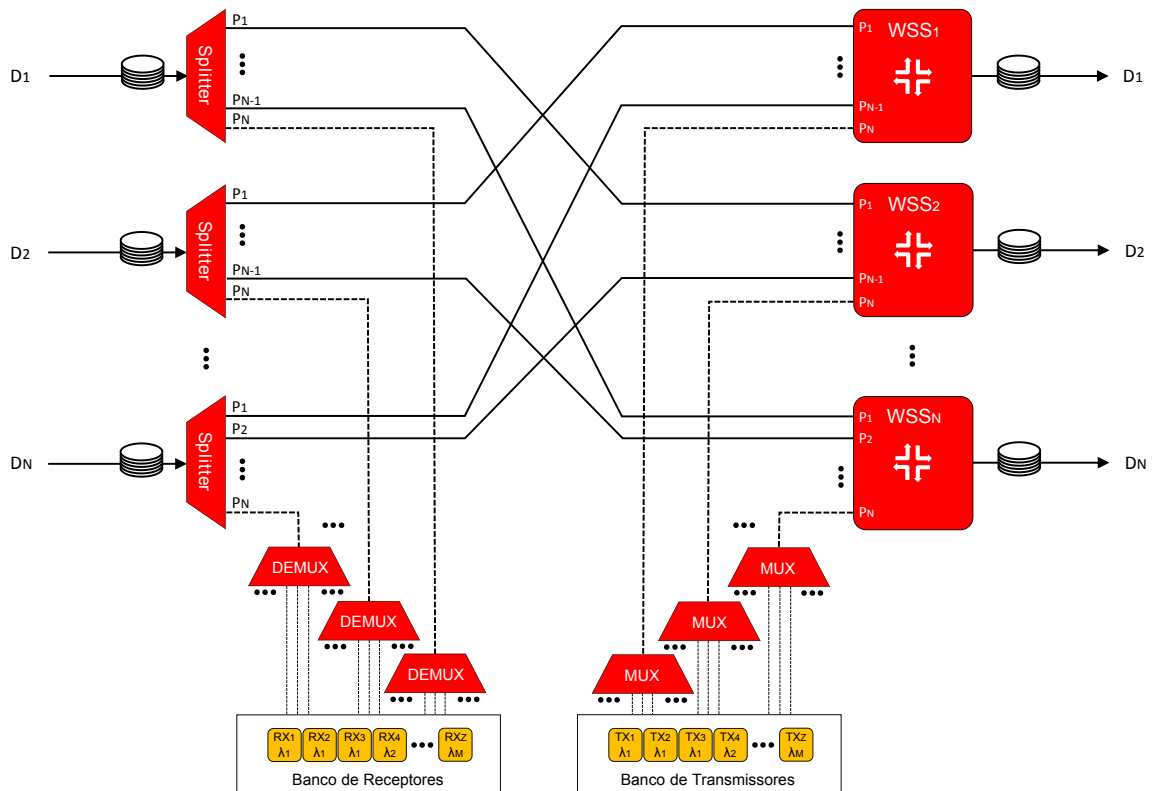


Figura 2.12: Modelagem do ROADM com Arquitetura Broadcast&Select com base nos Comutadores WSS.

comutação, define quais os comprimentos de onda irão compor a interface WDM de saída do ROADM da qual é responsável.

Na arquitetura Broadcast&Select, a tabela de encaminhamento do elemento ROADM é composta por outras N tabelas de encaminhamento, uma para cada módulo WSS do elemento ROADM de Grau N . À medida em que novos circuitos ópticos são estabelecidos ou finalizados na rede, as tabelas de encaminhamento são atualizadas através do sistema de gerência da rede ou através de uma camada especializada do plano de controle.

Diferente da arquitetura proposta em [23], a arquitetura Broadcast&Select com módulos de comutação WSS permite um crescimento modular do número de Graus do ROADM. Se forem empregados módulos WSS 9×1 por exemplo, o elemento ROADM pode ser construído inicialmente com suporte a 2 Graus, podendo chegar a 9 Graus com a instalação de novos módulos WSS 9×1 no mesmo elemento ROADM.

Outra importante diferença entre as duas arquiteturas apresentadas está na incidência do ruído *crosstalk*. Na arquitetura Broadcast&Select, o ruído *crosstalk* é originado nos módulos WSS devido às imperfeições de isolamento para os circuitos ópticos bloqueados. Conforme visto anteriormente, dentre os $M \cdot N$ possíveis comprimentos de onda presentes nas N interfaces WDM de entrada do módulo WSS, no máximo M comprimentos de onda podem ser encaminhados para a interface WDM de saída. Todos

os demais $M.(N-1)$ comprimentos de onda são bloqueados. Para os comprimentos de onda bloqueados, devido à isolamento limitada dos módulos WSS, uma fração de potência acaba sendo encaminhada para a interface WDM de saída. O fator de isolamento típico dos módulos WSS gira em torno de 35 dB a 40 dB.

A Figura 2.13 ilustra a incidência de *crosstalk* em um elemento ROADM com arquitetura Broadcast&Select e comutadores WSS. Neste exemplo, um primeiro circuito óptico (LSP_1) de comprimento de onda λ_1 é estabelecido entre as interfaces de entrada D_2 e de saída D_3 .

Conforme observado na Fig.2.13.a, o splitter posicionado na interface de entrada D_2 também encaminha o LSP_1 para a interface de saída D_1 , e para o DEMUX. Na interface de saída D_1 , o módulo WSS tenta bloquear o LSP_1 , dado que ele não foi encaminhado para esta interface. Conforme observado anteriormente, a isolamento para os circuitos bloqueados pelo WSS não é ideal. Desta forma, uma fração de potência do LSP_1 acaba sendo transmitida através de D_1 .

Em seguida, um segundo circuito óptico (LSP_2) de comprimento de onda (λ_1) é estabelecido entre as interfaces de entrada D_1 e de saída D_2 . Conforme observado na Fig.2.13.b, uma fração de potência do LSP_2 é transmitida através da interface D_3 , e incide no LSP_1 como *crosstalk*, dado que ambos os sinais estão no mesmo comprimento de onda.

Neste exemplo, foi possível observar que o nível de degradação dos circuitos ópticos já estabelecidos na rede pode alterar à medida que novos circuitos são estabelecidos ou finalizados na rede devido a incidência de *crosstalk* nos elementos ROADM.

O ruído *crosstalk* gerado por cada ROADM de arquitetura Broadcast&Select sobre um determinado circuito óptico é dado por [44] :

$$XT_{s,d}(\lambda) = \varepsilon \times \sum_{i=1, i \neq s}^N P_{i,d}(\lambda) \quad (2.3)$$

onde $XT_{s,d}$ indica a potência total do ruído *crosstalk* gerado pelo elemento ROADM no circuito óptico oriundo da interface de entrada s e encaminhado para interface de saída d , no comprimento de onda avaliado λ , ε indica o fator de isolamento do módulo WSS e $P_{i,d}$ indica a potência de entrada do sinal óptico presente na i -ésima interface de entrada do módulo WSS responsável pela interface de saída d . O ruído *crosstalk* deve ser contabilizado em todos os elementos ROADM que compõem a rota do circuito óptico.

Estudos recentes, com foco apenas na camada de transmissão, levaram em consideração a arquitetura Broadcast&Select e as implicações do ruído *crosstalk* no desempenho dos circuitos ópticos [43–45]. Segundo o nosso conhecimento, esta é a primeira vez que a arquitetura Broadcast&Select será empregada em um estudo de RWA-DIA. Embora não tenha sido escopo desta dissertação, também realizamos estudos sobre o problema RWA-DIA considerando a arquitetura de ROADM apresentada na Seção 2.4.1. Os resultados foram publicados em [42, 61].

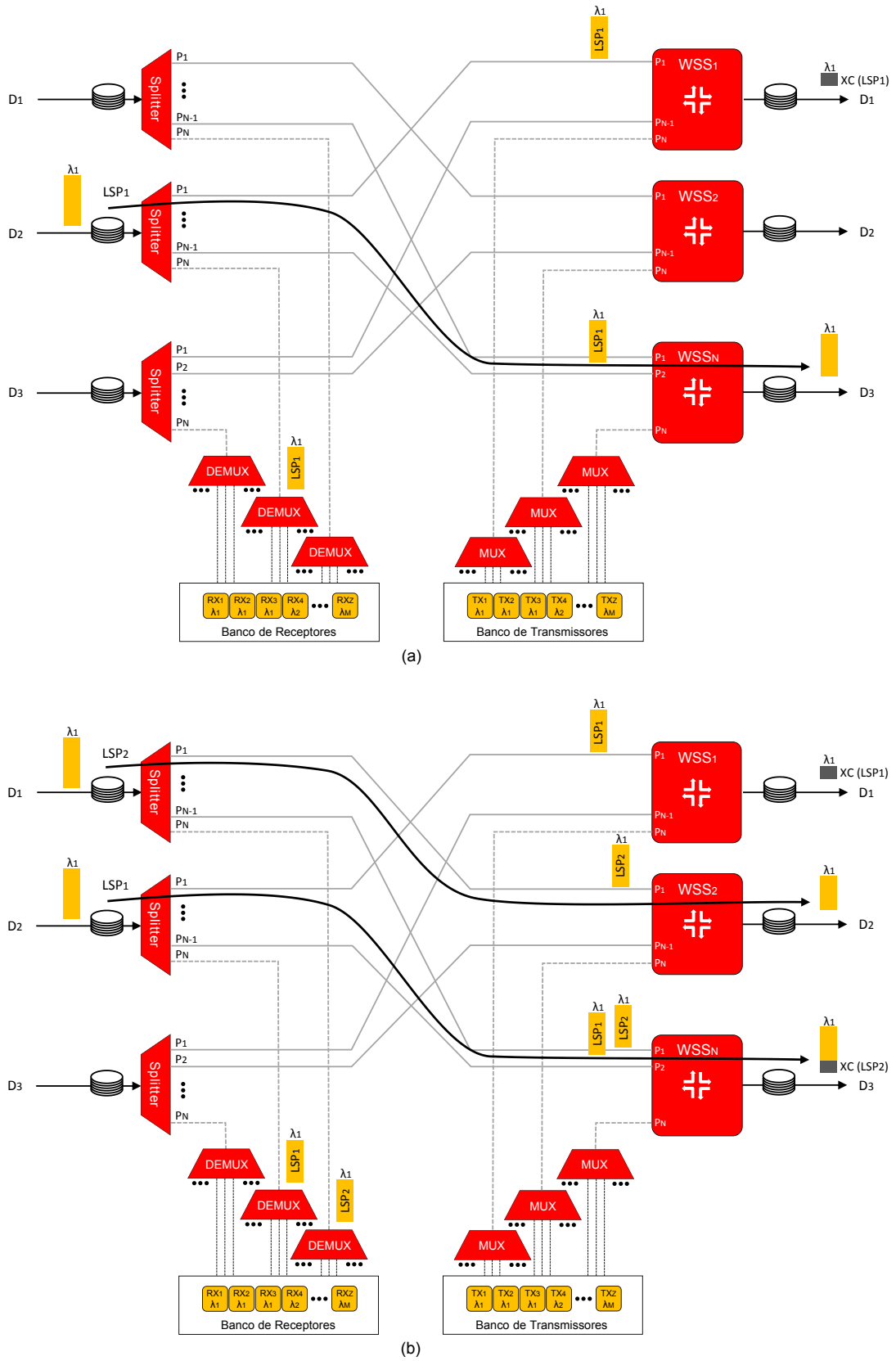


Figura 2.13: Incidência de Crosstalk no ROADMs Broadcast&Select.

Os elementos WSS, assim como os elementos MUX/DEMUX, utilizam filtros ópticos periódicos. Em [43, 55] foram realizados testes experimentais para avaliar o impacto da filtragem óptica em sinais de 111 Gbps de linha com modulação DP-QPSK e detecção coerente. Os resultados indicaram que filtros gaussianos de alta ordem com até 30 GHz de banda passante FWHM são satisfatórios para evitar impactos relevantes no desempenho do sinal transportado. A penalidade avaliada foi inferior a 1 dB no OSNR mínimo para uma taxa bruta de erro de 10^{-3} . Um outro estudo experimental [44] chegou a conclusão que seriam necessários mais de 16 elementos WSS em cascata para que a banda passante resultante FWHM fosse inferior a 30 GHz. As redes ópticas reconfiguráveis trabalham, tipicamente, com topologias em malha. Neste caso, é muito improvável a existência de circuitos ópticos que atravessem 16 elementos WSS sem que antes haja a necessidade de regeneração eletrônica. Por isso, neste trabalho foi desconsiderada a penalidade inserida pela filtragem óptica dos elementos WSS e MUX/DEMUX no sinal óptico transportado.

A modelagem de camada física adotada neste trabalho considerou, portanto, duas fontes de ruído para o cálculo de degradação de OSNR dos circuitos ópticos da rede: ruído ASE e ruído *crosstalk*.

Assim como em diversos outros trabalhos [30, 31, 59], ambos os ruídos foram considerados gaussianos. Para o cálculo do OSNR residual de cada circuito óptico na rede, as contribuições do ruído ASE e do ruído de *crosstalk* foram somadas. Vale ressaltar que a contribuição do ruído ASE permanece inalterada enquanto o circuito óptico permanece ativo na rede, pois os amplificadores foram modelados com Ganho Alvo fixo. O ruído *crosstalk*, por outro lado, pode variar conforme visto neste capítulo. Para cada novo circuito óptico estabelecido ou finalizado na rede, todos os demais circuitos ópticos que permanecem ativos na rede passam por uma nova avaliação do OSNR residual.

As demais degradações de camada física levadas em consideração foram: perda de inserção dos elementos de rede MUX/DEMUX e dos elementos ROADM. Ambas as degradações incidem na potência do sinal óptico transportado. Assim como o ruído ASE, as degradações devidas as perdas de inserção permanecem inalteradas enquanto o circuito óptico permanece ativo na rede.

CAPÍTULO 3

ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO
DE ROTA E COMPRIMENTO DE
ONDA

Everything should be made as simple as possible, but not simpler.

— Albert Einstein

3.1 Motivação

A capacidade máxima de transmissão de uma rede óptica de transporte, com tecnologia WDM, e topologia ponto a ponto é relativamente fácil de dimensionar. A princípio, todos os comprimentos de onda suportados pelo sistema serão utilizados, quando necessário. Neste caso, o administrador da rede possui uma clara visão do potencial de receita que a rede de transporte WDM ponto a ponto pode gerar.

Quando se trata de uma rede óptica WDM reconfigurável, com tráfego dinâmico, a única alternativa para alcançar a capacidade máxima da rede de transporte é a adoção da topologia *full-mesh*. Na topologia *full-mesh* existe ao menos um enlace óptico para interligar cada par de nós origem e destino da rede. Ou seja, dada uma rede com N elementos de terminação de tráfego, são necessários ao menos $N.(N-1)$ enlaces ópticos para interligar diretamente os N elementos e formar uma topologia *full-mesh*.

Devido ao altíssimo custo associado à topologia *full-mesh*, as redes ópticas de transporte reconfiguráveis geralmente trabalham com número limitado de enlaces, resultando em uma capacidade de transporte limitada entre os sites de terminação de tráfego.

Outro agravante que limita a capacidade máxima de transporte da rede óptica WDM reconfigurável com topologia em malha é a restrição de continuidade de comprimento de onda. A tecnologia

de conversão de comprimento de onda em meio óptico ainda não se encontra madura o suficiente para ser comercializada. Com a ausência desta tecnologia, para o estabelecimento de um circuito óptico é necessário alocar um comprimento de onda contínuo ao longo de todos os enlaces que compõem a rota do circuito. Ou seja, mesmo havendo comprimentos de onda disponíveis em todos os enlaces da rede, um circuito óptico pode ser bloqueado devido a ausência de comprimento de onda contínuo e disponível ao longo da rota escolhida.

Ao contrário das redes ópticas WDM ponto a ponto, o administrador da rede óptica WDM reconfigurável, sujeita a uma demanda dinâmica de tráfego, possui grande dificuldade em prever o potencial de receita que a rede pode gerar, dado que ele não sabe ao certo a carga máxima de tráfego que conseguirá atender. Além disso, não existe uma solução ótima em termos de provisionamento dos circuitos para que seja alcançada a carga nominal da rede óptica WDM reconfigurável.

Os algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda, também conhecidos como algoritmos RWA, surgiram com objetivo de maximizar a carga útil de tráfego suportada nas redes ópticas WDM reconfiguráveis através de heurísticas. A cada nova requisição de circuito óptico que chega à rede, o algoritmo RWA é responsável por definir uma rota e um comprimento de onda contínuo para ser alocado na rota definida. As heurísticas utilizadas, em geral, visam maximizar a probabilidade de atendimento de futuros circuitos ópticos na rede.

Os algoritmos RWA despertaram um grande interesse no mercado das redes ópticas reconfiguráveis. Afinal, a escolha de um bom algoritmo RWA reflete em uma maior carga útil suportada pela rede, e conseqüentemente, maior potencial de receita a ser gerada com a rede de transporte.

3.2 Evolução das Abordagens ao Problema RWA

Os primeiros algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda foram propostos e avaliados considerando a abordagem RWA convencional [17]. Segundo esta abordagem, a camada física atua como um meio ideal de transmissão e, portanto, qualquer escolha de rota e comprimento de onda é considerada válida do ponto de vista de desempenho da camada física. Conforme observado na Figura 3.1, na abordagem RWA convencional o circuito óptico é bloqueado apenas em caso de Ausência de Comprimento de Onda (ACO) contínuo e disponível ao longo da rota selecionada.

Os algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda propostos de acordo com a abordagem RWA convencional tinham como objetivo minimizar a probabilidade de bloqueio de futuras requisições de circuitos ópticos devido a ausência de comprimentos de onda disponíveis. Portanto, minimizar bloqueios do tipo ACO. Neste trabalho avaliaremos o desempenho de dois destes algoritmos: FIRST-FIT (FF) e RANDOM (RD).

Uma segunda e mais avançada abordagem ao problema RWA foi proposta em [23]. Nesta

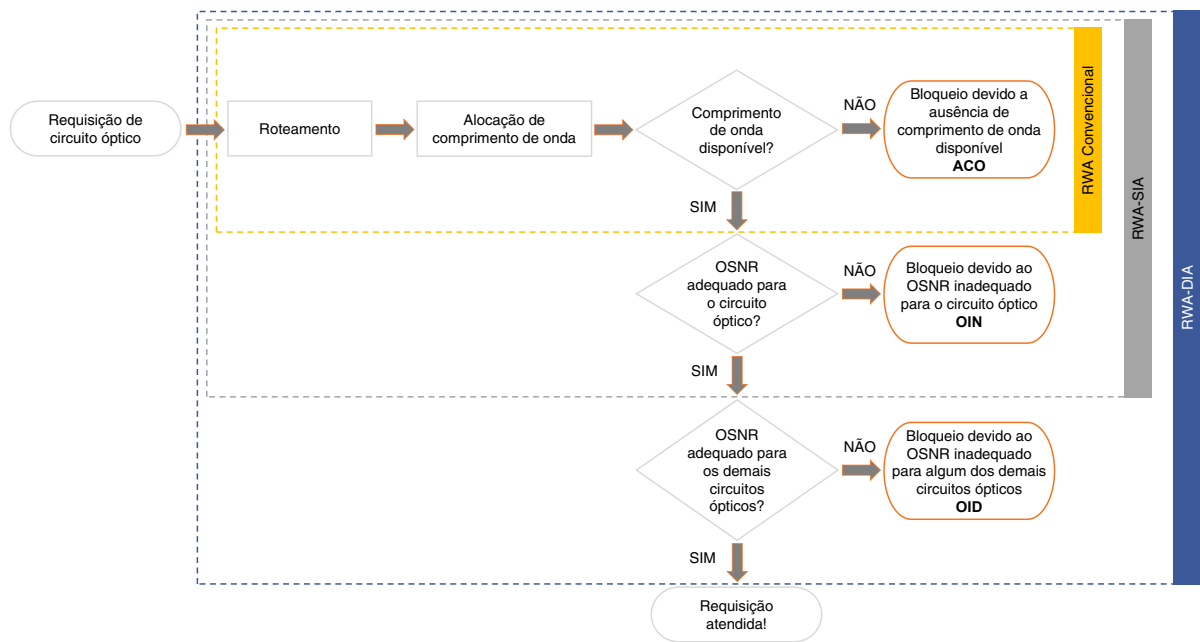


Figura 3.1: Evolução das abordagens ao problema RWA.

abordagem, o estabelecimento de um circuito óptico se confirma mediante a reserva de uma rota e um comprimento de onda disponível e em condições adequadas em termos de degradação da camada física. A nova abordagem ao problema RWA ficou conhecida na literatura como RWA-IA . Nesta abordagem, os bloqueios podem ser ocasionados por dois motivos distintos: ausência de comprimento de onda contínuo (ACO); e condições inadequadas em termos de degradação de camada física para o novo circuito óptico candidato (OIN). Diversos algoritmos RWA sensíveis às degradações de camada física foram propostos na literatura [25–29, 36–39]. Este algoritmos, de uma forma geral, procuram minimizar ambos os tipos de bloqueios previstos na abordagem RWA-IA ou seja, os bloqueios ACO e OIN.

Embora seja uma abordagem mais realista se comparada à abordagem RWA convencional, a abordagem RWA-IA não leva em consideração a influência do estabelecimento de novos circuitos na degradação dos circuitos já ativos na rede. A análise das condições de camada física é realizada apenas no momento do estabelecimento de um novo circuito óptico. Se as condições de camada física estiverem adequadas no momento do estabelecimento do novo circuito, assume-se que as condições permanecerão adequadas enquanto o circuito estiver ativo. Na realidade, o estabelecimento de novos circuitos em uma rede óptica pode ocasionar degradações adicionais em circuitos ópticos já ativos na rede, assim como a finalização de circuitos pode reduzir as degradações em circuitos ainda ativos. Portanto, as degradações de camada física de um determinado circuito óptico podem variar enquanto ele permanece ativo na rede. Neste trabalho, a abordagem RWA-IA convencional será chamada de RWA-SIA devido à abordagem estática dada às degradações de camada física dos circuitos ópticos já ativos na rede.

Na seção 2.4.2 vimos que devido ao ruído *crosstalk* originado nos elementos ROADM,

à medida em que novos circuitos ópticos são provisionados ou encerrados, o nível de ruído *crosstalk* nos demais circuitos ativos da rede pode variar. Neste trabalho, o problema RWA-IA será abordado considerando o dinamismo das restrições de camada física, ou seja, as degradações de camada física serão atualizadas a cada novo circuito óptico provisionado ou finalizado. Esta abordagem será chamada neste trabalho de RWA-DIA .

Conforme observado na Fig.3.1, na abordagem RWA-DIA, um novo circuito óptico é estabelecido se, e somente se, as seguintes premissas forem atendidas:

- Haver disponibilidade de rota e comprimento de onda;
- Limiar de degradação na camada física deve ser atendido para o novo circuito óptico;
- Assumindo que o novo circuito óptico seja atendido, os limiares de degradação para todos os demais circuitos ópticos já ativos na rede também devem ser atendidos.

As duas primeiras premissas também são consideradas na abordagem RWA-SIA, e estão relacionadas aos bloqueios do tipo ACO e OIN, respectivamente.

A terceira premissa, caso não atendida, indica que ao menos um circuito óptico já estabelecido na rede sofrerá uma degradação de camada física acima do limite tolerado, caso o novo circuito óptico seja estabelecido. Neste caso, vamos considerar dois desfechos possíveis:

- **RWA-DIA Altruísta:** O novo circuito óptico será bloqueado em prol dos circuitos ópticos já ativos na rede. Seguindo a linha altruísta, um circuito óptico, enquanto ativo na rede, não corre o risco de sofrer uma degradação de camada física além do limite tolerado.
- **RWA-DIA Egoísta:** O novo circuito óptico será estabelecido. O *crosstalk* originado pelo novo circuito levará ao menos um dos circuitos ópticos já ativos na rede a operar com condições inadequadas de camada física. Os circuitos afetados permanecerão ativos na rede, mas serão classificados como degradados. Nesta abordagem, não há garantia que um circuito óptico, enquanto ativo na rede, permanecerá com limiar adequado de degradação de camada física. Na abordagem RWA-DIA Egoísta não temos os bloqueios do tipo OIN. No entanto, são contabilizados os circuitos ópticos ativos que sofreram degradações acima do limite tolerado enquanto ativos na rede. Para classificar um circuito óptico ativo como degradado, basta que o seu limiar de degradação tenha sido ultrapassado uma única vez. Na abordagem RWA-DIA Egoísta, a probabilidade de bloqueio será composta pelos circuitos bloqueados ACO e OIN, além dos circuitos degradados.

As redes ópticas WDM de transporte geralmente trabalham com circuitos ópticos de alta disponibilidade. Após a confirmação do estabelecimento do circuito óptico, não espera-se uma interrupção do tráfego devido ao estabelecimento de outros circuitos. Nesta linha, a abordagem RWA-DIA

Altruísta está bem mais alinhada aos requisitos das redes ópticas de transporte. No entanto, na prática, grande parte das redes ópticas operam com a abordagem RWA-DIA Egoísta. Isto porque uma grande parcela das redes ópticas não implementam mecanismos para avaliar o impacto, em termos de degradações de camada física, do estabelecimento de um novo circuito nos demais circuitos já ativos na rede. Nas redes que operam sem este mecanismo, apenas após o estabelecimento de um novo circuito é possível avaliar se houve alguma degradação além do tolerado nos circuitos já ativos.

Além disso, acreditamos que haja algum espaço no mercado das redes ópticas de transporte para a abordagem RWA-DIA Egoísta, principalmente para serviços de baixo custo, na linha *Best Effort*. Se a rede possui, por exemplo, uma capacidade ociosa, a operadora pode ofertar um serviço de transporte de baixa disponibilidade a um custo reduzido através da abordagem RWA-DIA Egoísta. Segundo o nosso conhecimento, este é o primeiro trabalho a considerar a abordagem RWA-DIA Egoísta na avaliação de desempenho de algoritmos de alocação de comprimento de onda.

Neste trabalho vamos avaliar o desempenho dos algoritmos de alocação de comprimento de onda levando em consideração as duas abordagens RWA-DIA descritas acima.

3.3 Algoritmos RWA Avaliados

Para todos os algoritmos RWA avaliados neste trabalho, a solução de roteamento adotada foi a mesma: roteamento fixo alternativo com $k = 5$. Desta forma, as variações de desempenho que encontrarmos serão de exclusiva responsabilidade dos algoritmos de alocação de comprimento de onda empregados. As k rotas são ordenadas seguindo o critério de menor caminho fim-a-fim. A Figura 3.2 apresenta o diagrama da abordagem RWA-DIA Altruísta com roteamento fixo alternativo.

Quando um algoritmo de roteamento fixo alternativo é utilizado na abordagem RWA-DIA, diferentes tipos de bloqueio podem ocorrer para uma mesma requisição de circuito óptico. Uma requisição pode, por exemplo, ser bloqueada na primeira rota avaliada ($K = 1$), devido a ausência de comprimento de onda contínuo disponível. Na segunda rota avaliada para a mesma requisição ($K = 2$), o bloqueio pode ocorrer, por exemplo, devido ao OSNR inadequado. Caso a requisição não seja atendida após as K diferentes rotas avaliadas, podemos encontrar uma situação onde diferentes tipos de bloqueio foram responsáveis pelo não atendimento da requisição. Como o interesse deste trabalho não se limita a avaliar apenas o volume de requisições bloqueadas, sentimos a necessidade de definir um critério para classificar o tipo de bloqueio predominante para cada requisição não atendida.

Conforme o diagrama apresentado na Fig.3.2, os algoritmos de RWA terão no máximo cinco tentativas para a escolha de uma combinação de rota e comprimento de onda contínuo que satisfaçam os critérios para o provisionamento do novo circuito óptico. Caso os critérios não sejam atendidos ao longo das cinco tentativas, a requisição será classificada com o tipo de bloqueio predominante. O

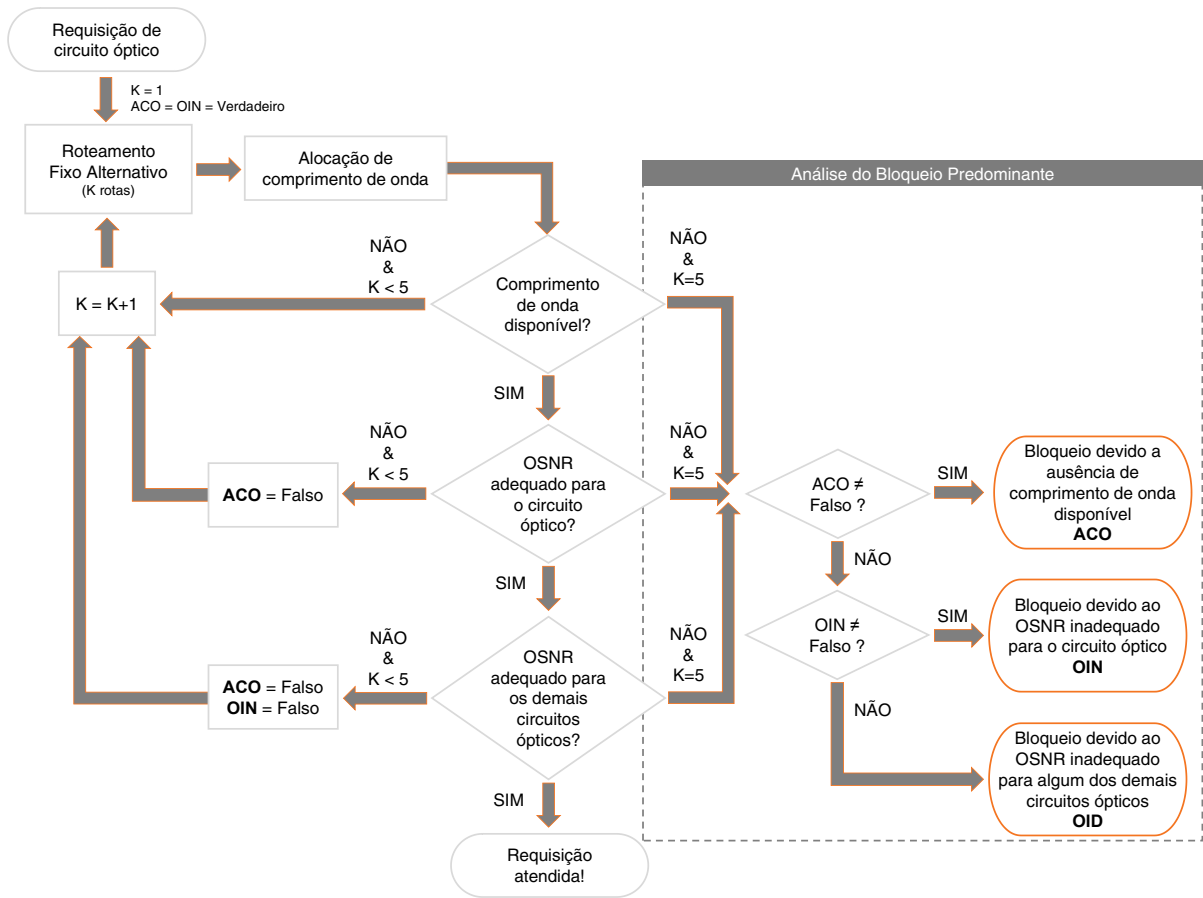


Figura 3.2: Abordagem RWA-DIA Altruista com roteamento fixo alternativo.

bloqueio predominante será do tipo ACO caso nenhum comprimento de onda contínuo disponível seja encontrado após as cinco tentativas. O bloqueio predominante será do tipo OIN caso exista ao menos uma combinação de rota e comprimento de onda contínuo disponível, porém nenhuma adequada do ponto de vista de degradação de OSNR para o estabelecimento do novo circuito óptico. Dentre as cinco tentativas, se houver ao menos uma combinação de rota e comprimento de onda contínuo disponível e com condições adequadas de OSNR para o estabelecimento do novo circuito óptico, o bloqueio predominante será do tipo OID.

A seguir serão descritos os algoritmos de alocação de comprimento de onda avaliados neste trabalho.

3.3.1 RANDOM - (RD)

Após o algoritmo de roteamento encontrar a menor rota com ao menos um comprimento de onda contínuo disponível, o algoritmo RD escolhe aleatoriamente um comprimento de onda dentre os disponíveis. Conforme mencionado anteriormente, a decisão de escolha do comprimento de onda através do algoritmo RD não leva em consideração as degradações de camada física. A decisão é baseada apenas

na análise de disponibilidade dos comprimentos de onda ao longo da rota.

3.3.2 FIRST-FIT - (FF)

Após o algoritmo de roteamento encontrar a menor rota com ao menos um comprimento de onda contínuo disponível, o algoritmo FF escolhe o comprimento de onda de menor frequência (THz) dentre os disponíveis. Assim como o algoritmo RD, o FF não leva em consideração as degradações de camada física. A decisão da escolha do comprimento de onda é baseada apenas na análise de disponibilidade dos comprimentos de onda ao longo da rota.

No capítulo 4 será realizado um estudo comparativo entre os dois algoritmos considerando as quatro abordagens ao problema RWA apresentadas na seção 3.2.

3.3.3 Crosstalk Aware Random Pick - (C-RP)

Em [31], um dos estudos pioneiros na abordagem RWA-DIA, os autores propuseram um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda com foco na redução global do *crosstalk* gerado nos elementos ROADM da rede.

Dado um conjunto de comprimentos de onda disponíveis para o estabelecimento de um novo circuito óptico entre um par de nós origem e destino, o algoritmo C-RP (*Crosstalk Aware Random Pick*) verifica, para cada um dos comprimentos de onda candidatos, quantos circuitos ópticos seriam degradados devido ao *crosstalk* gerado pelo novo circuito óptico caso o comprimento de onda candidato fosse o escolhido. Em seguida, o algoritmo C-RP seleciona o comprimento de onda que irá degradar o menor número de circuitos ativos. Em caso de empate, o comprimento de onda é selecionado aleatoriamente.

O algoritmo C-RP não leva em consideração a intensidade do *crosstalk* gerado nos demais circuitos ópticos ativos na rede, assim como não considera o nível de degradação em termos de OSNR dos circuitos ativos e afetados pelo estabelecimento do novo circuito.

A arquitetura de ROADM baseada em comutadores por comprimento de onda, apresentada na seção 2.4.1, foi adotada em [31]. Neste trabalho, todos os algoritmos de alocação de comprimento de onda serão avaliados em uma rede WDM reconfigurável composta por elementos ROADM com arquitetura Broadcast&Select, baseada em comutadores WSS (2.4.2).

Ainda em [31], o desempenho do algoritmo C-RP foi comparado com o desempenho de quatro outros algoritmos de alocação propostos, originalmente, para o cenário RWA convencional. Os algoritmos foram avaliados sob a perspectiva de dois tipos de bloqueio: ausência de comprimento de onda disponível (equivalente ao bloqueio ACO), e devido às condições inadequadas da camada física (equivalente à soma dos bloqueios OIN e OID). Os resultados indicaram que, para os bloqueios do tipo

ACO, os algoritmos originalmente propostos para a abordagem RWA convencional tiveram um melhor desempenho em relação ao algoritmo C-RP. Este resultado era esperado, já que na abordagem RWA convencional o único tipo de bloqueio considerado é o ACO, e os algoritmos avaliados eram especializados neste tipo de bloqueio. Em relação aos bloqueios devido às condições inadequadas de camada física (OIN + OID), o algoritmo C-RP superou com larga vantagem os demais algoritmos avaliados. Na soma geral dos bloqueios (ACO, OIN e OID), o algoritmo C-RP superou os demais algoritmos avaliados.

Outros estudos seguiram a mesma linha adotada por [31], onde novos algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda foram propostos com foco na redução do impacto causado pelo estabelecimento de novos circuitos ópticos nos demais já estabelecidos na rede [32–35]. No entanto, nenhum destes estudos avaliou o desempenho dos algoritmos propostos sob a perspectiva dos três tipos de bloqueios (ACO, OIN e OID). O algoritmo proposto por [31] será um dos avaliados neste trabalho.

3.3.4 Crosstalk Interference Avoidance - (CIA)

Antes de propor um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda, realizamos algumas simulações preliminares com objetivo de avaliar o desempenho dos algoritmos conhecidos da literatura em função dos três tipos de bloqueio (ACO, OIN, OID) existentes na abordagem RWA-DIA proposta. Os resultados indicaram que os bloqueios OID foram os mais significativos. Vale ressaltar que este trabalho foi o pioneiro na avaliação individual dos três tipos de bloqueios da abordagem RWA-DIA.

O relevante impacto dos bloqueios OID no desempenho dos algoritmos avaliados foi o fato motivador para a proposta de um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda, com objetivo de maximizar o desempenho geral da rede através da redução dos bloqueios do tipo OID. O algoritmo proposto foi chamado de CIA (*Crosstalk Interference Avoidance*). De uma maneira geral, o algoritmo procura minimizar os bloqueios OID evitando alocar os comprimentos de onda que acarretariam em uma degradação nos circuitos ópticos mais frágeis em termos de OSNR estabelecidos na rede. O fluxograma apresentado na Figura 3.3 descreve o algoritmo de alocação de comprimento de onda proposto. Para simplificar o diagrama e facilitar o entendimento foi adotada uma solução de roteamento fixo. No entanto, conforme mencionado anteriormente, todos os algoritmos de alocação de comprimento de onda avaliados neste trabalho foram implementados em conjunto com a solução de roteamento fixo alternativo.

Todos os circuitos ópticos estabelecidos devem anunciar ao plano de controle da rede o OSNR medido ou calculado no receptor do nó destino. Após a chegada de uma requisição de circuito óptico, deve-se avaliar o conjunto de comprimentos de onda disponíveis ao longo da rota selecionada. Para cada comprimento de onda disponível, deve-se avaliar quais circuitos ópticos ativos sofreriam degrada-

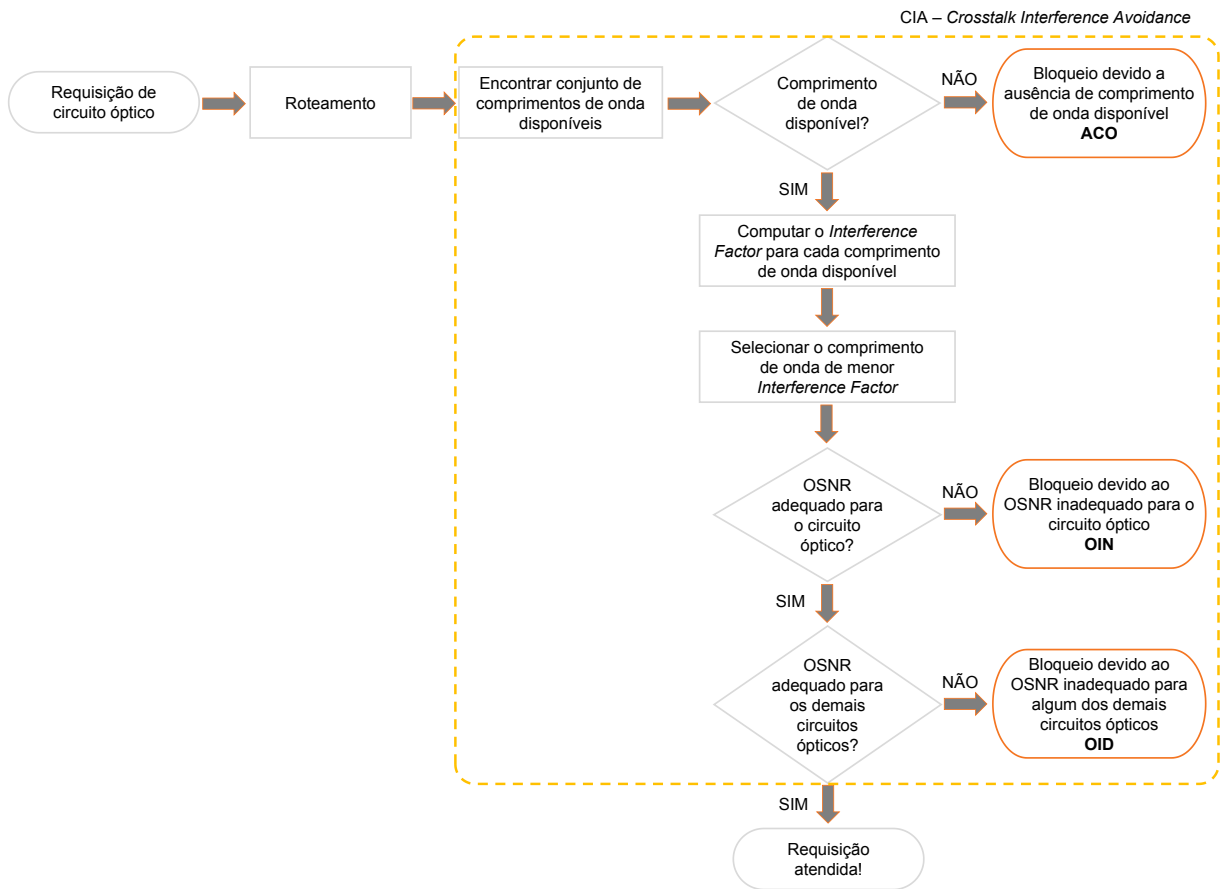
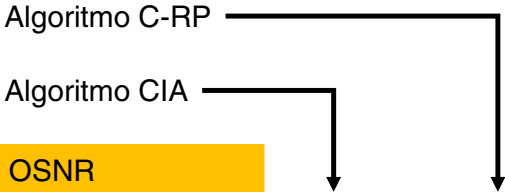


Figura 3.3: Fluxograma do algoritmo CIA.

ção de OSNR devido ao *crosstalk* causado pelo eventual estabelecimento do novo circuito óptico. Para todos os circuitos ópticos que seriam degradados, deve-se computar o estado de degradação atual através da margem residual de OSNR. A margem residual de OSNR (ΔOSNR) é dada por $(\text{OSNR}_{\text{CURRENT}} - \text{OSNR}_{\text{THRESHOLD}})$. O $\text{OSNR}_{\text{THRESHOLD}}$ representa o valor mínimo de OSNR tolerado pelo receptor óptico. O $\text{OSNR}_{\text{CURRENT}}$ representa o OSNR atual do circuito. Quanto menor o ΔOSNR , mais frágil a novas degradações é o circuito óptico. O *Interference Factor* é determinado pelo somatório de $(1/\Delta\text{OSNR})$ de todas as conexões que seriam degradadas.

A seguir será apresentado um exemplo para ajudar a esclarecer os passos descritos no parágrafo anterior. Neste exemplo, vamos admitir que existem cinco comprimentos de onda na rota escolhida para o estabelecimento do novo circuito óptico. A primeira etapa do algoritmo é listar os comprimentos de onda disponíveis para a alocação do novo circuito óptico. Vamos assumir que dentre os cinco comprimentos de onda existentes na rota escolhida, apenas três estejam disponíveis (λ_2 , λ_3 e λ_4). Vamos assumir também que nesta rede já existam outros cinco circuitos ópticos já ativos (LP_1 , LP_2 , LP_3 , LP_4 , LP_5). A Figura 3.4 apresenta um resumo deste cenário de exemplo.

Para cada um dos comprimentos de onda disponíveis, deve ser feita uma análise sobre a margem residual de OSNR dos circuitos ópticos já ativos, e que seriam degradados caso o novo circuito



		Δ OSNR					Interference Factor	Componentes de Crosstalk
	Disponibilidade	LP 1	LP 2	LP 3	LP 4	LP 5		
λ 1	Ocupado	-	-	-	-	-	-	-
λ 2	Livre	-	0,2 dB	-	2,0 dB	-	5,5	2,0
λ 3	Livre	1,0 dB	0,2 dB	1,5 dB	-	2,0 dB	7,2	4,0
λ 4	Livre	1,0 dB	-	1,5 dB	-	2,0 dB	2,2	3,0
λ 5	Ocupado	-	-	-	-	-	-	-

Figura 3.4: Escolha do melhor comprimento de onda através do Interference Factor do algoritmo CIA e do número de componentes de crosstalk do algoritmo C-RP.

óptico fosse estabelecido no comprimento de onda em questão. Esta busca é realizada com base na tabela de ocupação de comprimentos de onda dos circuitos ópticos ativos na rede. Esta tabela geralmente é divulgada através do plano de controle da rede. Neste exemplo, caso o circuito óptico seja estabelecido no λ_2 , os circuitos ópticos LP₂ e LP₄ seriam degradados, e o Δ OSNR deles é de 0,2 dB e 2 dB respectivamente. Portanto, o *Interference Factor* do λ_2 é de 5,5. O mesmo procedimento deve ser repetido para os demais comprimentos de onda disponíveis. Ao final, o algoritmo seleciona o comprimento de onda que apresenta o menor *Interference Factor*. Neste exemplo, conforme observado na Fig.3.4, o comprimento de onda selecionado pelo CIA seria o λ_4 .

Em caso de empate no *Interference Factor*, usaremos dois critérios de desempate: CIA-FF usará o algoritmo FIRST-FIT para o desempate; e o algoritmo CIA-RD escolherá aleatoriamente o comprimento de onda dentre os que tiveram empate com menor *Interference Factor*.

Se o algoritmo C-RP fosse utilizado neste mesmo exemplo, conforme observado na Fig.3.4, o comprimento de onda escolhido seria o λ_2 , pois trata-se do comprimento de onda que gera *crosstalk* no menor número de circuitos ópticos já ativos.

De uma maneira geral, o algoritmo CIA procura evitar degradar os circuitos ópticos mais frágeis (menor Δ OSNR). Quanto mais circuitos ópticos frágeis na rede, maior a probabilidade de que novas requisições de circuitos ópticos sejam bloqueadas por OID. Desta forma, podemos considerar que o algoritmo CIA é altruísta.

No Capítulo 4, o desempenho dos algoritmos CIA-FF, CIA-RD, C-RP, RANDOM e FIRST-FIT serão comparados sob diferentes abordagens ao problema RWA e em três distintas topologias.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

The best way to predict the future is to create it.

— Peter Drucker

Dada a complexidade da solução analítica para o cálculo da probabilidade de bloqueio de circuitos em redes ópticas WDM, sob tráfego dinâmico e considerando as degradações de camada física, foi utilizada neste estudo a técnica de simulação. Para isso, estendemos a ferramenta SimRWA [62], capaz de avaliar o desempenho de redes ópticas WDM comutadas a circuito. A extensão envolveu a modelagem de novos elementos de rede, degradações de camada física e novos algoritmos RWA descritos nos Capítulos 2 e 3.

Um modelo de tráfego dinâmico foi assumido, onde as requisições de estabelecimento de circuitos ópticos são geradas de acordo com um processo Poissoniano com taxa média equivalente a λ . A duração média dos circuitos ópticos respeita uma distribuição exponencial com média equivalente a $1/\mu$. Sendo assim, a carga oferecida à rede é equivalente a λ/μ Erlangs. As requisições de estabelecimento de circuitos ópticos são uniformemente distribuídas entre todos os pares de origem-destino. Todas as simulações foram replicadas 10 vezes com diferentes sementes aleatórias. A cada replicação foram geradas 500.000 requisições de circuitos ópticos. Todos os resultados foram expressos com intervalo de confiança de 95%.

Todas as curvas de probabilidade de bloqueio deste capítulo serão apresentadas em escala logarítmica e escala linear com objetivo de facilitar a análise em distintas regiões de taxa de bloqueio.

O protocolo de roteamento fixo alternativo foi adotado, onde são consideradas as $K = 5$ menores rotas em termos de distância fim a fim. Os algoritmos de alocação de comprimento de onda avaliados foram: RANDOM (RD), FIRST-FIT (FF), C-RP, CIA-FF e CIA-RD.

A Figura 4.1 apresenta as três topologias adotadas neste estudo, com características distintas em termos de número de nós, densidade de enlaces (grau de conectividade) e tamanho médio das rotas de menor caminho. A análise de desempenho dos algoritmos foi realizada em cada uma das topologias, com objetivo de identificar os possíveis impactos causados por suas distintas características no desempenho dos algoritmos avaliados.

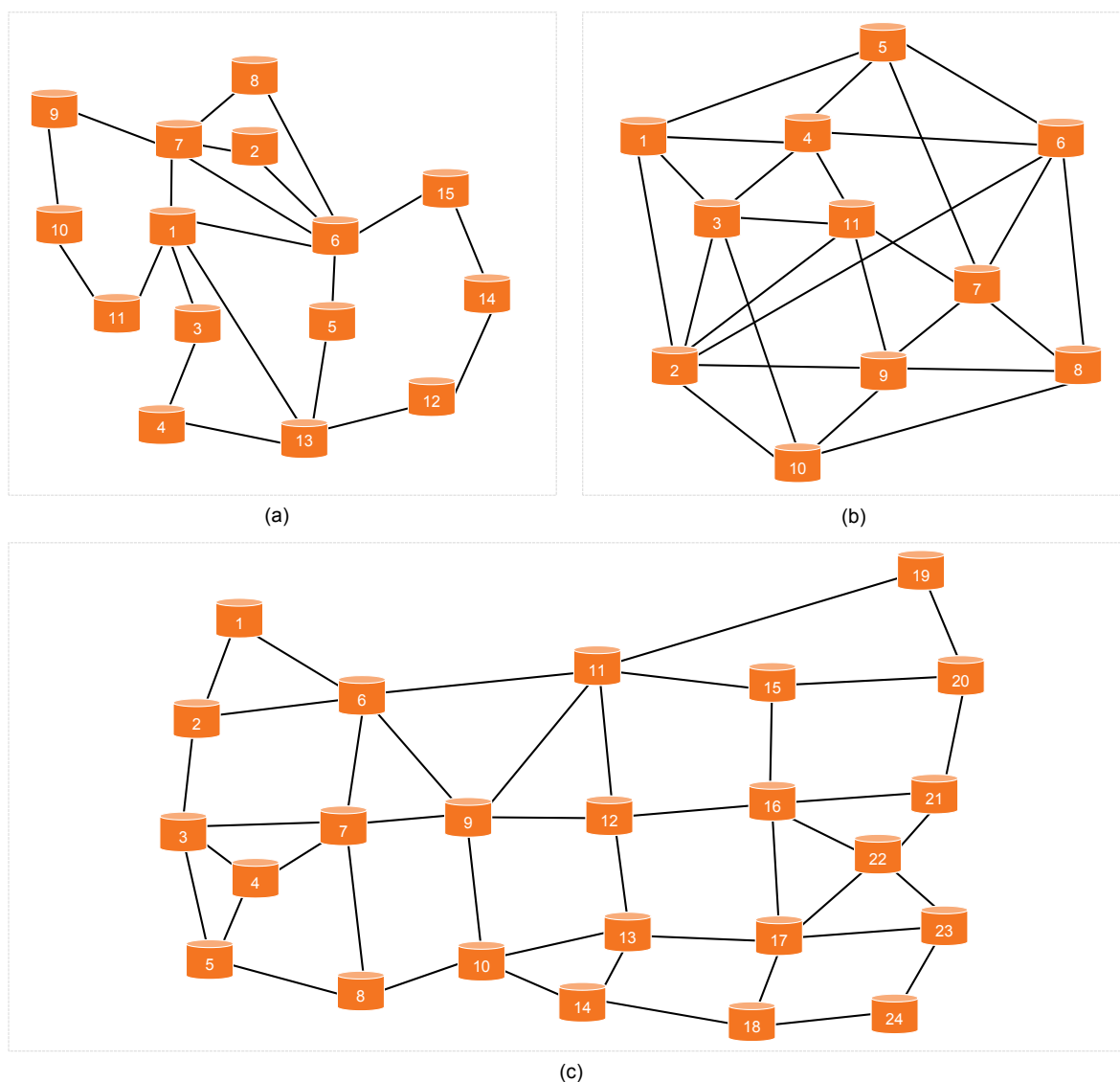


Figura 4.1: Topologias avaliadas: a) Pacific Bell; b) COST239; c) USNet.

A Tabela 4.1 apresenta de forma resumida as principais características das três topologias. Dentre as topologias avaliadas, a COST 239 representa a topologia de menor porte e com a maior densidade de enlaces. A topologia Pacific Bell apresenta um porte ligeiramente maior, porém com a menor densidade de enlaces dentre as três topologias avaliadas. Por último, mas não menos importante, a topologia USNet representa a topologia de maior porte e densidade média de enlaces intermediária em relação às demais topologias avaliadas.

Topologia	Número de Nós	Tamanho Médio das Rotas	Número de Enlaces	Densidade Média de Enlaces por Nó	Comprimento dos Enlaces (Km)
COST 239	11	1,56	26	4,73	160
Pacific Bell	15	2,40	21	2,80	150
USNet	24	3,00	42	3,50	150

Tabela 4.1: Principais características das topologias avaliadas.

Um estudo prévio através de simulações foi realizado para determinar o comprimento dos enlaces de cada topologia. O objetivo foi encontrar valores que nos permitissem explorar regiões de probabilidade de bloqueio em que todos os tipos de bloqueios investigados ocorressem. Se as topologias fossem construídas com enlaces de por exemplo 5 Km, as degradações de camada física seriam irrelevantes e teríamos apenas bloqueios do tipo ACO. Por outro lado, se os enlaces fossem construídos com, por exemplo, 500 Km, teríamos apenas bloqueios originados por degradações de camada física.

Os demais parâmetros relevantes utilizados na modelagem dos elementos de rede são apresentados na Tabela 4.2.

4.1 Impacto das Diferentes Abordagens ao Problema RWA

No Capítulo 3 foram apresentadas as distintas abordagens ao problema RWA, iniciando pela abordagem mais primitiva, onde as degradações de camada física não eram levadas em consideração. Seguida pela abordagem RWA-SIA, onde as degradações de camada física eram levadas em consideração, porém permaneciam estáticas para os circuitos ópticos já estabelecidos na rede. E por último, a abordagem RWA-DIA, que além de considerar as degradações de camada física, leva também em consideração o impacto causado pelos circuitos ópticos estabelecidos e finalizados nos demais ainda ativos na rede. Conforme discutido na Seção 3.2, avaliaremos duas variações da abordagem RWA-DIA neste trabalho. Nesta seção apenas a variação Altruísta da abordagem RWA-DIA será considerada. A variação Egoísta da abordagem RWA-DIA será avaliada ao longo deste capítulo.

Nesta seção pretendemos inicialmente demonstrar o relevante impacto das abordagens ao problema RWA no desempenho dos algoritmos de alocação de comprimento de onda. Vamos investigar também qual a relevância de cada um dos tipos de bloqueio da abordagem RWA-DIA nos algoritmos avaliados. Neste estudo inicial, apenas os algoritmos FF e RD serão avaliados. Pela primeira vez os algoritmos FF e RD serão avaliados considerando a abordagem RWA-DIA com elementos ROADM modelados com tecnologia WSS e arquitetura Broadcast&Select. Embora os dois algoritmos não sejam sensíveis às degradações de camada física, são algoritmos utilizados em larga escala no mercado de comunicações ópticas.

Elemento de Rede	Parâmetros	Valor
Pré Amplificador	Ganho Mínimo	28 dB
	Ganho Máximo	38 dB
	Potência de Saída Máxima	21 dBm
	Potência de Entrada Mínima	-38 dBm
	Figura de Ruído	4,7 dB
<i>Booster</i>	Ganho Mínimo	10 dB
	Ganho Máximo	20 dB
	Potência de Saída Máxima	21 dBm
	Potência de Entrada Mínima	- 20 dBm
	Figura de Ruído	5 dB
MUX/DEMUX	Perda de Inserção	6 dB
	Espaçamento entre Canais	50 GHz
	Frequência Inicial (Grade ITU)	192,10 THz
Fibra Óptica	Coefficiente de Atenuação	0,23 dB/Km
Transponder	Interface de Linha	127,156 Gb/s OTU4v DP-QPSK
	Potência de Transmissão	0 dBm
	Sensibilidade	- 20 dBm
	OSNR de Transmissão	40 dB
	OSNR Mínimo Tolerado	15 dB
	Banda Óptica (Bo)	0,1 nm
Comutador WSS	Perda de Inserção (passthrough)	16 dB
	Perda de Inserção (add)	6 dB
	Perda de Inserção (drop)	10 dB
	Fator de Isolação (mín)	35 dB
	Fator de Isolação (máx)	40 dB

Tabela 4.2: Principais características dos elementos de rede.

A Figura 4.2 apresenta os resultados de simulação para a topologia Pacific Bell, em escala logarítmica em 4.2.(a) e linear em 4.2.(b). Os algoritmos FF e RD foram avaliados nas três distintas abordagens ao problema RWA: RWA-C (RWA Convencional); RWA-SIA; RWA-DIA Altruísta.

A carga de tráfego submetida à topologia foi determinada de tal forma a explorar a região de bloqueio entre 10^{-4} e 10^{-1} . Nesta seção será considerado um fator de isolamento do elemento WSS de 35 dB. Na Figura 4.3 temos a parcela de contribuição de cada tipo de bloqueio (ACO, OIN e OID) para todos os pontos de probabilidade de bloqueio apresentados na Fig.4.2.

Na abordagem RWA Convencional (RWA-C) o algoritmo FF conseguiu superar o desempenho do algoritmo RD em termos de probabilidade de bloqueio. Outros estudos encontrados na literatura já haviam chegado a conclusão que a estratégia de alocação sequencial supera a estratégia de alocação aleatória em termos de probabilidade de bloqueio [17]. Conforme discutido na seção 3, na abordagem

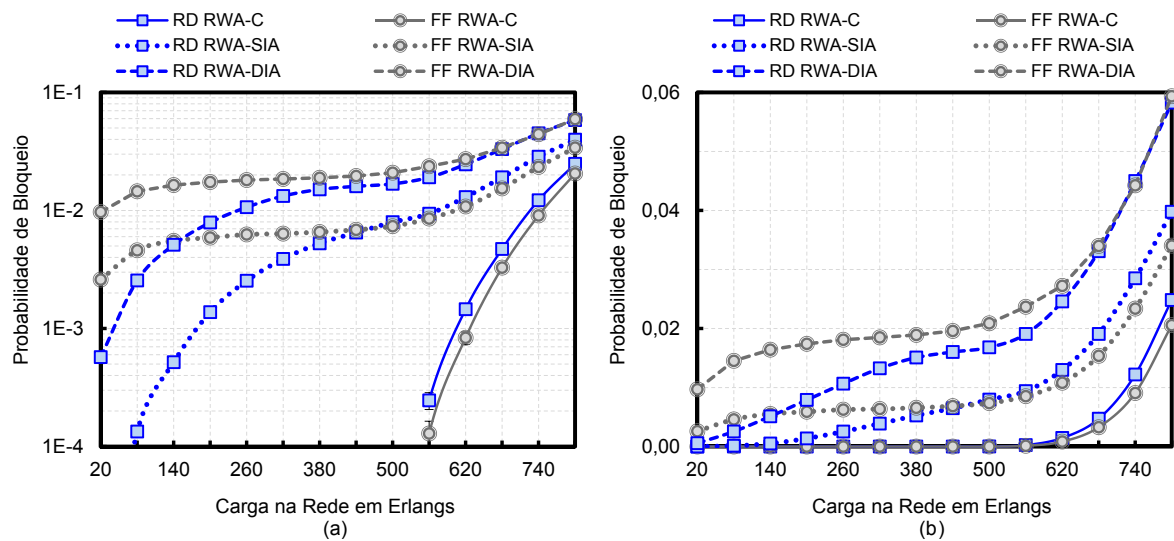


Figura 4.2: Impacto das diferentes abordagens ao problema RWA na Probabilidade de Bloqueio - Topologia Pacific Bell.

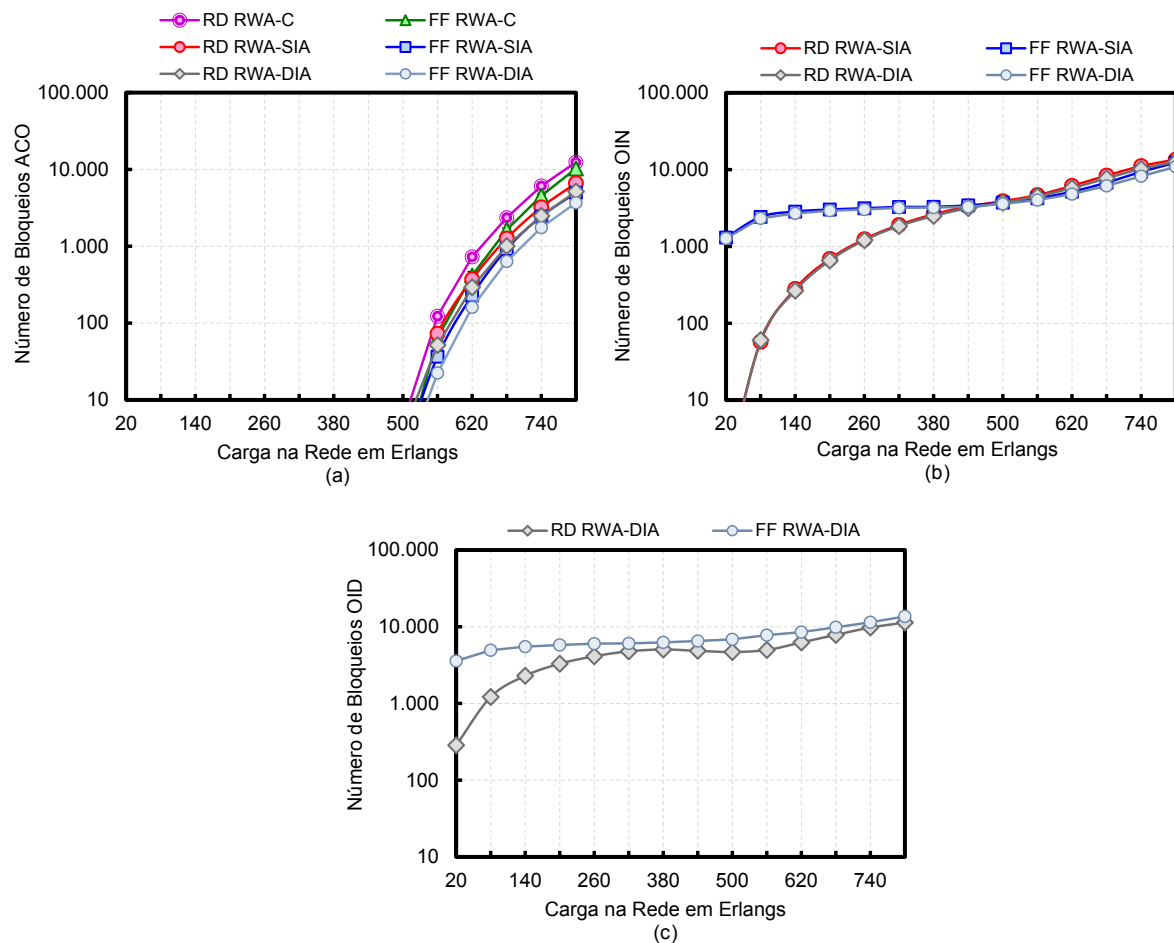


Figura 4.3: Impacto dos diferentes tipos de bloqueio - Topologia Pacific Bell.

RWA-C apenas os bloqueios devido a ausência de comprimento de onda contínuo (ACO) são considerados. Portanto, para os bloqueios do tipo ACO, o algoritmo FF levou vantagem em relação ao algoritmo RD.

Na abordagem RWA-SIA, além dos bloqueios ACO, são considerados os bloqueios devido às condições inadequadas de camada física (OIN). Conforme observado na Fig.4.3.b, os bloqueios do tipo OIN foram bem mais frequentes para o algoritmo FF enquanto a carga na rede permanecia reduzida. Este fato se deve à estratégia de alocação sequencial adotada pelo algoritmo FF. A alocação sequencial favorece a ocorrência de ruído *crossstalk* na rede, mesmo enquanto a carga de tráfego submetida permanece reduzida. Na região entre 20 e 440 Erlangs, a incidência dos bloqueios OIN foi determinante para o algoritmo RD superar o algoritmo FF em termos de probabilidade de bloqueio. Com o aumento da carga na rede, a incidência dos bloqueios OIN para os dois algoritmos se tornou similar, e os bloqueios ACO passaram a ganhar relevância na composição final da probabilidade de bloqueio. Como já era esperado, o algoritmo FF superou o desempenho do algoritmo RD nos bloqueios ACO. A partir de 620 Erlangs, a vantagem do algoritmo FF nos bloqueios ACO foi determinante para superar o desempenho do algoritmo RD na probabilidade de bloqueio na rede.

Na abordagem RWA-DIA temos a influência dos três tipos de bloqueio (ACO, OIN e OID) na composição da probabilidade de bloqueio da rede. Conforme observado na Fig.4.3, os bloqueios OID foram os mais relevantes na abordagem RWA-DIA ao longo de toda a extensão de carga submetida à rede. Novamente o algoritmo FF teve o seu desempenho prejudicado devido a sua estratégia de alocação sequencial de comprimento de onda. Devido a maior incidência de *crossstalk* na rede, maior foi o volume de circuitos frágeis em termos de OSNR estabelecidos na rede. Os circuitos frágeis em termos de OSNR estabelecidos na rede favorecem os bloqueios OID, pois eles não toleram novas degradações eventualmente ocasionadas pelo estabelecimento de novos circuitos. Os bloqueios OID foram determinantes para o algoritmo RD superar o algoritmo FF em termos de probabilidade de bloqueio em toda a extensão de carga avaliada.

Com o aumento contínuo da carga submetida à rede, naturalmente os bloqueios ACO tornariam-se os mais relevantes. Esta conclusão deve-se ao fato de que os bloqueios OIN e OID só ocorrem, se houver, ao menos, um comprimento de onda disponível fim a fim (vide Fig.3.1). Consequentemente, com o aumento contínuo de carga, os algoritmos de alocação de comprimento de onda com melhor performance sobre os bloqueios ACO, tendem a superar os demais algoritmos em termos de probabilidade de bloqueio na rede. Na prática, as redes ópticas de transporte comutadas a circuito não operam com altas taxas de bloqueio. E portanto, vamos concentrar os estudos em regiões com taxas de bloqueio inferiores a $1E-1$.

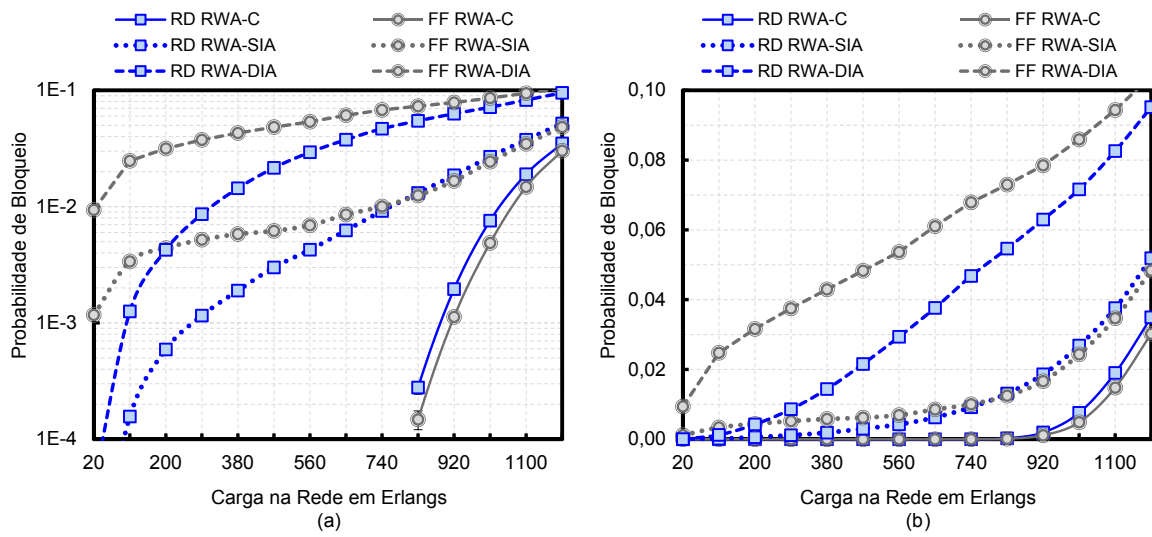


Figura 4.4: Impacto das diferentes abordagens ao problema RWA na Probabilidade de Bloqueio - Topologia USNet.

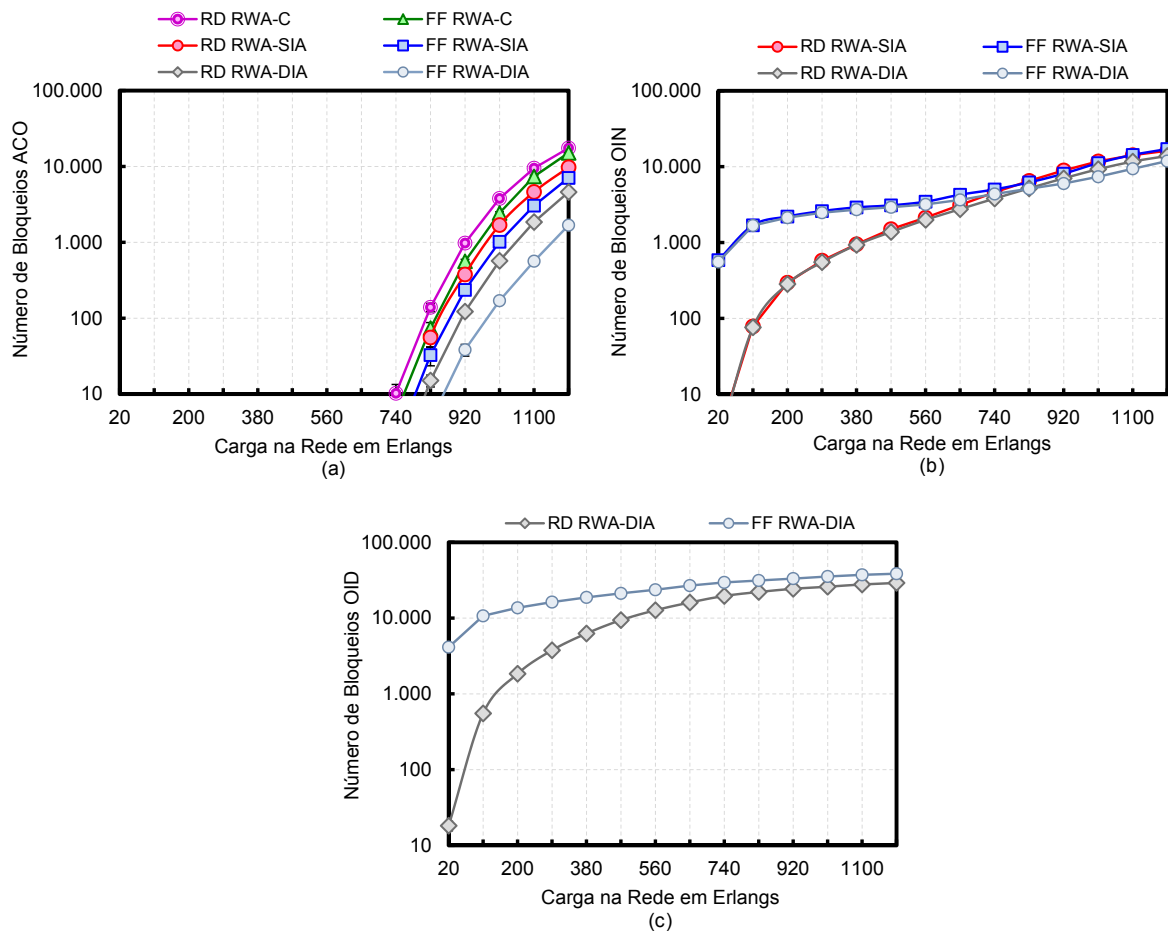


Figura 4.5: Impacto dos diferentes tipos de bloqueio - Topologia USNet.

O estudo sobre o impacto das diferentes abordagens ao problema RWA no desempenho dos algoritmos FF e RD foi novamente conduzido, desta vez considerando a topologia USNet. A Figura 4.4 apresenta os resultados em termos de probabilidade de bloqueio, enquanto na Figura 4.5 são apresentadas as contribuições de cada tipo de bloqueio para todos os pontos de probabilidade de bloqueio observados na Fig.4.4.

Novamente observamos o algoritmo FF superar o RD no desempenho em termos de probabilidade de bloqueio na rede para a abordagem RWA-C. Com a introdução dos bloqueios OIN da abordagem RWA-SIA, o algoritmo RD superou o FF na região de carga reduzida. Com o aumento da carga, o FF retomou a liderança devido ao aumento de relevância dos bloqueios ACO. Na abordagem RWA-DIA, novamente vemos o algoritmo RD superar o FF em toda a extensão de carga avaliada devido a grande relevância dos bloqueios OID. Portanto, mesmo para uma topologia de maior porte e com rotas maiores, os resultados foram similares aos obtidos com a topologia Pacific Bell.

Na topologia COST239, a terceira a ser avaliada, tivemos resultados novamente similares. De acordo com resultados apresentados na Figura 4.6, a única diferença significativa observada foi a vantagem do algoritmo RD frente ao FF na abordagem RWA-SIA. Nas demais topologias, o algoritmo FF havia superado o RD em regiões com alta carga de tráfego devido a grande relevância dos bloqueios ACO nesta região. Podemos observar na Figura 4.7 que os bloqueios do tipo ACO foram os de menor relevância, mesmo em regiões de alta carga. Se comparada as demais topologias, a COST239 apresenta a maior densidade de enlaces e o menor número de nós. Estas características refletem em uma maior disponibilidade de rotas de tamanho reduzido, e consequentemente, maior disponibilidade de comprimentos de onda contínuos.

Nesta seção pudemos observar o relevante impacto das diferentes abordagens ao problema RWA no desempenho das redes ópticas. Os bloqueios OID da abordagem RWA-DIA foram avaliados pela primeira vez neste estudo, e comprovaram comprometer de forma significativa o desempenho das redes ópticas. Além disso, o algoritmo RD demonstrou lidar melhor com os bloqueios OID no comparativo com o algoritmo FF. De uma forma geral, na evolução da abordagem RWA-SIA para a abordagem RWA-DIA foi possível notar que o algoritmo RD abriu uma vantagem ainda maior em relação ao algoritmo FF no desafio de minimizar a probabilidade de bloqueios na rede.

Nas próximas seções iremos concentrar o estudo nas abordagens RWA-DIA Altruísta e Egoísta e explorar novos algoritmos de alocação de comprimento de onda sensíveis às degradações de camada física.

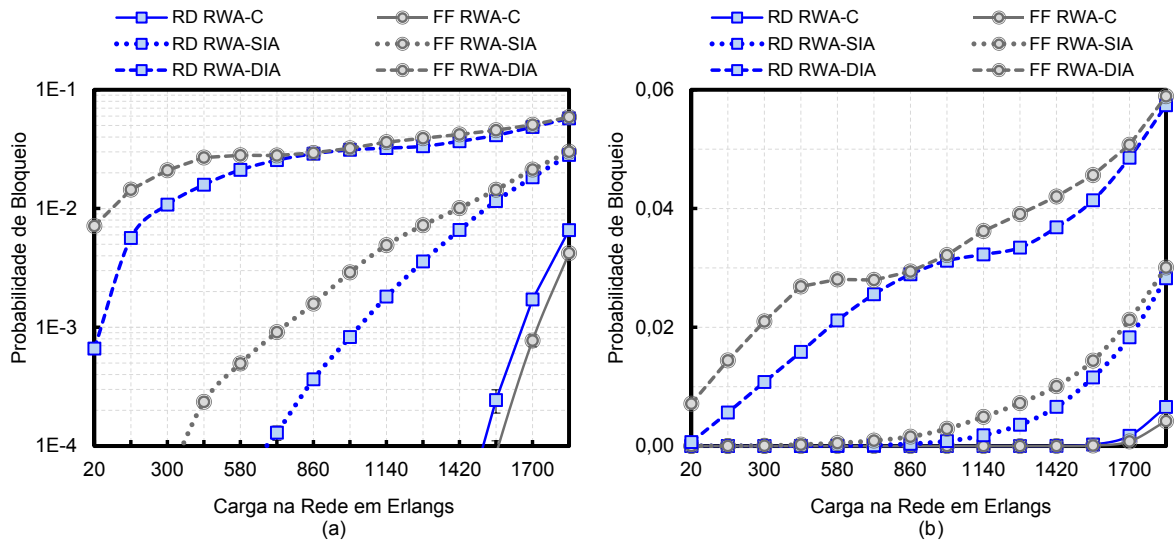


Figura 4.6: Impacto das diferentes abordagens ao problema RWA na Probabilidade de Bloqueio - Topologia COST 239.

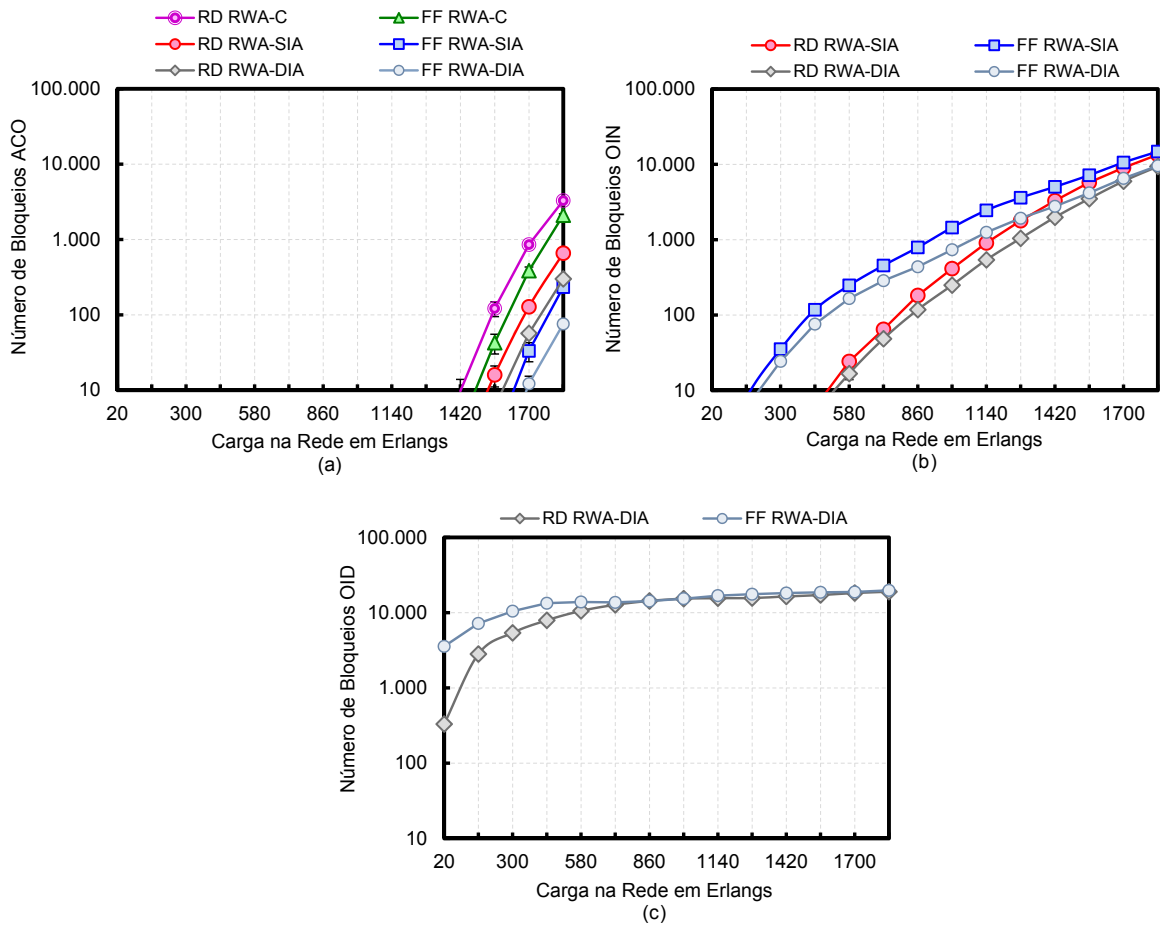


Figura 4.7: Impacto dos diferentes tipos de bloqueio - Topologia COST 239.

4.2 Resultados para a Abordagem RWA-DIA Altruísta

Nesta seção investigaremos o desempenho dos algoritmos sensíveis às degradações de camada física, além dos algoritmos FF e RD, considerando a abordagem RWA-DIA Altruísta. Para cada topologia investigada, iremos considerar dois valores típicos para o fator de isolamento do elemento WSS: 35 dB e 40 dB. Estes são os valores típicos encontrados no mercado a depender da tecnologia empregada para construção do elemento WSS. O fator de isolamento possui uma forte influência no volume de *crosstalk* gerado na rede, e conseqüentemente, impacto no desempenho da rede devido aos bloqueios de camada física (OIN e OID).

4.2.1 Pacific Bell

Fator de Isolação de 40 dB

A Figura 4.8 apresenta a probabilidade de bloqueio encontrada para a topologia Pacific Bell, em escala logarítmica em 4.8.(a) e linear em 4.8.(b). Avaliamos o desempenho do algoritmo C-RP, duas variações do algoritmo CIA, além dos algoritmos FF e RD.

Nas Figuras 4.9.(a), 4.9.(b) e 4.9.(c) temos as contribuições dos bloqueios ACO, OIN e OID para composição de todos os pontos de probabilidade de bloqueio apresentados na Fig.4.8.

Por último, na Fig.4.9.(d), temos o número médio de componentes de *crosstalk* em circuitos ópticos já estabelecidos na rede. Para computar o número médio de componentes de *crosstalk*, o simulador contabiliza o número de vezes que os circuitos ativos tiveram o seu OSNR degradado devido o estabelecimento de novas conexões. Ao final, temos uma média do número de vezes que um circuito óptico estabelecido teve o seu OSNR degradado após o seu estabelecimento na rede. Se tivermos, por exemplo, uma média equivalente a 1,00, significa que todos os circuitos ópticos ativos, tiveram, em média, uma nova degradação de OSNR enquanto permaneceram ativas.

Na Fig.4.8 é possível observar que os algoritmos sensíveis às degradações de camada física (C-RP e CIA) conseguiram uma larga vantagem em relação aos algoritmos FF e RD na redução da probabilidade de bloqueio da rede. Os algoritmos FF e RD foram concebidos com objetivo de minimizar apenas os bloqueios do tipo ACO. Conforme demonstrado na Fig.4.9, o algoritmo FF obteve o melhor desempenho dentre os cinco algoritmos avaliados nos bloqueios ACO. No entanto, os bloqueios do tipo ACO foram os de menor relevância para a composição final da probabilidade de bloqueio da rede. Ainda de acordo com os resultados apresentados na Fig.4.9, para todos os algoritmos avaliados, com exceção dos algoritmos CIA, os bloqueios OID foram os mais relevantes para a composição da probabilidade de bloqueio.

O algoritmo CIA foi concebido justamente com objetivo de minimizar os bloqueios OID ao

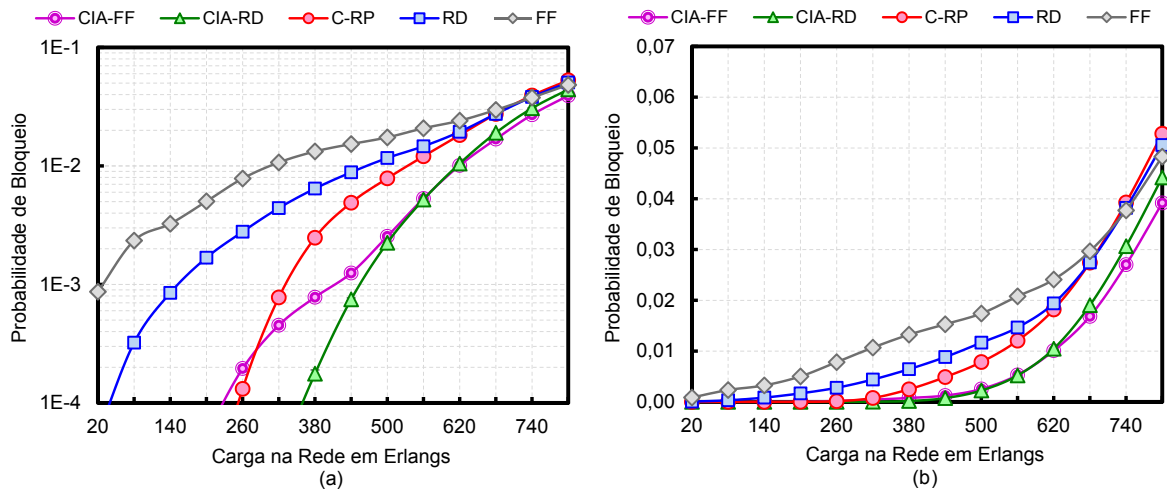


Figura 4.8: Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 40 dB.

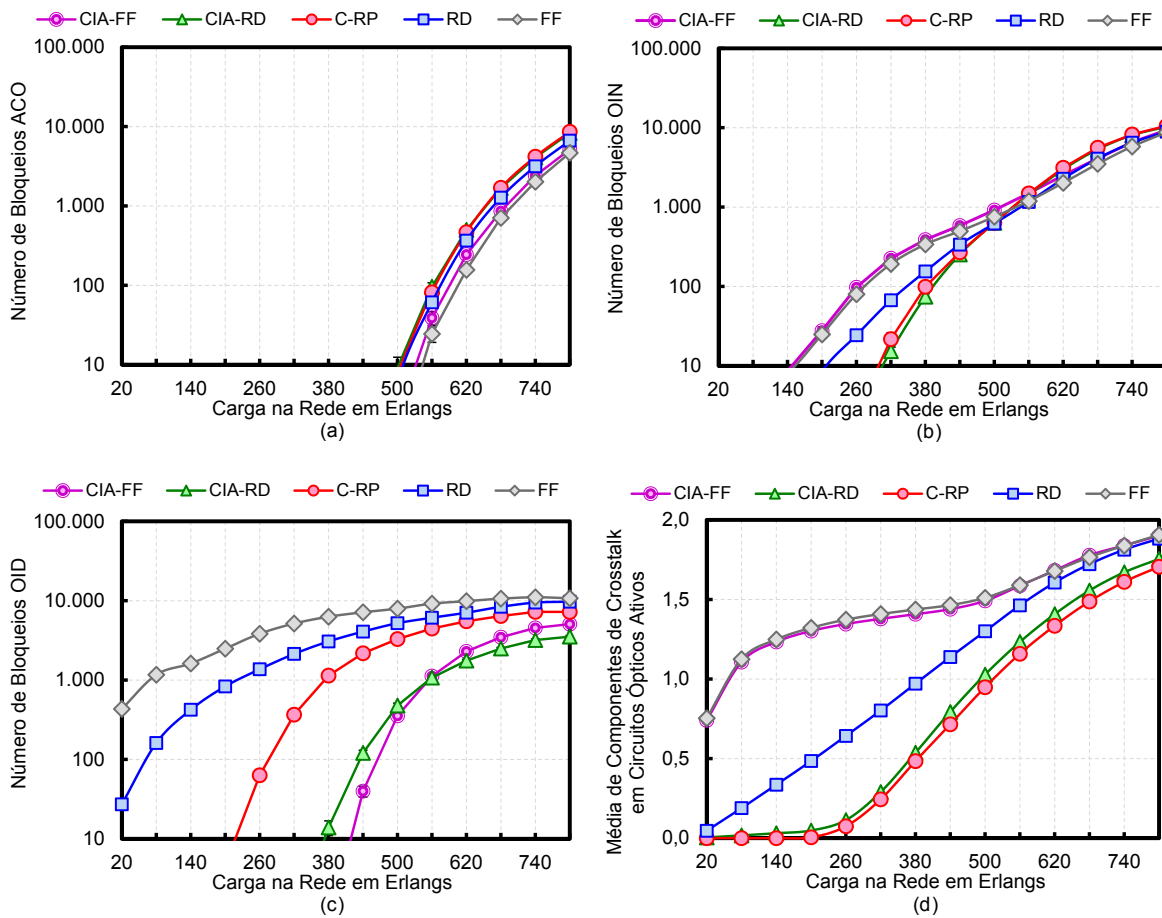


Figura 4.9: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolação = 40 dB.

evitar novas degradações nos circuitos ópticos mais frágeis em termos de OSNR da rede. Ao minimizar os bloqueios mais relevantes para a composição da probabilidade de bloqueio, esperávamos superar o desempenho dos demais algoritmos no desafio de minimizar a probabilidade de bloqueio de circuitos ópticos na rede. As Figs. 4.9.c) e 4.8 comprovam que o objetivo foi alcançado.

Dado um conjunto de comprimentos de onda disponíveis para o estabelecimento de um novo circuito óptico, a estratégia do algoritmo C-RP é selecionar o comprimento de onda que irá gerar *crossstalk* no menor número de circuitos ativos. Um dos parâmetros avaliados em nosso estudo foi justamente o número médio de circuitos ópticos que sofreram novas degradações após o seu estabelecimento na rede. Os resultados foram apresentados na Fig.4.9.d) e comprovaram que o algoritmo C-RP cumpriu com êxito o seu objetivo. Dentre os cinco algoritmos avaliados, teve sempre o melhor desempenho neste parâmetro. No entanto, os resultados também comprovaram que esta estratégia não foi suficiente para alcançar o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio.

Comparando as estratégias adotadas pelos algoritmos C-RP e CIA-RD, chegamos a conclusão que não adianta simplesmente reduzir o número de circuitos ópticos degradados, e sim, evitar novas degradações nos mais frágeis. A Fig.4.9 demonstra que um número maior de circuitos ópticos foram degradados quando utilizados os algoritmos CIA em comparação com o algoritmo C-RP. Ou seja, degradar mais circuitos ópticos em prol de evitar novas degradações nos mais frágeis demonstrou ser uma estratégia promissora para reduzir a probabilidade de bloqueio na rede.

Na análise entre os algoritmos CIA-FF e CIA-RD, percebemos na Fig.4.8 que na região de menor carga de tráfego, onde os bloqueios OID predominam, o algoritmo CIA-RD teve melhor desempenho. Nesta região de baixa carga, há uma combinação de dois fatores que prejudicam o desempenho do algoritmo CIA-FF: alta disponibilidade de comprimentos de onda e número reduzido de componentes de *crossstalk*. Esta combinação de fatores influencia o constante uso do critério de desempate do algoritmo CIA-FF. Neste caso, os empates ocorrem pois vários comprimentos de onda disponíveis possuem o *InterferenceFactor* = 0. Ou seja, comprimentos de onda que estão disponíveis e, que se alocados, não degradariam circuitos já ativos. Desta forma, nesta região de carga na rede o algoritmo CIA-FF tem um desempenho bastante similar ao algoritmo FF. As curvas apresentadas nas Figs.4.8 e 4.9.(d) corroboram com esta conclusão.

Na Fig.4.9.(d) é possível observar o significativo impacto da alteração da política de desempate do algoritmo CIA no número médio de circuitos degradados, e consequentemente no desempenho em termos de probabilidade de bloqueio.

Com o aumento da carga na rede, os bloqueios do tipo ACO passam a ser mais significativos, e o critério de desempate FF passa a ser mais vantajoso em relação ao RD devido ao seu melhor desempenho com este tipo de bloqueio, conforme visto na seção 3.2.

Fator de Isolação de 35 dB

Após uma redução de 5 dB no fator de isolamento dos elementos WSS, vamos novamente comparar o desempenho dos algoritmos de alocação de comprimento de onda e verificar os impactos causados pelo maior acúmulo de *crosstalk* na rede.

A Figura 4.10 apresenta o resultado de simulação com as curvas de probabilidade de bloqueio, enquanto a Figura 4.11 detalha a origem dos bloqueios e a média de componentes de *crosstalk* dos circuitos ativos.

Se comparados aos resultados obtidos com o fator de isolamento de 40 dB, neste novo cenário identificamos um impacto ainda maior dos bloqueios do tipo OIN e OID em relação aos bloqueios ACO na composição da probabilidade de bloqueio. Este resultado era de certa forma esperado pois o volume de *crosstalk* gerado na rede aumentou com a redução do fator de isolamento dos elementos WSS. Os algoritmos FF e CIA-FF foram os mais prejudicados com a redução do fator de isolamento enquanto a carga na rede permaneceu baixa, pois são algoritmos que de certa forma estimulam o *crosstalk* ao adotarem estratégias de alocação sequencial de comprimento de onda.

No comparativo entre os algoritmos CIA-RD e C-RP, até 200 Erlangs de carga de tráfego, o desempenho de ambos os algoritmos foi bastante similar. Ambos conseguiram controlar os bloqueios OID e tiveram desempenho similar nos bloqueios OIN. A partir de 200 Erlangs de carga de tráfego submetida à topologia Pacific Bell, o algoritmo CIA-RD passou a superar o desempenho do algoritmo C-RP na probabilidade de bloqueio da rede, principalmente devido a vantagem obtida nos bloqueios OID.

Após a carga de tráfego na rede ultrapassar 500 Erlangs, todos os algoritmos passaram a conviver com os bloqueios ACO. Ainda nesta região onde a carga de tráfego atingiu 500 Erlangs, observamos também que os algoritmos FF e CIA-FF passaram de uma posição desfavorável em relação aos bloqueios OIN para uma posição de liderança. No cenário de simulação anterior, com fator de isolamento de 40 dB, tivemos uma repetição deste fato. Através das Figs.4.9 e 4.11 é possível notar que na mesma região de carga de tráfego onde os bloqueios ACO começaram a surgir, o desempenho dos algoritmos FF e CIA-FF também passaram a superar os demais algoritmos em relação aos bloqueios OID. Estes resultados nos motivaram a investigar se haveria alguma relação entre o surgimento dos bloqueios ACO na rede e a melhora de desempenho dos algoritmos FF e CIA-FF frente aos demais em relação aos bloqueios OIN.

Após investigarmos diversas métricas de desempenho dos algoritmos ao longo das simulações, chegamos a conclusão que haveria sim uma correlação entre os fatos. Independente do algoritmo de alocação de comprimento de onda avaliado, enquanto a rede trabalha com baixa carga de tráfego e sem bloqueios do tipo ACO, os circuitos ópticos são estabelecidos, em sua grande maioria, através das

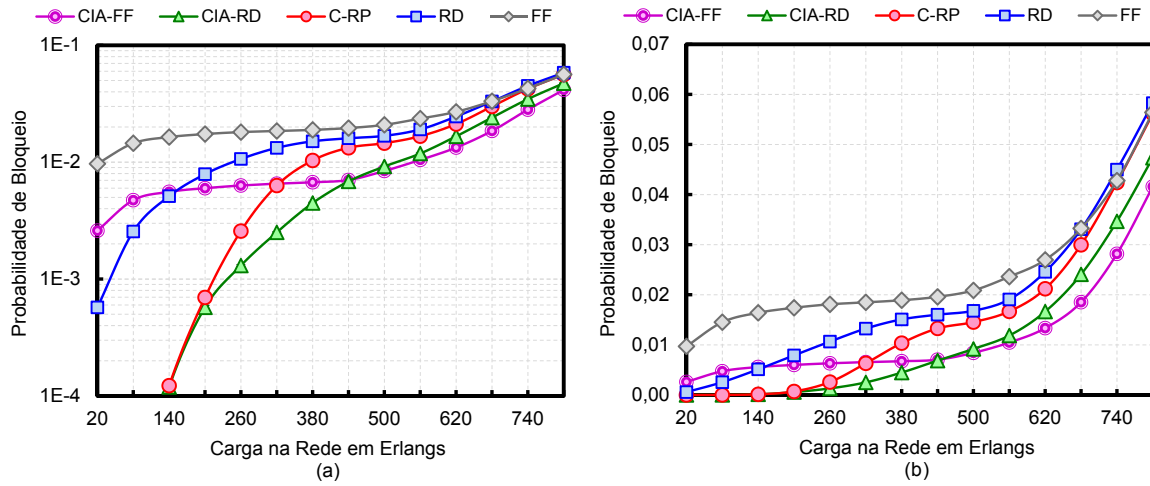


Figura 4.10: Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolção = 35 dB.

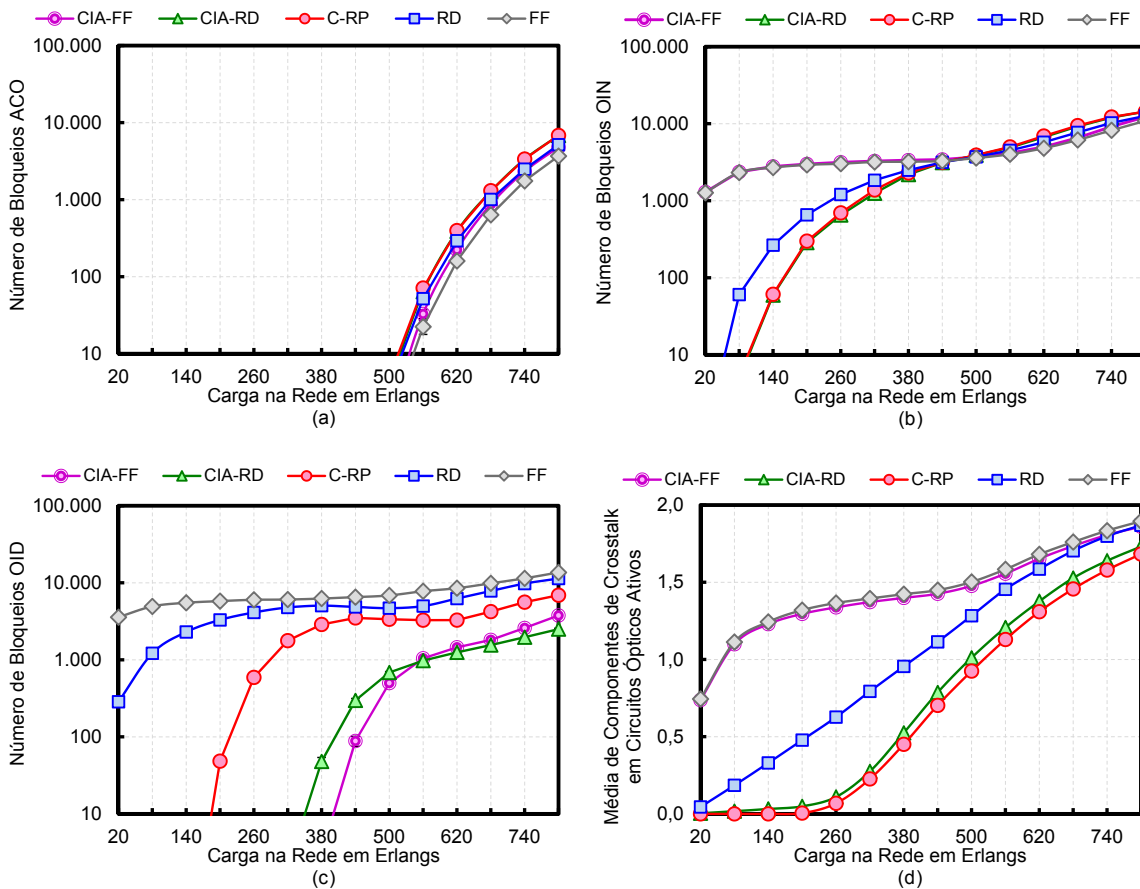


Figura 4.11: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolção = 35 dB.

rotas mais curtas. Este é o comportamento esperado quando utiliza-se a estratégia do roteamento fixo alternativo. À medida em que a carga na rede aumenta, o número de comprimentos de onda disponíveis se torna cada vez mais escasso, até o ponto em que o algoritmo de roteamento não consegue mais utilizar as rotas de menor caminho e passa a explorar rotas alternativas, possivelmente mais longas. Com o aumento do tamanho médio dos circuitos ópticos estabelecidos, o acúmulo de degradações de camada física aumenta, e a probabilidade de bloqueio do circuito devido às condições inadequadas de camada física (OIN) também aumenta. Se a carga na rede permanecer aumentando, o algoritmo de roteamento fixo alternativo passará a ter dificuldade de encontrar recursos disponíveis mesmo nas rotas alternativas. Neste momento começarão a incidir os bloqueios do tipo ACO.

Portanto, com o aumento da carga de tráfego submetida à rede, os algoritmos que apresentem pior desempenho com os bloqueios do tipo ACO serão os primeiros a serem prejudicados devido ao crescimento da taxa de bloqueios OIN.

Retomando a discussão dos resultados de simulação, pudemos observar que os algoritmos FF e CIA-FF se destacaram no desempenho em relação aos bloqueios ACO, e passaram a liderar o desempenho nos bloqueios OIN após a carga de tráfego submetida à rede alcançar níveis próximos à região de carga onde a incidência de bloqueios ACO começou a ser observada.

Levando em consideração a somatória de todos os tipos de bloqueio, os algoritmos CIA-FF e CIA-RD propostos neste trabalho obtiveram os melhores resultados. O critério de desempate RD foi mais eficiente nas regiões de baixa carga, e o CIA-FF passou a ser mais eficiente quando a carga na rede atingiu a região dos bloqueios ACO.

Mesmo com a redução do fator de isolamento, os algoritmos CIA permaneceram com ampla vantagem em relação aos demais avaliados. Novamente, como esperado, o C-RP obteve o melhor desempenho em termos de número médio de circuitos ópticos degradados. No entanto, voltamos a comprovar que o melhor desempenho neste parâmetro não significa melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio.

A seguir serão apresentados estudos realizados com outras duas topologias com objetivo de tentar encontrar características nas topologias que possam influenciar os resultados e conclusões obtidas até aqui.

4.2.2 USNet

Fator de Isolamento de 40 dB

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os resultados de simulação para a topologia USNet levando em consideração um fator de isolamento nos módulos WSS de 40 dB. Dentre as topologias avaliadas, a USNet se destaca pelo seu grande porte. Foi a topologia com maior número de nós dentre as avaliadas.

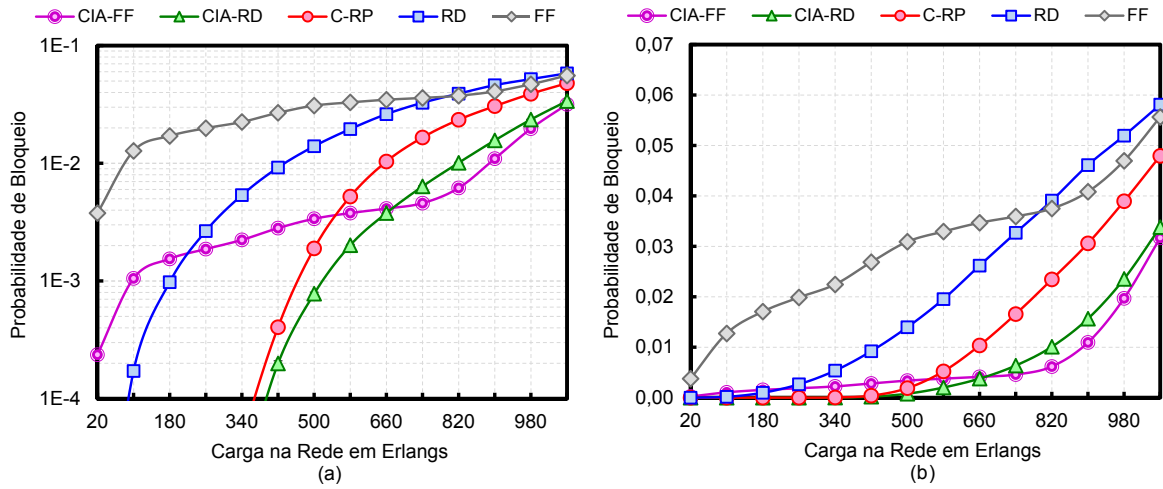


Figura 4.12: Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolaco = 40 dB.

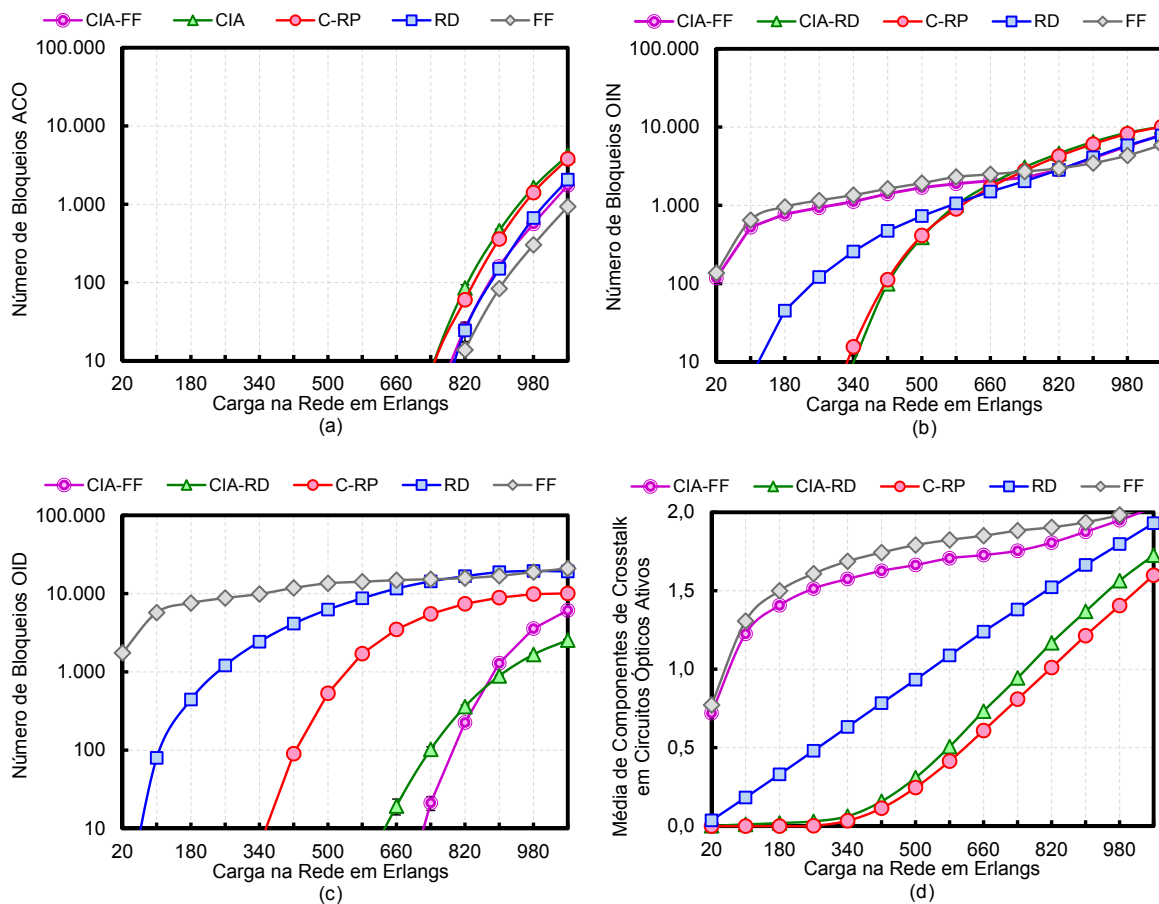


Figura 4.13: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolaco = 40 dB.

Além disso, o tamanho médio das rotas da topologia também foi o maior dentre as avaliadas.

O desempenho dos algoritmos CIA voltaram a superar os demais algoritmos avaliados em termos de probabilidade de bloqueio. Na avaliação dos tipos de bloqueio que influenciaram o desempenho dos algoritmos, pudemos observar novamente a maior relevância dos bloqueios OID para os algoritmos FF, RD e C-RP. Os algoritmos CIA-FF e CIA-RD conseguiram mitigar de forma significativa os bloqueios do tipo OID, fator determinante para superarem os demais algoritmos avaliados na probabilidade de bloqueio de novos circuitos.

Se comparados os resultados obtidos para as topologias Pacific Bell e USNet, com fator de isolamento de 40 dB, é possível observar que os bloqueios OIN tiveram maior relevância na topologia USNet. Devido ao maior comprimento dos circuitos ópticos na topologia USNet, as degradações foram acumuladas com maior intensidade. Com o maior acúmulo de degradações de camada física nos circuitos de maior comprimento, os bloqueios OIN tiveram maior relevância na topologia USNet.

No comparativo entre os algoritmos CIA-FF e CIA-RD foi possível notar novamente a vantagem do critério de desempate RD nas regiões de baixa carga de tráfego. Assim como na topologia Pacific Bell, o critério de desempate FF voltou a demonstrar vantagem em regiões de maior carga. Observamos mais uma vez uma correlação entre o surgimento dos bloqueios ACO com a melhora de desempenho dos algoritmos FF e CIA-FF frente aos demais nos bloqueios OIN.

O algoritmo C-RP comprovou novamente a sua eficiência em reduzir o número de circuitos ópticos degradados. Ao longo de toda a extensão de carga na rede avaliada, o algoritmo C-RP manteve a liderança no quesito circuitos ópticos impactados pelo estabelecimento de novos circuitos. No entanto, mais uma vez a estratégia não mostrou-se eficaz para redução da probabilidade de bloqueios na rede. Mesmo o algoritmo CIA convivendo com um número maior de circuitos ópticos degradados na rede, a sua estratégia de reduzir o volume de circuitos frágeis na rede do ponto de vista de margem de OSNR mostrou-se mais eficiente para redução de bloqueio na rede.

Fator de Isolamento de 35 dB

Conforme observado nas Figuras 4.14 e 4.15, com a redução do fator de isolamento de 40 dB para 35 dB a incidência de bloqueios devido às condições inadequadas de camada física aumentou significativamente. Os bloqueios OID foram novamente os mais relevantes para os algoritmos FF e RD. Para os algoritmos C-RP, CIA-FF e CIA-RD os bloqueios OIN foram os mais relevantes, seguido de perto pelos bloqueios OID.

Se comparados estes resultados aos obtidos com a topologia Pacific Bell, é possível observar a maior relevância dos bloqueios OIN com o aumento do porte da topologia. Ainda assim, praticamente não tivemos impacto no comparativo entre o desempenho dos algoritmos avaliados.

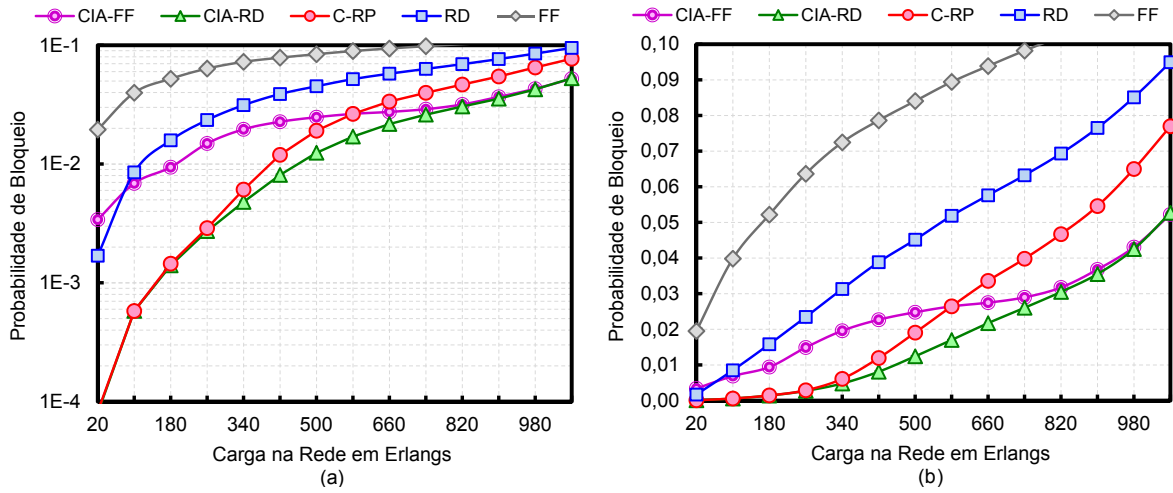


Figura 4.14: Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolção = 35 dB.

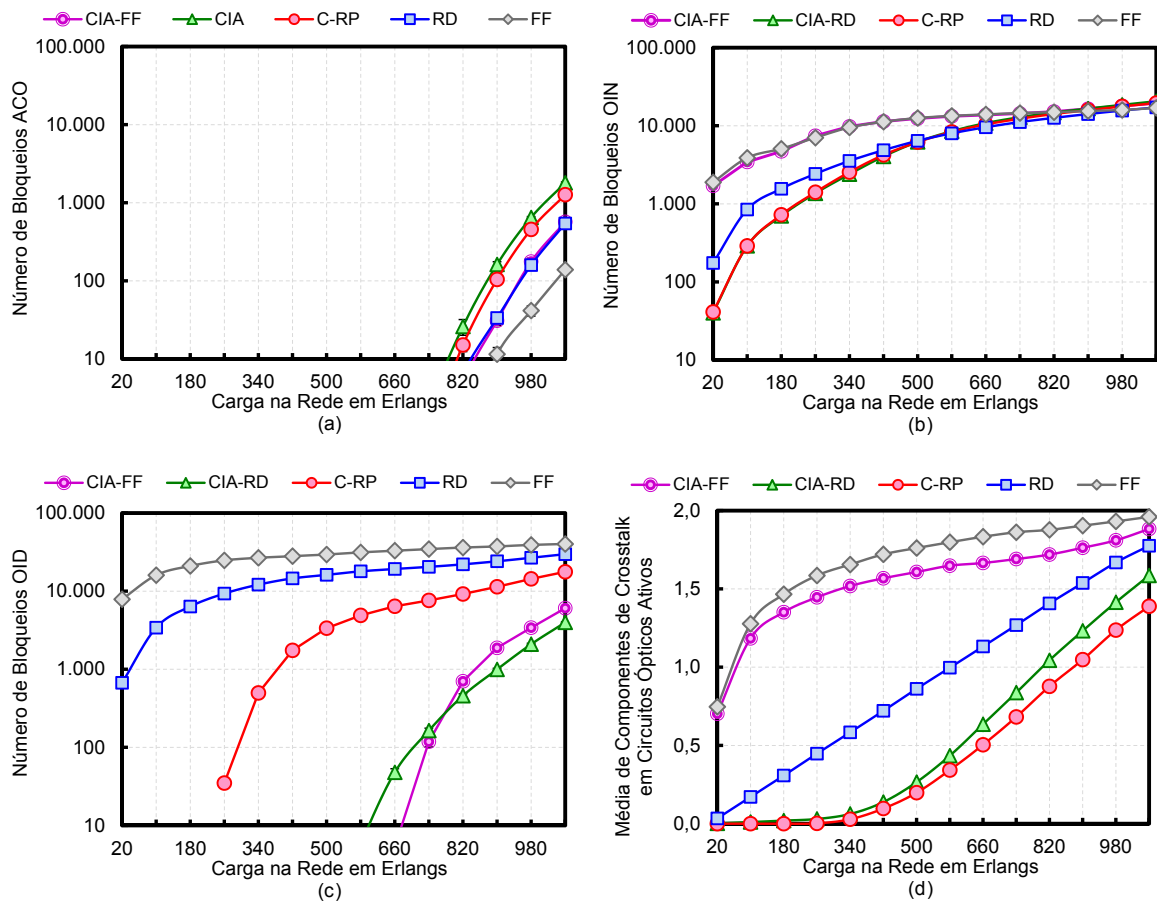


Figura 4.15: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolção = 35 dB.

4.2.3 COST 239

Fator de Isolação de 40 dB

Por último consideramos a topologia COST 239 na avaliação de desempenho dos algoritmos. Dentre as topologias avaliadas, a COST 239 possui a maior densidade de enlaces por nó, o menor número de nós e o menor tamanho médio de rotas. As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os resultados de simulação para a topologia COST 239.

De acordo com as Fig.4.16 e 4.17 foi possível observar um grau de competitividade acirrado entre os algoritmos FF, RD e C-RP. Se comparados aos resultados obtidos com as demais topologias, a diferença de desempenho entre estes algoritmos foi bastante reduzida. O algoritmo C-RP que já havia demonstrado grande superioridade em relação aos algoritmos FF e RD no desafio de reduzir a probabilidade de bloqueio dos circuitos, agora teve um desempenho bastante similar aos seus concorrentes não sensíveis às degradações de camada física.

Por outro lado, ambos os algoritmos CIA demonstraram forte superioridade em relação aos demais algoritmos avaliados. Se observados com atenção os resultados apresentados na Fig.4.17, será possível notar a grande superioridade dos bloqueios OID na composição da probabilidade de bloqueio da rede. Dentre as topologias avaliadas, a COST 239 foi a topologia que apresentou o menor peso para os bloqueios ACO e OIN na composição da probabilidade de bloqueio da rede. Os bloqueios ACO foram reduzidos devido ao pequeno porte e ao elevado grau de conectividade da rede, favorecendo a disponibilidade de comprimentos de onda. Em segundo, os bloqueios OIN foram pouco significativos por conta do tamanho médio reduzido das rotas.

A topologia COST 239 também minimizou, de uma forma geral, o número médio de novas componentes de *crossstalk* nos circuitos ópticos já estabelecidos na rede. Conforme observado na Fig.4.17.d), independente do algoritmo utilizado, o número médio não ultrapassou 1,20. O principal fator para essa redução no número médio de componentes de *crossstalk* nos circuitos ópticos estabelecidos foi o reduzido tamanho médio das rotas da topologia COST 239. Com rotas menores, o número de interseções entre rotas ativas é reduzido, e conseqüentemente o número de componentes de *crossstalk*.

Fator de Isolação de 35 dB

A redução do fator de isolamento de 40 dB para 35 dB, conforme visto anteriormente, favorece o acúmulo de *crossstalk* na rede, e conseqüentemente favorece o aumento dos bloqueios do tipo OIN e OID. As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados de simulação para a topologia COST 239 com Fator de Isolação de 35 dB.

Conforme esperado, a redução do fator de isolamento influenciou um crescimento do número de bloqueios OIN e OID. O número de bloqueios ACO permaneceu com pouca expressão neste cenário.

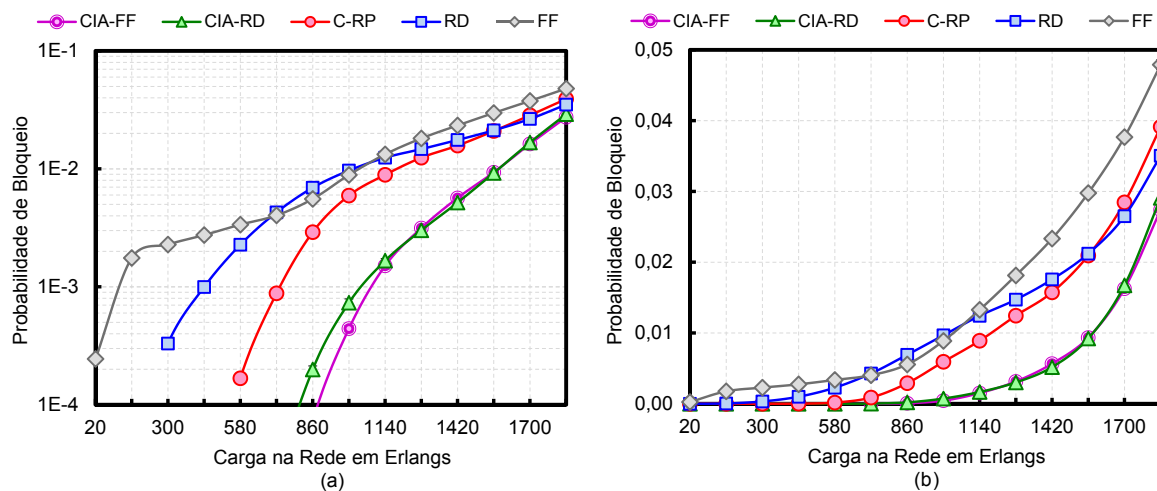


Figura 4.16: Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolção = 40 dB.

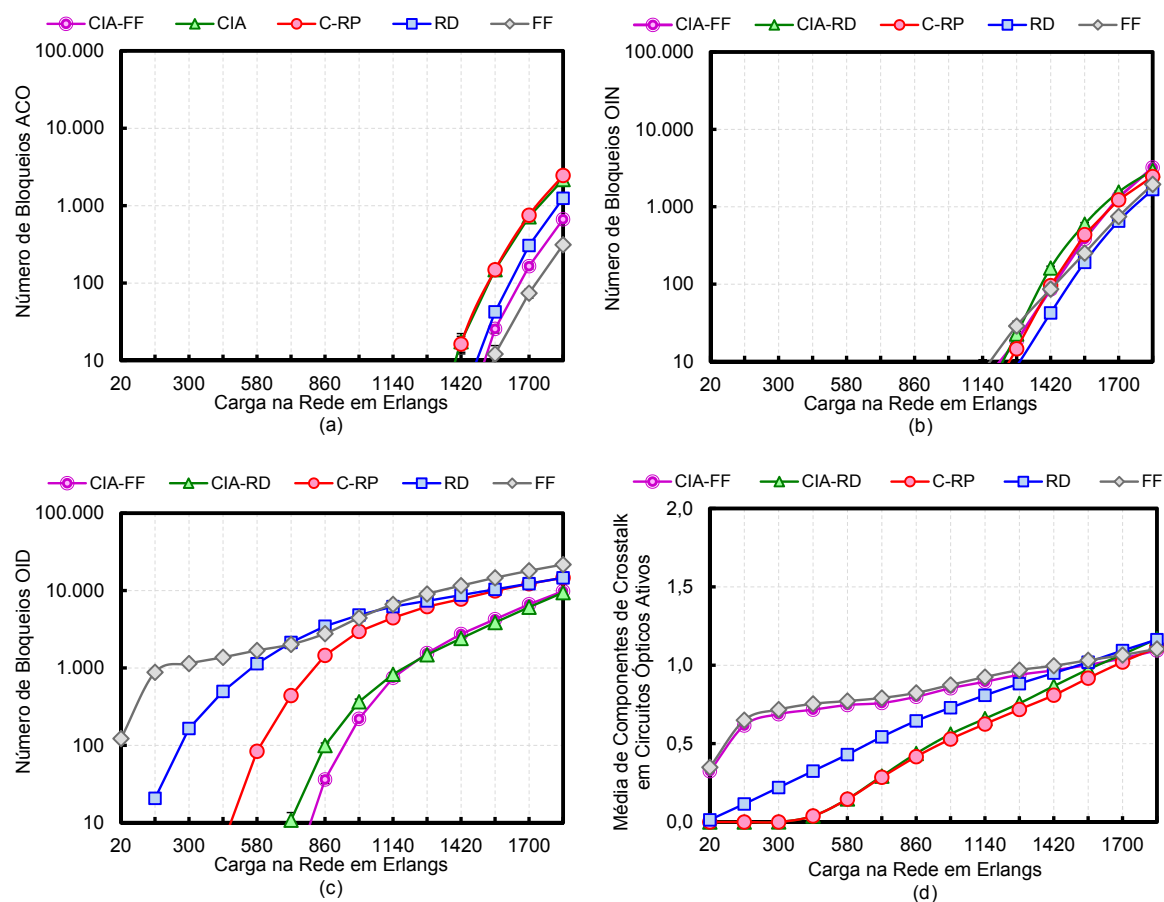


Figura 4.17: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolção = 40 dB.

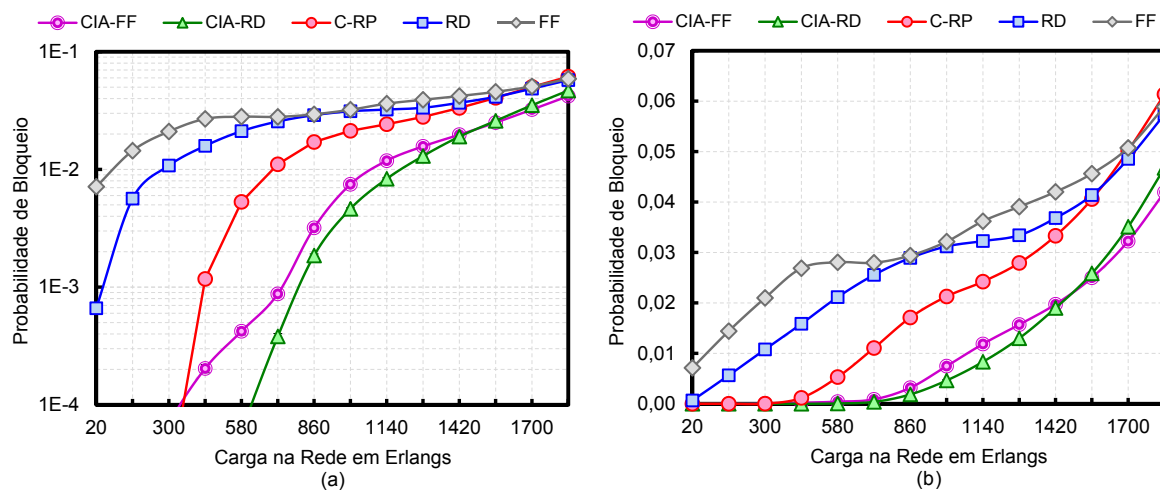


Figura 4.18: Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolção = 35 dB.

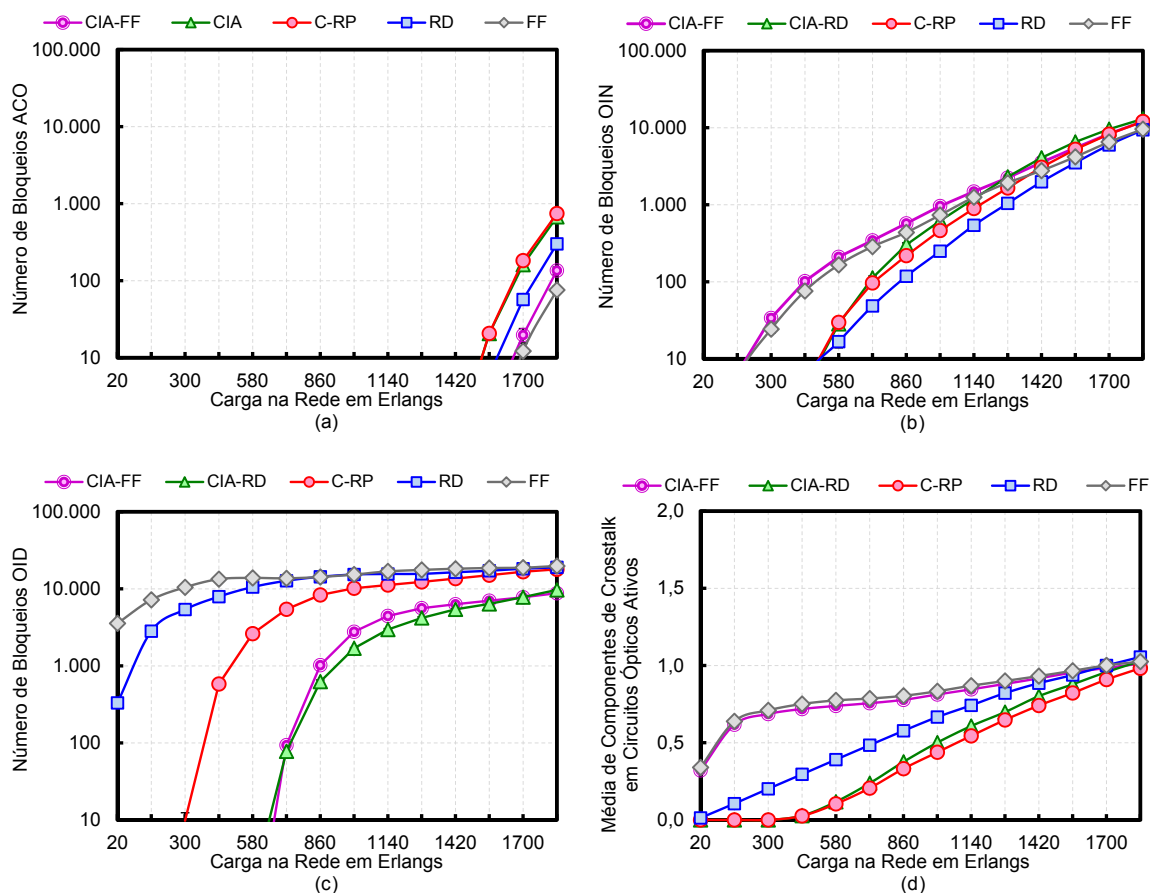


Figura 4.19: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Altruísta e Fator de Isolção = 35 dB.

rio. Os algoritmos CIA abriram uma vantagem ainda maior em relação ao algoritmo C-RP justamente devido a maior relevância dos bloqueios OID, onde o algoritmo CIA mostrou superar todos os demais algoritmos avaliados neste trabalho, independente da topologia empregada e do fator de isolamento do WSS.

4.2.4 Conclusões da Abordagem RWA-DIA Altruísta

Nesta seção realizamos um estudo detalhado sobre o desempenho dos algoritmos de alocação de comprimento de onda considerando a abordagem RWA-DIA Altruísta.

O desempenho dos algoritmos foi investigado em seis distintos cenários a partir de variações de topologias e de fatores de isolamento dos módulos WSS. Com objetivo de condensar os resultados apresentados nesta seção e viabilizar uma análise mais generalista em relação ao desempenho dos principais algoritmos, construímos um novo gráfico para mensurar o ganho percentual de tráfego submetido à rede devido a adoção dos algoritmos CIA em detrimento do algoritmo C-RP.

Foram definidas duas taxas de bloqueio de referência: $1E-3$ e $1E-2$. Em seguida, para cada um dos seis cenários avaliados, comparamos a carga máxima de tráfego submetida à rede para alcançar cada uma das taxas de referência de bloqueio. Inicialmente realizamos este estudo considerando apenas o algoritmo de alocação de comprimento de onda C-RP. Em seguida, repetimos o mesmo estudo para os algoritmos CIA-FF e CIA-RD. Os resultados foram expressos em termos de ganho percentual de carga submetida à rede devido a adoção dos algoritmos CIA em detrimento do C-RP. Portanto, o ganho percentual positivo indica que ao adotar o algoritmo CIA em detrimento do C-RP, foi possível maximizar a carga de tráfego suportada pela rede para uma mesma taxa de bloqueio.

Vale ressaltar que o potencial de receita de uma rede de transporte está diretamente relacionada à carga de tráfego suportada. Maximizar a carga de tráfego suportada representa maximizar o potencial de receita de uma rede de transporte.

A Figura 4.20 apresenta o ganho percentual de carga de tráfego suportada pela rede devido a adoção dos algoritmos CIA-FF e CIA-RD em detrimento do algoritmo C-RP.

A partir da combinação de três distintas topologias, dois distintos fatores de isolamento, e duas taxas de bloqueio de referência tivemos um total de doze diferentes cenários onde avaliamos e comparamos o desempenho dos algoritmos de alocação de comprimento de onda. Através dos resultados apresentados na Fig.4.20 é possível concluir que o algoritmo CIA-RD superou o C-RP em todos os cenários avaliados.

O algoritmo CIA-FF conseguiu superar o CIA-RD em cinco dentre os doze cenários. Destes cinco cenários, quatro deles ocorreram em regiões de alta taxa de bloqueio ($1E-2$). A única exceção ocorreu na topologia COST 239, onde o desempenho do CIA-FF superou o CIA-RD mesmo em um

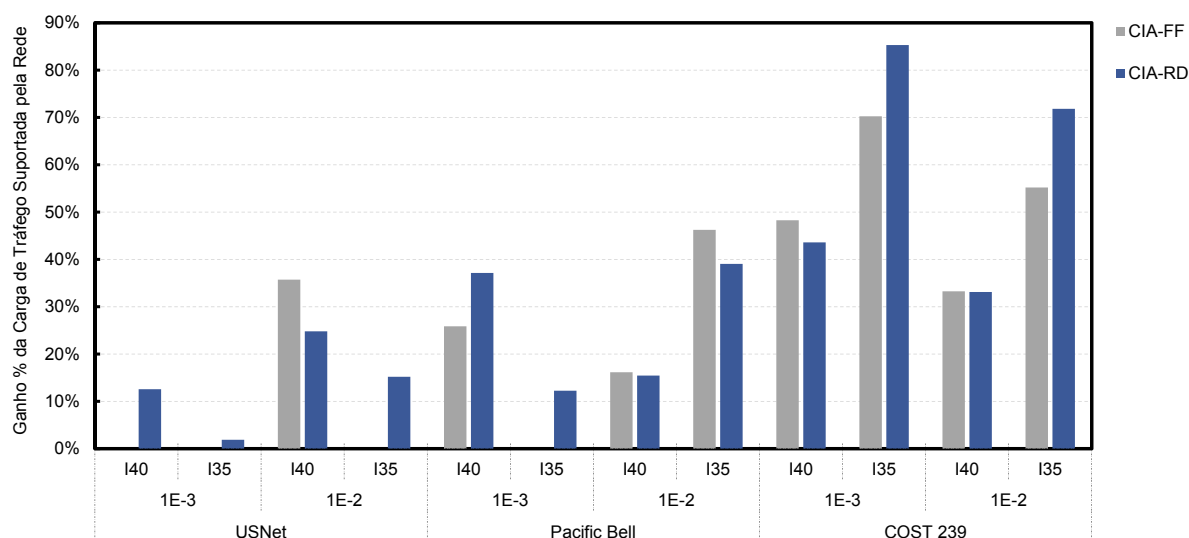


Figura 4.20: Ganho percentual de carga de tráfego devido a adoção dos algoritmos CIA-FF e CIA-RD em detrimento ao algoritmo C-RP - Abordagem RWA-DIA Altruísta

cenário de menor taxa de bloqueio (1E-3). Neste caso em específico, devido o tamanho reduzido das rotas da topologia, os bloqueios OIN foram desprezíveis em regiões de baixa carga. Conforme vimos anteriormente, o critério de desempate do algoritmo CIA-FF não o favorece quando os bloqueios OIN são relevantes devido ao maior acúmulo de *crossstalk* na rede. Para as demais topologias, onde os bloqueios do tipo OIN foram frequentes mesmo em regiões de baixa carga de tráfego, o algoritmo CIA-RD demonstrou ser a melhor alternativa.

A partir dos resultados apresentados na Fig.4.20 foi possível identificar em quais topologias os algoritmos CIA levaram mais vantagem em relação ao algoritmo C-RP. A maior vantagem ocorreu na topologia COST 239, a de menor porte de maior densidade de enlaces dentre as três topologias investigadas. A segunda maior vantagem ocorreu na topologia Pacific Bell. A topologia USNet mostrou-se a menos favorável para os algoritmos CIA dentre as três topologias avaliadas. Por tratar-se de uma topologia de grande porte, com grandes rotas, os bloqueios do tipo OIN foram mais frequentes do que em outras topologias. A maior relevância dos bloqueios OIN na topologia USNet influenciou na redução de vantagem dos algoritmos CIA em relação ao algoritmo C-RP.

Levando em consideração todos os doze cenários avaliados na Fig.4.20, o algoritmo CIA-RD superou o C-RP em todos eles, com uma média de 32,68% de carga de tráfego adicional suportada pela rede.

Na abordagem RWA-DIA Altruísta podemos considerar, portanto, que o algoritmo CIA-RD foi o que mais se destacou. O algoritmo CIA-FF mostrou-se uma alternativa interessante para regiões de alta carga na rede, onde os bloqueios ACO predominam. Nas três topologias investigadas, o desempenho do algoritmo CIA-FF superou os demais algoritmos nas regiões de maior carga na rede,

com taxa de bloqueio próxima a $1E-1$.

Para todos os algoritmos avaliados, com exceção dos algoritmos CIA propostos neste trabalho, a parcela de bloqueios OID foi a mais significativa. É importante ressaltar que a análise de bloqueios OID de maneira isolada nunca antes fora investigada na literatura. Além disso, nenhum algoritmo de alocação de comprimento de onda proposto na literatura procura reduzir estes bloqueios. Estes fatos foram motivadores para a proposta dos algoritmos CIA-FF e CIA-RD.

4.3 Resultados para a Abordagem RWA-DIA Egoísta

Conforme discutido no Capítulo 3, na abordagem RWA-DIA, um novo circuito óptico é estabelecido se, e somente se, as seguintes premissas forem atendidas:

- Haver disponibilidade de rota e comprimento de onda;
- Limiar de degradação na camada física deve ser atendido para o novo circuito óptico;
- Assumindo que o novo circuito óptico seja atendido, os limiares de degradação para todos os demais circuitos ópticos já ativos na rede também devem ser atendidos.

A terceira premissa, caso não atendida, indica que ao menos um circuito óptico já estabelecido na rede sofrerá uma degradação de camada física acima do limite tolerado, caso o novo circuito óptico seja estabelecido. Na abordagem RWA-DIA Altruísta o novo circuito óptico será bloqueado em prol dos circuitos ópticos já ativos na rede. Seguindo a linha altruísta, um circuito óptico, enquanto ativo na rede, não corre o risco de sofrer uma degradação de camada física além do limite tolerado.

Neste trabalho propomos um segundo possível desfecho caso a terceira premissa não seja atendida. Neste caso, o novo circuito óptico será estabelecido e o *crosstalk* originado pelo novo circuito levará ao menos um dos circuitos ópticos já ativos na rede a operar com condições inadequadas de camada física. Os circuitos afetados permanecerão ativos na rede, mas serão classificados como degradados. Nesta abordagem, não há garantia de que um circuito óptico, enquanto ativo na rede, permanecerá com limiar adequado de degradação de camada física. Na abordagem RWA-DIA Egoísta não temos os bloqueios do tipo OID. No entanto, são contabilizados os circuitos ópticos ativos que sofreram degradações acima do limite tolerado enquanto ativos na rede. Para classificar um circuito óptico ativo como degradado, basta que o seu limiar de degradação tenha sido ultrapassado uma única vez. Na abordagem RWA-DIA Egoísta, a probabilidade de bloqueio será composta pelos circuitos bloqueados ACO e OIN, além dos circuitos degradados.

Nesta seção investigaremos o desempenho dos algoritmos sensíveis às degradações de camada física, além dos algoritmos FF e RD, considerando a abordagem RWA-DIA Egoísta. Avaliaremos

o desempenho dos algoritmos nas três distintas topologias apresentadas na Fig.4.1. Será considerado um fator de isolamento do elemento WSS de 35 dB.

4.3.1 Pacific Bell

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam os resultados de simulação para a topologia Pacific Bell, com fator de isolamento do elemento WSS de 35 dB.

Em comparação com os resultados obtidos na abordagem RWA-DIA Altruísta, foi possível observar uma diferença significativa entre o volume de bloqueios OID da abordagem Altruísta (Fig.4.11) em relação ao volume de circuitos degradados da abordagem Egoísta. Na abordagem Altruísta, um único circuito ativo operando com margem reduzida de OSNR pode ser o responsável pelo bloqueio de diversos novos circuitos (bloqueios OID). Na abordagem Egoísta, a margem de OSNR dos circuitos ativos não influencia o bloqueio de novos circuitos.

Devido ao menor volume de circuitos degradados em relação aos bloqueios OID da abordagem Altruísta, a abordagem Egoísta apresentou menor taxa de bloqueio para todos os algoritmos avaliados. De uma maneira geral, todos os algoritmos que haviam sido prejudicados pelos bloqueios OID na abordagem Altruísta, tiveram melhor desempenho na abordagem Egoísta.

De acordo com os resultados apresentados na Fig.4.22, dentre os três fatores que contribuíram para a probabilidade de bloqueio, os bloqueios OIN foram os mais significativos. Os algoritmos C-RP e CIA-RD levaram vantagem nos bloqueios OIN enquanto a carga na rede foi inferior a 500 Erlangs. Com o aumento da carga de tráfego submetida à rede, os algoritmos que apresentam pior desempenho com os bloqueios do tipo ACO foram os primeiros a serem prejudicados devido ao crescimento da taxa de bloqueios OIN. Este foi o mesmo comportamento observado na abordagem Altruísta. A partir de 500 Erlangs, com o surgimento dos bloqueios ACO, os algoritmos FF e CIA-FF superaram o desempenho dos demais algoritmos nos bloqueios OIN. Devido a forte influência dos bloqueios OIN na topologia Pacific Bell e na abordagem RWA-DIA Egoísta, os algoritmos CIA-FF e FF foram os melhores algoritmos em termos de probabilidade de bloqueio para região de alta carga de tráfego.

Os algoritmos CIA-FF e CIA-RD foram concebidos tendo como foco a abordagem RWA-DIA Altruísta, pois eles procuram reduzir o número de circuitos frágeis em OSNR na rede com objetivo de reduzir os bloqueios OID e OIN, mas principalmente os bloqueios OID. Na abordagem RWA-DIA Egoísta, embora não existam os bloqueios OID, o desempenho dos algoritmos CIA-FF e CIA-RD continuaram a superar os demais avaliados. O CIA-RD obteve o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio para regiões de baixa carga de tráfego, e o CIA-FF liderou a região com maior carga de tráfego.

No comparativo entre os algoritmos CIA-RD e C-RP, o desempenho foi bastante similar

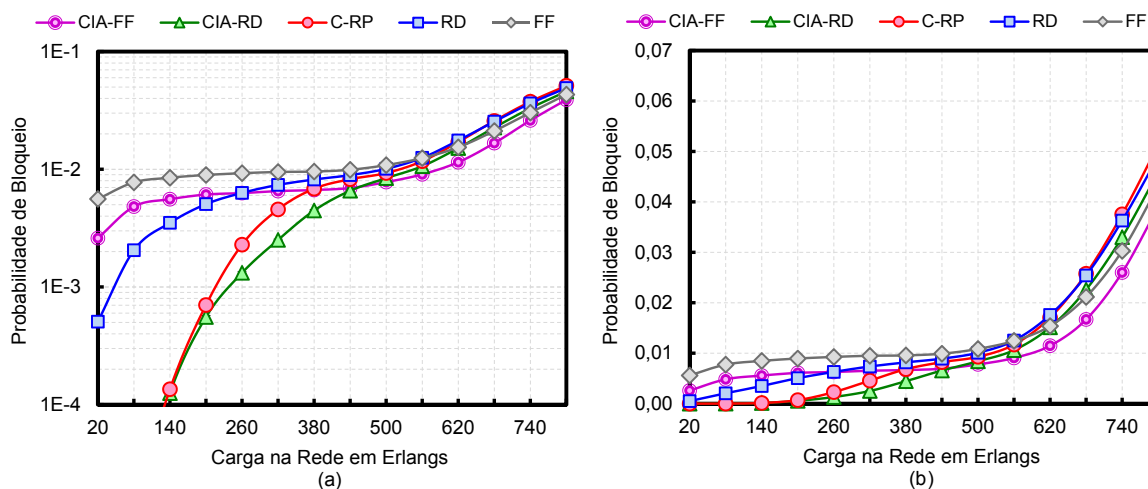


Figura 4.21: Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolção = 35 dB.

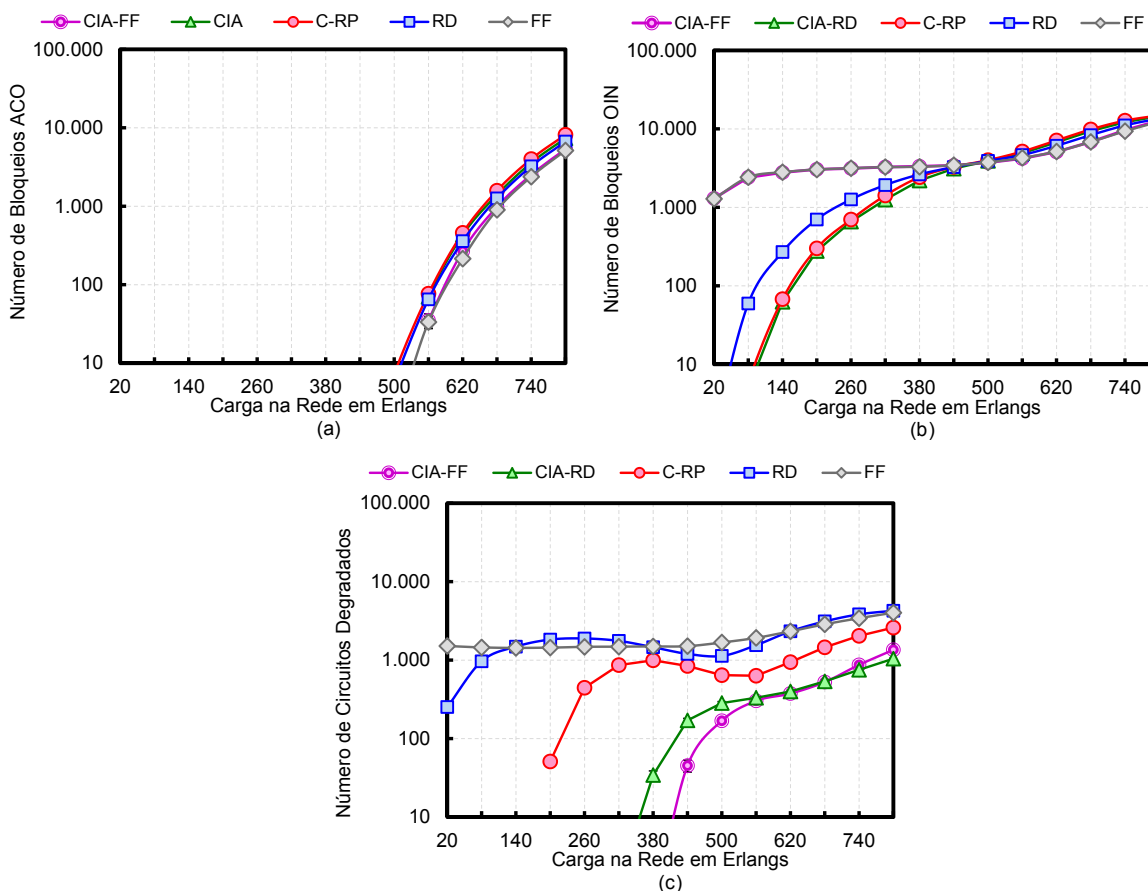


Figura 4.22: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede Pacific Bell com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolção = 35 dB.

para os bloqueios ACO e OIN. No entanto, o algoritmo CIA-RD obteve melhor desempenho em relação ao volume de circuitos ópticos degradados enquanto ativos. Mesmo na abordagem RWA-DIA Egoísta foi possível observar que a estratégia do algoritmo C-RP em reduzir o número de componentes de *crossstalk* nos circuitos ópticos ativos não superou a estratégia do algoritmo CIA de reduzir o número de circuitos frágeis em termos de OSNR na rede.

4.3.2 USNet

Para a topologia USNet os resultados foram similares. Conforme observado nas Figuras 4.23 e 4.24, o desempenho dos algoritmos CIA voltaram a superar os demais. No comparativo com a topologia Pacific Bell, a incidência de circuitos ópticos degradados foi maior. O mesmo ocorreu na abordagem RWA-DIA Altruísta, onde a incidência de bloqueios OID na topologia USNet foi superior à encontrada na topologia Pacific Bell.

Ainda na comparação com a topologia Pacific Bell, devido a maior relevância dos circuitos ópticos degradados na composição da probabilidade de bloqueio da topologia USNet, os algoritmos CIA tiveram maior vantagem frente aos demais algoritmos.

Novamente o algoritmo CIA-RD obteve o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio para regiões de baixa carga de tráfego, e o CIA-FF liderou a região com maior carga de tráfego. Assim como observado na abordagem RWA-DIA Altruísta, o critério de desempate do algoritmo CIA-FF baseado na alocação sequencial de comprimentos de onda é o principal responsável pela melhora de desempenho do algoritmo à medida em que a carga na rede aumenta e os bloqueios ACO tornam-se mais relevantes.

4.3.3 COST 239

Nos resultados obtidos com a abordagem RWA-DIA Altruísta, dentre as três topologias avaliadas, a COST 239 foi a menos susceptível aos bloqueios ACO e OIN. Consequentemente, foi a topologia mais sensível aos bloqueios OID, e onde os algoritmos CIA tiveram maior vantagem em relação aos demais algoritmos avaliados.

Conforme podemos observar nas Figuras 4.25 e 4.26, na abordagem RWA-DIA Egoísta os bloqueios ACO e OIN permaneceram com menor expressão em relação aos circuitos degradados na composição final da probabilidade de bloqueio. Assim como na abordagem Altruísta, a topologia COST 239 foi a mais favorável aos algoritmos CIA na abordagem Egoísta.

Novamente, no comparativo entre as abordagens Altruísta e Egoísta, o volume de bloqueios OID da Altruísta foi mais significativo que os circuitos degradados da abordagem Egoísta. Portanto, conforme esperado, observamos que a vantagem dos algoritmos CIA frente aos demais algoritmos foi

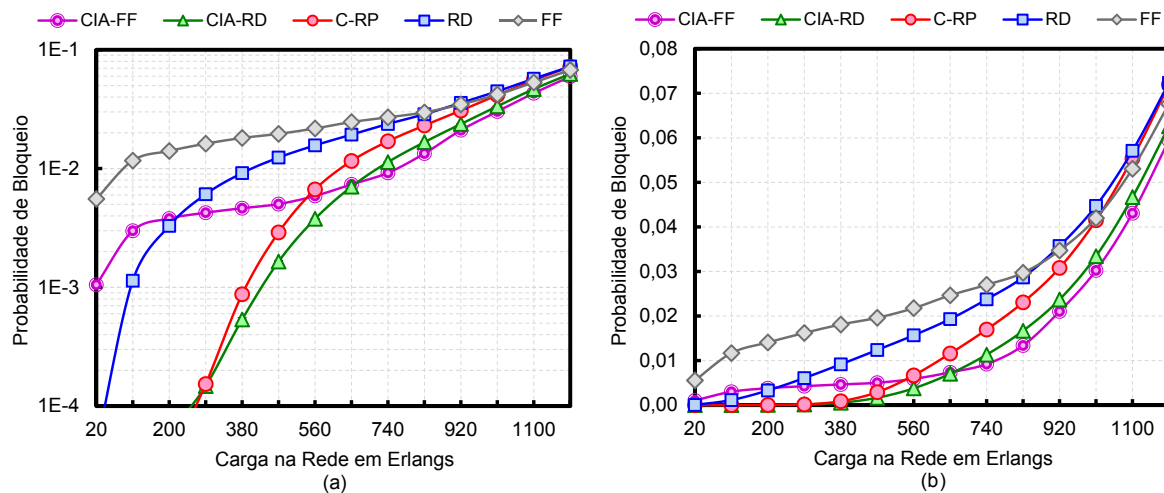


Figura 4.23: Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolação = 35 dB.

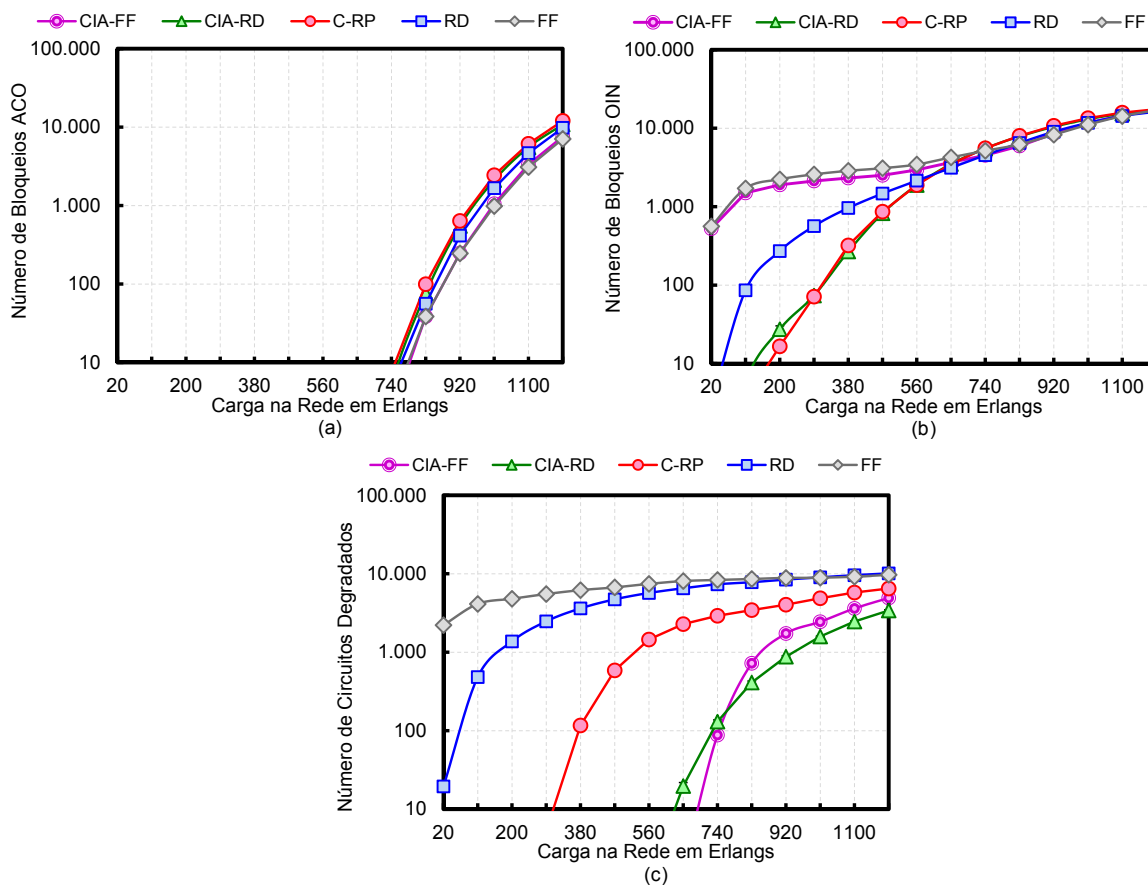


Figura 4.24: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede USNet com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolação = 35 dB.

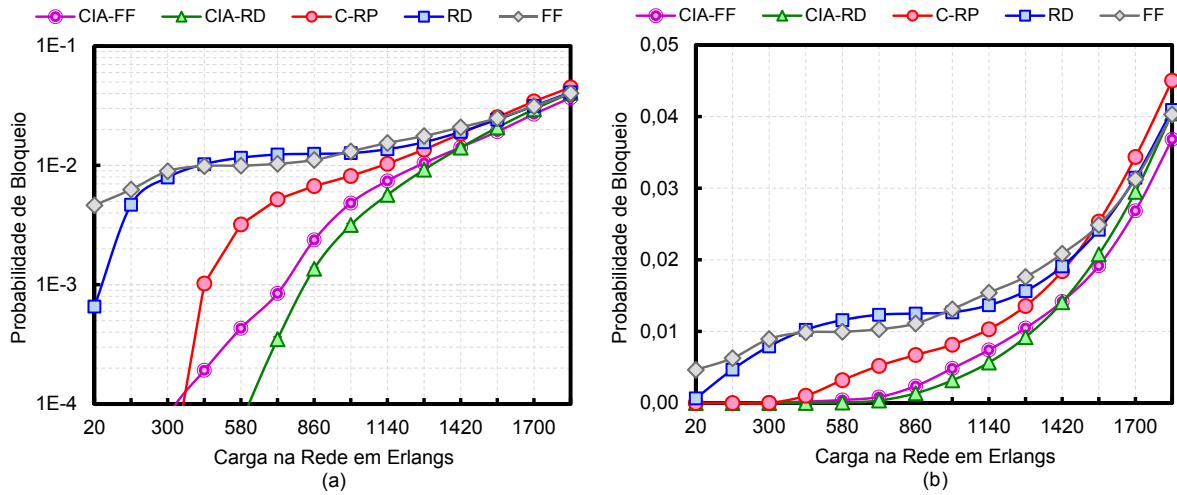


Figura 4.25: Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolação = 35 dB.

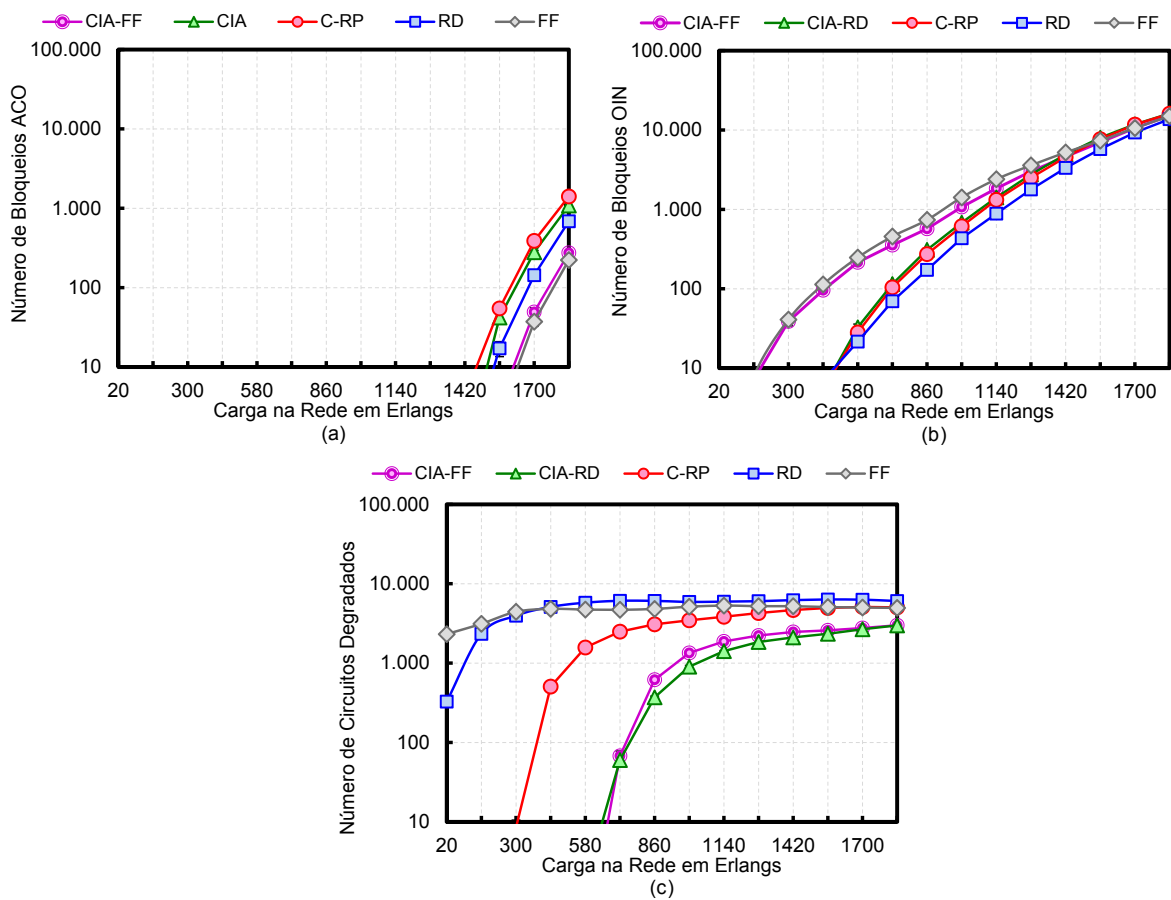


Figura 4.26: Origem da Probabilidade de Bloqueio na Rede COST 239 com a abordagem RWA-DIA Egoísta e Fator de Isolação = 35 dB.

maior na abordagem Altruísta.

4.3.4 Conclusões da Abordagem RWA-DIA Egoísta

O algoritmo CIA-RD superou o C-RP em todos os cenários avaliados. Em média o desempenho do CIA-RD foi 24% superior em relação ao C-RP em relação a carga de tráfego adicional suportada pela rede. Na abordagem RWA-DIA Altruísta a vantagem havia sido de 32,68%.

Conforme observado na Figura 4.27, dentre os seis cenários avaliados, o desempenho do algoritmo CIA-FF superou o C-RP por quatro vezes. O CIA-FF voltou a demonstrar vantagem em regiões de alta carga de tráfego. Dentre as três topologias avaliadas, em duas delas o desempenho do CIA-FF superou todos os demais algoritmos para a taxa de bloqueio de 1E-2.

Embora a abordagem RWA-DIA Egoísta não tenha sido o foco principal dos algoritmos CIA, pudemos observar nesta seção que eles obtiveram os melhores resultados em termos de probabilidade de bloqueio. Portanto, podemos concluir que os algoritmos CIA podem ser utilizados em redes ópticas de transporte com ou sem o mecanismo de controle sobre o impacto, em termos de degradações de camada física, do estabelecimento de um novo circuito nos demais circuitos já ativos na rede.

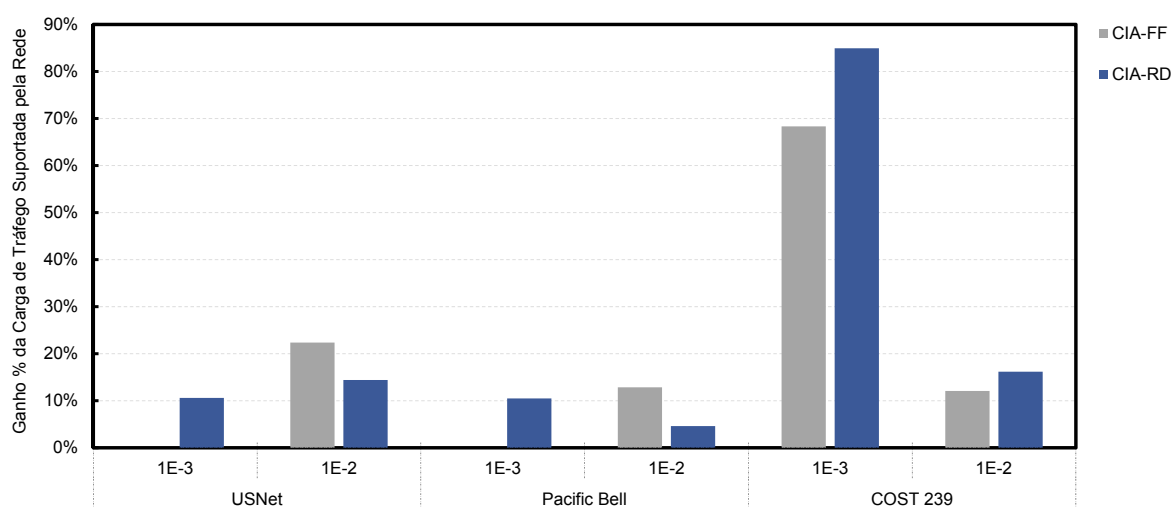


Figura 4.27: Ganho percentual de carga de tráfego devido a adoção dos algoritmos CIA-FF e CIA-RD em detrimento ao algoritmo C-RP - Abordagem RWA-DIA Egoísta

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

The only way to do great work is to love what you do.

— Steve Jobs

Nesta dissertação o problema RWA foi investigado sob diversas novas perspectivas, com objetivo de retratar em ambiente de simulação os problemas reais vivenciados pelas redes ópticas de transporte.

Inicialmente foi proposta uma modelagem mais moderna para o elemento ROADM, com base na tecnologia de comutação WSS e arquitetura de comutação Broadcast & Select. Esta modelagem é amplamente utilizada no mercado, porém, segundo o nosso conhecimento, ainda não havia sido explorada pela literatura relacionada ao problema RWA.

No Capítulo 2, foi apresentada uma nova metodologia para o controle do Ganho Alvo dos amplificadores, assim como novos conceitos para o projeto e dimensionamento destes elementos. A Padtec, empresa líder na área de comunicações ópticas na América Latina, está usando estes novos conceitos no desenvolvimento da sua nova geração de amplificadores ópticos para redes ópticas reconfiguráveis. Os novos conceitos também foram aplicados neste trabalho ao longo das diversas simulações de rede realizadas.

Seguindo a preocupação em retratar os reais problemas vivenciados pelas redes ópticas no mercado, foram propostas novas abordagens ao problema RWA, levando em consideração as restrições dinâmicas de camada física (RWA-DIA).

Os algoritmos de alocação de comprimento de onda foram inicialmente avaliados considerando a abordagem mais primitiva do problema RWA, onde as restrições não são levadas em consideração. Seguida pela abordagem RWA-SIA, onde as degradações de camada física são levadas em consideração, porém permanecem estáticas para os circuitos ópticos já estabelecidos na rede. Am-

bas abordagens são frequentemente adotadas na literatura. Por fim, foco desta dissertação, os algoritmos de alocação de comprimento de onda foram avaliados considerando duas variações da abordagem RWA-DIA: RWA-DIA Egoísta, vastamente utilizada no mercado; RWA-DIA Altruísta, mais moderna e tendência de mercado. Segundo o nosso conhecimento, este foi o primeiro trabalho a considerar a abordagem RWA-DIA Egoísta na avaliação de desempenho de algoritmos de alocação de comprimento de onda.

Foram realizados estudos de avaliação de desempenho com três algoritmos de alocação de comprimento de onda conhecidos na literatura: FF, RD e C-RP. Os dois primeiros, embora não sensíveis às degradações de camada física, são utilizados com bastante frequência no mercado. O terceiro algoritmo avaliado foi proposto em um dos trabalhos pioneiros na abordagem RWA-DIA Altruísta [31]. O algoritmo C-RP foi selecionado devido o seu foco em minimizar os impactos do ruído *crosstalk* na rede, de grande relevância na abordagem RWA-DIA.

A principal métrica utilizada na avaliação de desempenho dos algoritmos foi a probabilidade de bloqueio. Na abordagem RWA-DIA Altruísta, além da análise da probabilidade de bloqueio, foram investigados as três componentes responsáveis pela composição final da probabilidade de bloqueio, ou seja, os bloqueios ACO, OIN e OID. Segundo o nosso conhecimento, este foi o primeiro trabalho a investigar o impacto dos três tipos de bloqueio da abordagem RWA-DIA, no desempenho dos algoritmos de alocação de comprimento de onda. A partir deste estudo inédito foi possível constatar a enorme influência dos bloqueios OID na composição final da probabilidade de bloqueio para os algoritmos FF, RD e C-RP.

Além dos três algoritmos selecionados na literatura, foram propostos dois outros algoritmos de alocação de comprimento de onda: CIA-FF e CIA-RD. Assim como o algoritmo C-RP, o foco dos algoritmos CIA consiste em minimizar os impactos do ruído *crosstalk* na rede. No entanto, a estratégia adotada foi diferente. Enquanto o C-RP procura reduzir ao máximo o número de componentes de *crosstalk* na rede, o CIA procura evitar novas componentes de *crosstalk* nos circuitos ativos com menor margem de OSNR.

No Capítulo 4, foram apresentados os resultados de simulação comparando o desempenho dos algoritmos em três distintas topologias e com diferentes fatores de isolamento do elemento WSS. Na abordagem RWA-DIA Altruísta, o desempenho do algoritmo CIA-RD foi o que mais se destacou. Ele foi superado apenas pelo algoritmo CIA-FF em regiões de alta carga de tráfego, onde os bloqueios do tipo ACO predominam. O algoritmo C-RP, também sensível às degradações de camada física, foi superado pelo algoritmo CIA-RD em todos os cenários avaliados.

Os resultados de simulação comprovaram que o C-RP obteve sucesso em sua estratégia, e conseguiu inclusive gerar um menor número de componentes de *crosstalk* na rede dentre todos os algo-

ritmos avaliados. No entanto, os resultados de simulação comprovaram que a estratégia de minimizar o número de componentes de *crosstalk* na rede não foi tão eficaz na redução dos bloqueios ocasionados por condições inadequadas de camada física. Os resultados de simulação também comprovaram que a estratégia adotada pelos algoritmos CIA conseguiram reduzir significativamente os bloqueios OID. Devido a grande relevância dos bloqueios OID, ao reduzirem os bloqueios OID os algoritmos CIA conseguiram melhor desempenho na probabilidade de bloqueio.

Segundo os resultados apresentados na Fig.4.20, ao comparar a carga de tráfego suportada pela rede para a mesma taxa de bloqueio, o desempenho do algoritmo CIA-RD foi, em média, 32,68% superior em relação ao algoritmo C-RP. Para a topologia COST 239, o desempenho do algoritmo CIA-RD chegou a superar o C-RP em 85% no ganho percentual da carga de tráfego suportada pela rede para a taxa de bloqueio de $1E-3$. O pequeno porte da topologia COST 239 e a sua alta densidade de enlaces por nó favoreceram a incidência dos bloqueios OID frente aos bloqueios ACO e OIN. Os resultados comprovaram que a vantagem do algoritmo CIA-RD em relação ao C-RP é mais significativa para topologias mais susceptíveis aos bloqueios OID.

A topologia USNet foi a menos favorável aos algoritmos CIA. Devido ao grande porte da rede e baixa densidade de enlaces, os bloqueios OIN tiveram maior influência na composição da probabilidade de bloqueio em relação às demais topologias. Em consequência, os bloqueios OID tiveram menor influência. Ainda assim, o algoritmo CIA-RD superou o C-RP com uma média de 14% no ganho percentual de carga suportada pela rede.

Importante ressaltar que o potencial de receita de uma rede de transporte está diretamente relacionada à carga de tráfego suportada. Os resultados apresentados na Fig.4.20 comprovam o relevante impacto dos algoritmos de alocação de comprimento de onda no potencial de receita de uma rede de transporte.

Na abordagem RWA-DIA Altruísta, um circuito óptico, enquanto ativo na rede, não corre o risco de sofrer uma degradação de camada física além do limite tolerado. Para a rede trabalhar com a abordagem Altruísta, é necessária a implementação de mecanismos que consigam avaliar o impacto, em termos de degradações de camada física, do estabelecimento de um novo circuito nos demais circuitos já ativos na rede. Na prática, a grande maioria das redes ainda não trabalham com mecanismos como este. Nestas redes, apenas após o estabelecimento de um novo circuito é possível avaliar se houve alguma degradação superior ao limite tolerado pelos circuitos já ativos. Tendo em vista este cenário, estendemos a avaliação de desempenho dos algoritmos de alocação de comprimento de onda para uma abordagem inédita na literatura, denominada de abordagem RWA-DIA Egoísta.

Na abordagem RWA-DIA Egoísta não há garantia que um circuito óptico, enquanto ativo na rede, permanecerá com limiar adequado de degradação de camada física. Na abordagem RWA-

DIA Egoísta não temos os bloqueios do tipo OID. No entanto, são contabilizados os circuitos ópticos ativos que sofreram degradações acima do limite tolerado enquanto ativos na rede. Para classificar um circuito óptico ativo como degradado, basta que o seu limiar de degradação tenha sido ultrapassado uma única vez. Na abordagem RWA-DIA Egoísta, a probabilidade de bloqueio é composta pelos circuitos bloqueados ACO e OIN, além dos circuitos degradados.

De acordo com o resultados apresentados na Seção 4.3, e resumidos na Fig.4.27, foi possível observar que o volume de circuitos degradados da abordagem Egoísta foi bem menos significativo que os bloqueios OID da abordagem Altruísta. Este resultado era de certa forma esperado, pois na abordagem Altruísta, um único circuito ativo operando com margem reduzida de OSNR, pode ser o responsável pelo bloqueio de diversos novos circuitos (bloqueios OID). Na abordagem Egoísta, a margem de OSNR dos circuitos ativos não influencia o bloqueio de novos circuitos.

Os algoritmos CIA-FF e CIA-RD foram concebidos tendo como foco a abordagem RWA-DIA Altruísta, pois eles procuram reduzir o número de circuitos frágeis em OSNR na rede com objetivo de reduzir os bloqueios OID e OIN, mas principalmente os bloqueios OID. Ainda assim, mesmo considerando a abordagem RWA-DIA Egoísta, onde não temos os bloqueios OID, os algoritmos CIA-FF e CIA-RD superaram os demais em termos de probabilidade de bloqueio.

Conforme os resultados apresentados na Fig.4.27, o algoritmo CIA-RD voltou a superar o C-RP em todos os cenários avaliados. No entanto, na comparação com a abordagem RWA-Altruísta, a vantagem do algoritmo CIA-RD frente ao C-RP foi menor. Em média o desempenho do CIA-RD foi 24% superior em relação ao C-RP no ganho percentual da carga de tráfego suportada pela rede. Na abordagem RWA-DIA Altruísta a vantagem havia sido de 32,68%. Para a topologia COST 239, a mais favorável ao algoritmo CIA-RD, a vantagem foi novamente de 85%. Assim como na abordagem Altruísta, o algoritmo CIA-FF voltou a se destacar nas regiões de alta carga de tráfego, onde os bloqueios ACO predominam.

Após uma diversificada avaliação de desempenho dos algoritmos de alocação de comprimento de onda, considerando abordagens modernas sobre o problema RWA e alinhadas com o mercado, podemos concluir que os algoritmos CIA propostos neste trabalho representam uma solução eficiente para a redução da probabilidade de bloqueio e melhoria de desempenho das redes ópticas de transporte comutadas a circuito e sensíveis às degradações dinâmicas da camada física.

Em trabalhos futuros devemos explorar o problema de roteamento e alocação de espectro RSA (*Routing and Spectrum Assignment*) em redes ópticas elásticas, incorporando novas degradações de camada física relevantes às taxas superiores a 100Gb/s. Nas redes ópticas elásticas, além do espectro configurável dos elementos ROADM, os transponders devem trabalhar com interfaces de linha configuráveis em termos de taxa de linha, formato de modulação e número de portadoras. Através da

configuração destes parâmetros será possível adaptar o sinal de linha para lidar com diferentes restrições da rede em termos de disponibilidade de espectro e degradações de camada física. Os algoritmos RSA podem ser importantes aliados para ajudar a rede a configurar as interfaces de linha de forma adequada em função das adversidades encontradas na camada física e no desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio de futuras conexões.

REFERÊNCIAS

- [1] ITU-T, Measuring the Information Society, 2013. [Online]. Disponível em: http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/mis2013/MIS2013_without_Annex_4.pdf
- [2] ITU-T, World Telecommunication/ICT Indicators Database, 2013. [Online]. Disponível em: <http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>
- [3] THE WORLD BANK, World Development Indicators, 2013. [Online]. Disponível em: <http://databank.worldbank.org/data/views/reports/tableview.aspx?isshared=true&ispopular=series&pid=20>
- [4] ERICSSON, Ericsson Mobility Report, 2013. [Online]. Disponível em: <http://www.ericsson.com/res/docs/2013/ericsson-mobility-report-june-2013.pdf>
- [5] SUBCOMISSÃO ESPECIAL DA COMISSÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, COMUNICAÇÃO E INFORMÁTICA DA CÂMARA DOS DEPUTADOS, Relatório final da subcomissão especial destinada a acompanhar as ações do Programa Nacional de Banda Larga, 2013. [Online]. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cctci/documentos/relatorios-de-atividades/relatorios-de-subcomissoes/rel-final-subcom-esp-pnbl-2013>
- [6] FACEBOOK, ERICSSON, QUALCOMM, White Paper: A Focus on Efficiency, 2013. [Online]. Disponível em: https://fbcdn-dragon-a.akamaihd.net/hphotos-ak-ash3/851560_196423357203561_929747697_n.pdf
- [7] CISCO, White Paper: Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012-2017, 2013.
- [8] C. S. R. MURTHY, M. GURUSAMY, **WDM Optical Networks - Concepts, Design, and Algorithms**, 1ª ed. Prentice Hall, 2002.
- [9] INFONETICS RESEARCH, Market Report: OTN and Packet Optical Hardware Biannual Worldwide Market Share, Size, and Forecasts, 2012.

- [10] ITU-T, **Recommendation G.709/Y.1331**, Interfaces for the Optical Transport Network (OTN), 2012.
- [11] IEEE, **802.3ba**, MAC Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for the Transfer of 802.3 Formats Frames at 40 Gb/s and 100 Gb/s, 2010.
- [12] OIF, **100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document**, OIF-FD-100G-DWDM-01.0, 2009.
- [13] HEAVY READING, The Rise of 100G Terabit Transport Networks Report, 2014.
- [14] INFONETICS RESEARCH, Market Report: ROADM Components Biannual Market Share, Size, and Forecast, Março 2011.
- [15] P. D. COLBOURNE, B. COLLINGS, ROADM Switching Technologies, *Optical Fiber Communication Conference (OFC), OTuD1*, 2011.
- [16] HONG YU, Evolution of IP & Optical Network and Multi-Layer Optimisation Solution, *WDM & Next Generation Optical Networking Conference*, 2013.
- [17] H. ZANG, J. P. JUE, B. MUKHERJEE, A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks, *Optical Networks Magazine*, v. 1, n. 1, p. 47–60, 2000.
- [18] X. CHU, B. LI, I. CHLAMTAC, Wavelength Converter Placement under Different RWA Algorithms in Wavelength-Routed All-Optical Networks, *IEEE Transactions on Communications*, v. 51, n. 4, p. 607–617, 2003.
- [19] X. CHU, B. LI, Dynamic Routing and Wavelength Assignment in the Presence of Wavelength Conversion for All-Optical Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 13, n. 3, p. 704–715, 2005.
- [20] A. SOARES, J. MARANHÃO, W. GIOZZA, P. CUNHA, Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Network with Sparse-Partial Wavelength Conversion Capability, *International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2006.
- [21] A. SOARES, J. MARANHÃO, W. GIOZZA, P. CUNHA, First Load Priority: A Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Networks, *Revista Brasileira de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 1, p. 23–35, 2008.
- [22] G. M. DURAES, A. SOARES, J. R. AMAZONAS, W. GIOZZA, The Choice of the Best Among the Shortest Routes in Transparent Optical Networks, *Computer Networks Journal*, v. 54, n. 14, p. 2400–2409, 2010.

- [23] B. RAMAMURTHY, D. DATTA, H. FENG, J. P. HERITAGE, B. MUKHERJEE, Impact of Transmission Impairments on the Teletraffic Performance of Wavelength-Routed Optical Networks, *Journal of Lightwave Technology*, v. 17, n. 10, p. 1713–1723, 1999.
- [24] S. AZODOLMOLKY, M. KLINKOWSKI, E. MARIN, D. CAREGLIO, J. S. PARETA, I. TOMKOS, A Survey on Physical Layer Impairments Aware Routing and Wavelength Assignment Algorithms in Optical Networks, *Computer Networks Journal*, v. 53, n. 7, p. 926–944, 2009.
- [25] Y. G. HUANG, J. P. HERITAGE, B. MUKHERJEE, Connection Provisioning with Transmission Impairment Consideration in Optical WDM Networks with High-Speed Channels, *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 3, p. 982, 2005.
- [26] R. CARDILLO, V. CURRI, M. MELLIA, Considering Transmission Impairments in Wavelength Routed Networks, *Proceedings of Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, p. 421–429, 2005.
- [27] H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Impact of Physical Layer Impairments in All-Optical Networks, *Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, v. 1, p. 536–541, 2007.
- [28] G. MARKIDIS, A. TZANAKAKI, Routing and Wavelength Assignment Algorithms in Survivable WDM Networks under Physical Layer Constraints, *5th International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS)*, p. 191–196, 2008.
- [29] A. G. RAHBAR, Review of Dynamic Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment Techniques in All-Optical Wavelength-Routed Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 1065–1089, 2012.
- [30] M. ANGELOU, S. AZODOLMOLKY, I. TOMKOS, Dynamic Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment, In: **Cross-Layer Design in Optical Networks**. Springer, 2013.
- [31] T. DENG, S. SUBRAMANIAM, J. XU, Crosstalk-Aware Wavelength Assignment in Dynamic Wavelength-Routed Optical Networks, *First International Conference on Broadband Networks*, p. 140–150, 2004.
- [32] Y. POINTURIER, Cross-Layer Design of All-Optical Networks Incorporating Crosstalk Effects, PHD Thesis, University of Virginia, 2006.
- [33] J. HE, RWA Algorithm Design and Performance Analysis for All-Optical Networks Subject to Physical Impairments, PHD Thesis, University of Virginia, 2008.

- [34] J. HE, M. BRANDT-PEARCE, S. SUBRAMANIAM, QoS-Aware Wavelength Assignment with BER and Latency Constraints for All-Optical Networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 5, p. 462–474, 2009.
- [35] A. SIAMAK, Physical Impairments Aware Planning and Operation of Transparent Optical Networks, PHD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [36] Y. POINTURIER, M. BRANDT-PEARCE, S. SUBRAMANIAM, Analysis of Blocking Probability in Noise and Crosstalk Impaired All Optical Networks, *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 1, n. 6, p. 543–554, 2009.
- [37] J. ZHAO, K. ZHANG, L. WANG, Y. WANG, Study of Q-factor Estimation Model Based on Multi-Physical Impairments in Transparent Optical Networks. *Journal of Communications*, v. 7, n. 10, 2012.
- [38] D. A. R. CHAVES, Projeto de Redes Ópticas de Alta Capacidade Utilizando Técnicas de Otimização Bioinspiradas, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- [39] S. V. VARANASI, Impairment-Aware Dynamic Routing and Wavelength Assignment in Translucent Optical WDM Networks, PHD Thesis, University of Windsor, 2013.
- [40] K. CHRISTODOULOPOULOS, K. MANOUSAKIS, E. A. VARVARIGOS, M. ANGELOU, I. TOMKOS, A Multicost Approach to Online Impairment-Aware RWA, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, p. 1–6, 2009.
- [41] C. V. SARADHI, S. SUBRAMANIAM, Physical Layer Impairment Aware Routing (PLIAR) in WDM Optical Networks: Issues and Challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 11, n. 4, 2009.
- [42] J. MARANHAO, A. SOARES, H. WALDMAN, Wavelength Assignment in Optical Networks Considering Physical Impairments, *12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, p. 1–4, 2010.
- [43] Y.-T. HSUEH, A. STARK, L. CHENG, T. DETWILER, S. TIBULEAC, M. FILER, G.-K. CHANG, S. E. RALPH, Passband Narrowing and Crosstalk Impairments in ROADM-Enabled 100G DWDM Networks, *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, n. 21-24, p. 3980–3986, 2012.
- [44] M. FILER, S. TIBULEAC, Performance Tradeoffs of 120 Gb/s DP-QPSK in ROADM Systems Employing Broadcast-and-Select versus Route-and-Select Architectures, *IEEE Photonics Conference (IPC)*, p. 509–510, 2013.

- [45] B. COLLINGS, New Devices Enabling Software-Defined Optical Networks, *IEEE Communications Magazine*, v. 51, n. 3, p. 66–71, 2013.
- [46] ITU-T, **Recommendation G.798**, Characteristics of Optical Transport Network Hierarchy Equipment Functional Blocks, Dezembro 2012.
- [47] Y. MIYATA, K. KUBO, H. YOSHIDA, T. MIZUOCHI, Proposal for Frame Structure of Optical Channel Transport Unit Employing LDPC Codes for 100 Gb/s FEC, *Optical Fiber Communication Conference (OFC), NThB2*, 2009.
- [48] E. YAMAZAKI, S. YAMANAKA, Y. KISAKA, T. NAKAGAWA, K. MURATA, E. YOSHIDA, T. SAKANO, M. TOMIZAWA, Y. MIYAMOTO, S. MATSUOKA, *et al.*, Fast Optical Channel Recovery in Field Demonstration of 100-Gbit/s Ethernet over OTN Using Real-Time DSP, *Optics Express Journal*, v. 19, n. 14, p. 13 179–13 184, 2011.
- [49] H. GRIESSER, A. CARRASCO COLOMER, F. JIMENEZ ARRIBAS, S. BAYER, J. L. AREVALO BENITEZ, H. WERNZ, R. MAGRI, G. BRUNO, Nonlinear Tolerance of 112-Gb/s DP-QPSK in a Live Field Upgrade Trial over a 848km 10G DWDM Link, *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, p. NWA3, 2011.
- [50] A. CARENA, V. CURRI, G. BOSCO, P. POGGIOLINI, F. FORGHIERI, Modeling of the Impact of Nonlinear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links, *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, n. 10, p. 1524–1539, 2012.
- [51] D. V. D. BORNE, V. A. SLEIFFER, M. S. ALFIAD, S. L. JANSEN, T. WUTH, POLMUX-QPSK Modulation and Coherent Detection: The Challenge of Long-Haul 100G Transmission, *35th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2009.
- [52] L. E. NELSON, G. ZHANG, M. BIRK, C. SKOLNICK, R. ISAAC, Y. PAN, C. RASMUSSEN, G. PENDOCK, B. MIKKELSEN, A Robust Real-Time 100G Transceiver with Soft-Decision Forward Error Correction, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 4, n. 11, p. B131–B141, 2012.
- [53] ITU-T, **Recommendation G.652**, Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre and Cable, Novembro 2009.
- [54] 80-Channel 50GHz Athermal AWG Data Sheet, KAIAM Corporation, Newark, CA, USA. [Online]. Disponível em: <http://www.kaiamcorp.com/media/KAIAM%2080Ch%2050GHz%20Athermal%20AWG.pdf>

- [55] D. V. D. BORNE, Robust Optical Transmission Systems: Modulation and Equalization, PHD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [56] D. M. BANEY, P. GALLION, R. S. TUCKER, Theory and Measurement Techniques for the Noise Figure of Optical Amplifiers, *Optical Fiber Technology Journal*, v. 6, n. 2, p. 122–154, 2000.
- [57] J. C. R. F. DE OLIVEIRA, Amplificadores Ópticos com Controle Automático de Ganho para Aplicação em Redes Ópticas Reconfiguráveis, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- [58] J. OLIVEIRA, A. CABALLERO, E. MAGALHAES, U. MOURA, R. BORKOWSKI, G. CURIEL, A. HIRATA, L. HECKER, E. PORTO, D. ZIBAR, J. MARANHAO, I. MONROY, J. OLIVEIRA, Demonstration of EDFA Cognitive Gain Control via GMPLS for Mixed Modulation Formats in Heterogeneous Optical Networks, In: **Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013**, 2013, p. 1–3.
- [59] F. PAOLUCCI, N. SAMBO, F. CUGINI, A. GIORGETTI, P. CASTOLDI, Experimental Demonstration of Impairment-Aware PCE for Multi-Bit-Rate WSONs, *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 8, p. 610–619, 2011.
- [60] G. ZHANG, M. DE LEENHEER, A. MOREA, B. MUKHERJEE, A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 15, n. 1, p. 65–87, 2013.
- [61] J. MARANHAO, A. SOARES, H. WALDMAN, Alocação de Comprimento de Onda em Redes Ópticas Considerando as Degradações de Camada Física, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2010.
- [62] A. SOARES, J. MARANHAO, W. GIOZZA, SimRWA 2.0: Uma Ferramenta para Avaliação de Desempenho de Algoritmos RWA e de Técnicas de Sobrevivência em Redes Ópticas Transparentes, 2005.
- [63] A. FONTINELE, G. DURAES, J. MARANHAO, A. SOARES, Alocação Preventiva de Regeneradores em Redes Ópticas Translúcidas, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2014.
- [64] A. SOARES, J. MARANHAO, W. GIOZZA, Sobrevivência em Redes Ópticas WDM sob Influência de Algoritmos de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda, *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)*, 2005.

- [65] K. ASSIS, J. MARANHÃO, A. SANTOS, W. GIOZZA, Minimum Blocking Probability in OBS Networks Optimized for an Initial Static Load, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2007.
- [66] J. MARANHÃO, A. SANTOS, W. GIOZZA, K. ASSIS, H. WALDMAN, Loose Topology Design for OBS Networks, *III Workshop TIDIA KyaTera*, 2006.
- [67] A. SOARES, J. MARANHÃO, W. GIOZZA, P. CUNHA, Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Network with Sparse-Partial Wavelength Conversion Capability, *IEEE International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2006.
- [68] A. SOARES, J. MARANHÃO, W. GIOZZA, P. CUNHA, First Load Priority: A Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Networks with Sparse-Partial Wavelength, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2006.
- [69] J. MARANHÃO, A. SOARES, W. GIOZZA, Estudo de Arquiteturas de Conversão de Comprimento de Onda em Redes WDM com Comutação de Rajadas Ópticas, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2007.
- [70] J. MARANHÃO, A. SOARES, H. WALDMAN, Wavelength Conversion Architectures in OBS Networks, *11th IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, 2008.
- [71] L. GALDINO, J. MARANHÃO, J. COSTA, I. MARTINS, F. DURAND, E. MOSCHIM, L. BONANI, Evolution of Dynamic Routing Wavelength Code Assignment in WDM/OCDM OBS Network, *33rd IEEE Sarnoff Symposium*, p. 1–5, 2010.
- [72] I. MOURA, F. MAZULLO, J. MARANHÃO, A. SOARES, ABOI: A Novel Strategy to Mitigate the Blocking Due to Outdated Information in OCS/OBS Network, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, p. 640–645, 2013.
- [73] I. MOURA, F. MAZULLO, J. MARANHÃO, A. SOARES, Impacto da Comutação OBS na Probabilidade de Bloqueio OCS em Redes Híbridas OCS/OBS, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2012.
- [74] L. GALDINO, J. MARANHÃO, M. FURTADO, E. MOSCHIM, L. BONANI, F. DURAND, Sparse Partial Optical Code and Wavelength Conversion Architecture in Hybrid WDM/OCDM OBS Networks, *18th International Conference on Telecommunications (ICT)*, p. 211–215, 2011.
- [75] L. GALDINO, J. MARANHÃO, M. FURTADO, E. MOSCHIM, L. BONANI, F. DURAND, Impact of MAI on the Performance of WDM/OCDM OBS Networks Using 2d Wavelength-Hopping and Time Spreading Optical Codes, *34th IEEE Sarnoff Symposium*, p. 1–5, 2011.

- [76] L. GALDINO, J. MARANHÃO, M. FURTADO, L. BONANI, F. DURAND, E. MOSCHIM, Evolution of Hybrid WDM/OCDM Technology in OBS Networks with Optical Code and Wavelength Conversion, *Photonic Network Communications*, v. 25, n. 1, p. 47–59, 2013.
- [77] L. GALDINO, J. MARANHÃO, M. FURTADO, E. MOSCHIM, L. BONANI, Evaluation of Hybrid WDM/OCDM Technology with Optical Codes Conversion in OBS Networks, *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave Optoelectronics Conference (IMOC)*, p. 375–378, 2011.
- [78] A. FONTILENE, I. SANTOS, J. MARANHÃO, F. MAZULLO, A. SOARES, A Solution to the MCSP Problem Considering Physical Layer Degradations in Transparent Optical Networks, *30th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, 2015.
- [79] A. FONTILENE, I. SANTOS, G. DURAES, J. MARANHÃO, A. SOARES, Preventive Assignment of Regenerator in Translucent Optical Networks, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2014.

APÊNDICE A

SIMULADOR SIMRWA-IA

O desenvolvimento de uma ferramenta de simulação capaz de avaliar o desempenho de redes ópticas sensíveis às degradações dinâmicas de camada física foi parte importante deste trabalho. Inicialmente foram investigadas algumas ferramentas de simulação de mercado, porém não encontramos nenhuma solução de fácil customização para inclusão dos novos algoritmos de alocação de comprimento de onda, e para as novas modelagens propostas para os elementos de rede.

A estratégia adotada foi a extensão de uma ferramenta de simulação chamada SimRWA [62] desenvolvida em 2005 e aperfeiçoada ao longo dos últimos anos. Neste período a ferramenta foi adaptada para lidar com diferentes técnicas de comutação, estratégias diversas de sobrevivência e conversão de comprimento de onda, e por último, foi estendida para lidar com restrições dinâmicas de camada física. Entre 2005 e 2015 a ferramenta foi utilizada em dezenas de artigos publicados em diferentes temas na área de comunicações ópticas:

- Sobrevivência: [63, 64]
- RWA com tráfego inicial offline e carga adicional online: [65, 66]
- Conversão de comprimento de onda: [21, 67–70]
- Comutação de rajadas ópticas: [69–77]
- Multiplexação por códigos ópticos: [71, 74–77]
- Redes ópticas sensíveis às degradações de camada física: [42, 61, 78, 79]

Para este trabalho foi desenvolvida uma nova versão da ferramenta, denominada SimRWA-IA. Foram incluídos os diversos elementos de rede apresentados no Capítulo 2, com suas respectivas modelagens. Além disso, implementamos novos algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda. Evoluímos também na modelagem das novas abordagens RWA, e inclusão de diversos novos parâmetros para monitoração do desempenho da rede.

A Figura A.1 apresenta a janela principal da ferramenta, onde o usuário pode definir a topologia de rede a ser avaliada.

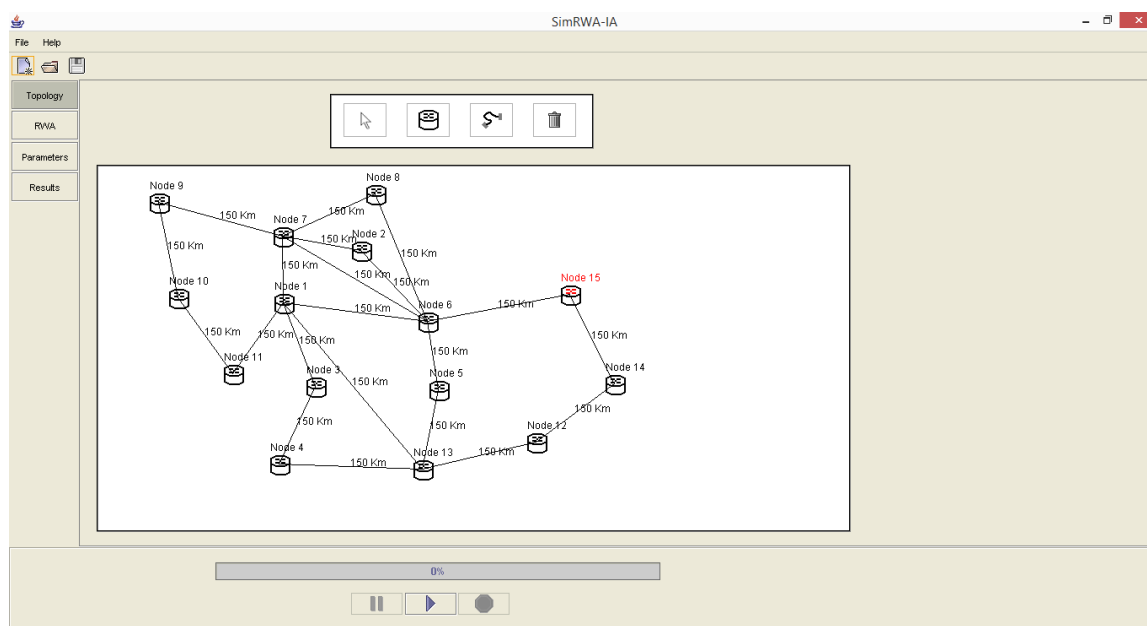


Figura A.1: Janela Topologia - SimRWA-IA.

O usuário possui dois elementos disponíveis na ferramenta para desenhar a topologia de rede: elemento nó; elemento enlace. Quando o usuário adiciona um elemento nó, a ferramenta entende que foi inserida na topologia um elemento ROADM de Grau N ($1 \leq N \leq 9$) com interfaces de Add/Drop para terminação de tráfego. Os elementos ROADM foram modelados de acordo com a arquitetura Broadcast&Select apresentada no Capítulo 2. Os módulos WSS foram modelados na configuração 9x1, e portanto, cada nó inserido na topologia suporta de 1 a 9 enlaces. Através de um duplo clique sobre o elemento nó o usuário terá acesso aos principais parâmetros de desempenho do ROADM para edição: fator de isolamento do módulo WSS (dB); perda de inserção nos modos Add, Drop e Passthrough (dB). Todos estes parâmetros possuem um valor padrão definido em linha de código.

Com relação ao elemento enlace, a ferramenta admite que cada enlace inserido na topologia pelo usuário é composto por um par de fibras de mesmo tamanho e utilizadas em sentidos opostos de transmissão para interligar dois elementos ROADM. Em cada sentido de transmissão são utilizados dois amplificadores por enlace, sendo um Amplificador *Booster*, posicionado logo após a interface de saída do elemento ROADM origem, e um Pré-Amplificador, posicionado ao final do enlace, imediatamente antes da interface de entrada do elemento ROADM destino. Através de um duplo clique sobre o enlace é possível configurar os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de atenuação da fibra (dB/Km);
- Tamanho do enlace (Km);

– Amplificador *Booster* e Pré Amplificador:

- * Ganho Mínimo (dB);
- * Ganho Máximo (dB);
- * Potência de Saída Máxima (dBm);
- * Potência de Entrada Mínima (dBm);
- * Figura de Ruído (dB).

Na segunda janela, apresentada na Figura A.2, o usuário escolhe os algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda que pretende adotar para a simulação. Além disso, o usuário deve escolher qual abordagem ao problema RWA pretende avaliar.

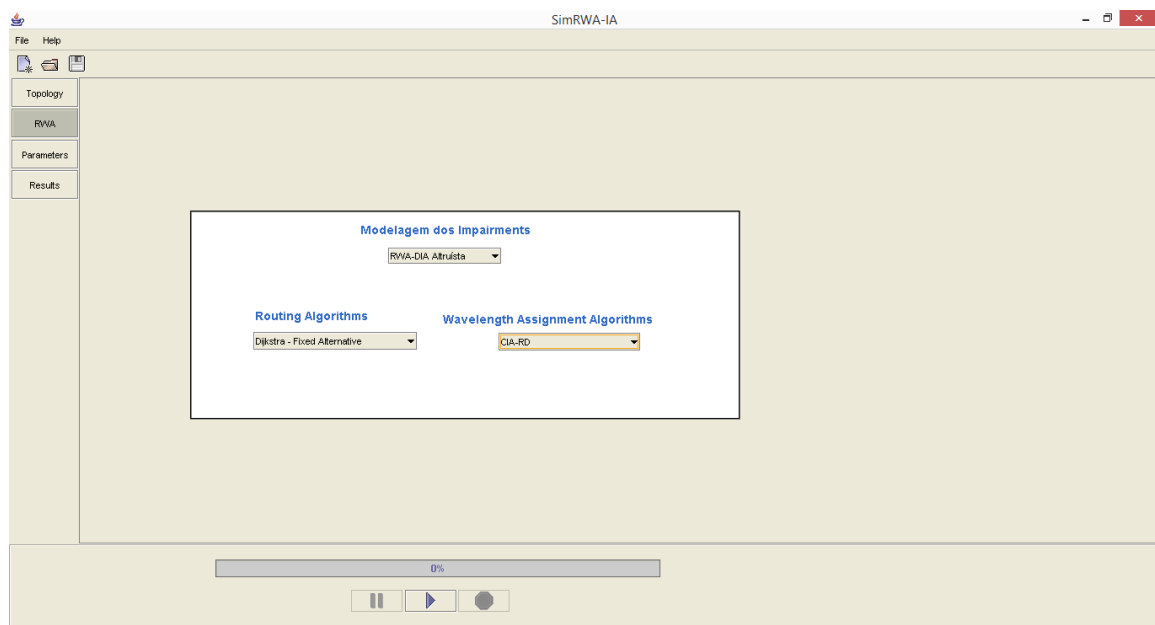


Figura A.2: Janela RWA - SimRWA-IA.

Na terceira janela, o usuário define parâmetros da rede óptica e parâmetros relacionados ao ambiente de simulação conforme pode ser observado na Figura A.3. A ferramenta ainda permite explorar diferentes cenários de conversão de comprimento de onda. Neste trabalho não exploramos os cenários com conversão de comprimento de onda.

Na última janela, o usuário pode acompanhar os resultados obtidos em tempo de simulação. A ferramenta também possibilita que o usuário exporte os resultados para um arquivo de texto. A Figura A.4 apresenta a tela de resultados da ferramenta.

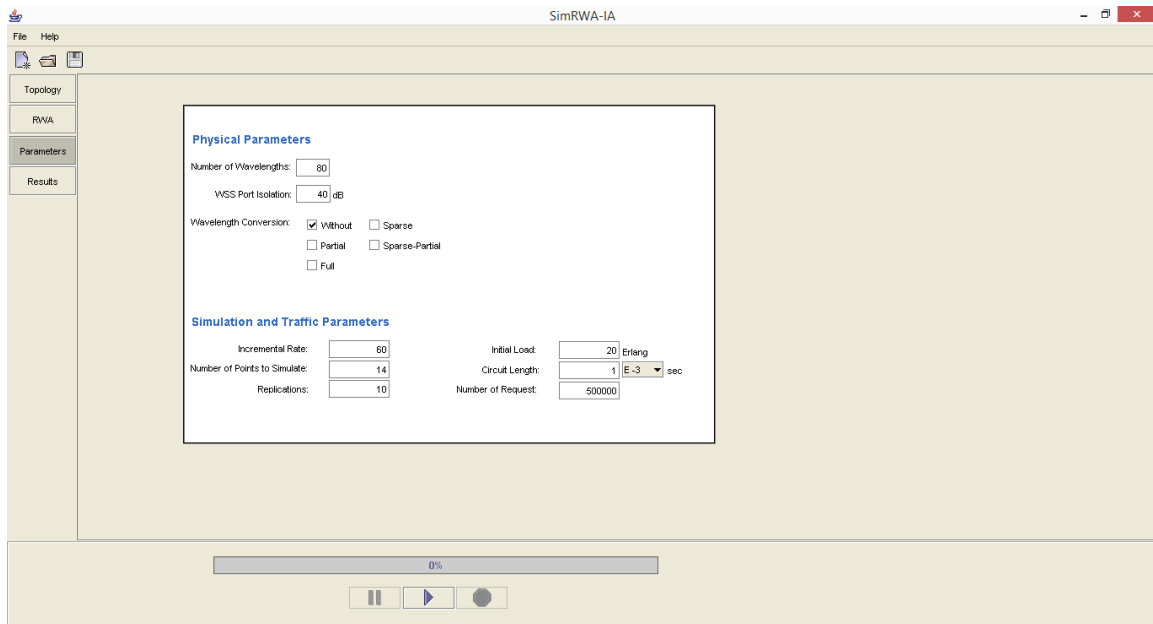


Figura A.3: Janela Parâmetros - SimRWA-IA.

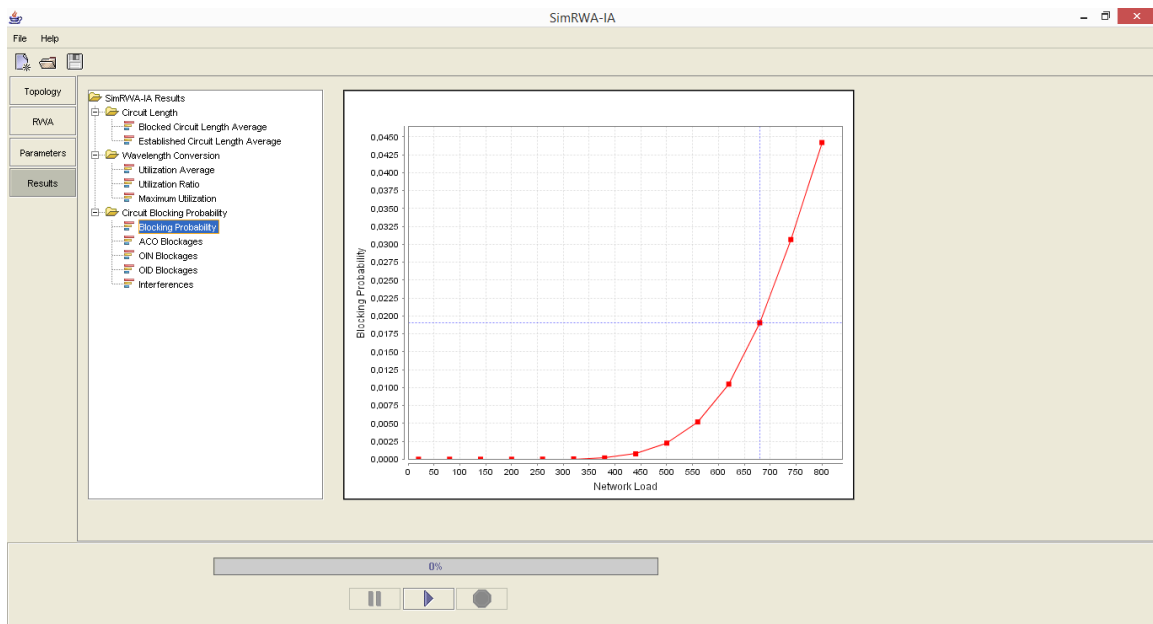


Figura A.4: Janela Resultados - SimRWA-IA.

APÊNDICE B

LISTA DE PUBLICAÇÕES

A seguir serão listados os artigos publicados durante o período de elaboração desta dissertação.

B.1 Artigos sobre RWA-DIA Altruísta e Algoritmo CIA

- 1) **J. MARANHÃO**, A. SOARES, H. WALDMAN, Wavelength Assignment in Optical Networks Considering Physical Impairments, *In: 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2010.*
- 2) **J. MARANHÃO**, A. SOARES, H. WALDMAN, Alocação de Comprimento de Onda em Redes Ópticas Considerando as Degradações de Camada Física, *In: 28º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2010.*
- 3) A. FONTILENE, I. SANTOS, **J. MARANHÃO**, F. MAZULLO, A. SOARES, A Solution to the MSCP Problem Considering Physical Layer Degradations in Transparent Optical Networks, *In: Proceedings of the 30th ACM Symposium on Applied Computing, 2015.*

B.2 Artigos sobre Amplificadores para Redes Reconfiguráveis

- 1) J. OLIVEIRA, A. CABALLERO, E. MAGALHÃES, U. MOURA, R. BORKOWSKI, G. CURIEL, A. HIRATA, L. HECKER, E. PORTO, D. ZIBAR, **J. MARANHÃO**, I. T. MONROY, OLIVEIRA, J. R., Demonstration of EDFA Cognitive Gain Control via GMPLS for Mixed Modulation Formats in Heterogeneous Optical Networks, *In: Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013.*