



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES

TESE DE DOUTORADO

Uma Abordagem para Provisão e Diferenciação de QoS Óptico na Presença de FWM em Redes Ópticas Transparentes

AUTOR: IGUATEMI EDUARDO DA FONSECA

ORIENTADOR: PROF. DR. HELIO WALDMAN - FEEC/UNICAMP

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. MOISÉS R. N. RIBEIRO - DEL/UFES

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Amílcar Careli César (EESC/USP - São Carlos)

Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar (DEE/UFMG - Campina Grande)

Prof. Dr. Edson Moschim (FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. João Marcos Travassos Romano (FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Maurício Ferreira Magalhães (FEEC/UNICAMP)

TESE APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO DA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

CAMPINAS, SÃO PAULO, BRASIL
19 DE ABRIL DE 2005

Este exemplar corresponde a versão final da tese
defendida por Iguatemi Eduardo da Fonseca
e aprovada pela Comissão
Julgada em 19/04/05
Helio Waldman
Orientador

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	
HUNICATIP	
F733a	
V	EX
TOMBO BCI	64369
PROC.	64-0006-09
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	19/06/09
Nº CPD	

BIBID - 353261

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F733a

Fonseca, Iguatemi Eduardo da
Uma Abordagem para Aprovisionamento e
Diferenciação de QoS Óptico na Presença de FWM em
Redes Ópticas Transparentes / Iguatemi Eduardo da
Fonseca. –Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientadores: Helio Waldman, Moisés Renato Nunes
Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telecomunicações – Redes de computação. 2. Fibras
ópticas. 3. Comunicações ópticas. 4. Ótica não-linear. I.
Waldman, Helio. II. Ribeiro, Moisés Renato Nunes. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Titulo em Inglês: A Methodology for Provisioning and Differentiation of
Optical QoS in FWM Impaired Transparent Optical
Networks

Palavras-chave em Inglês: Computer network telecommunication, Optical
fibers, Optical communications e Nonlinear
optics

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Amílcar Careli César, Marcelo Sampaio de Alencar,
Edson Moschim, João Marcos Travassos Romano e
Maurício Ferreira Magalhães

Data da defesa: 19/04/2005

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hélio Waldman, um agradecimento especial por ter contribuído com a formação de várias gerações de pesquisadores. Cito, o orientador do meu Mestrado (Edson Moschim) – correspondendo a uma geração; o co-orientador desta Tese (Moisés R. N. Ribeiro) – correspondendo a outra geração; e uma terceira geração na qual estou inserido;

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Moisés R. N. Ribeiro pela sua orientação, pelas muitas horas de discussão via Internet e, quando possível, pessoalmente, o que levou ao aperfeiçoamento do nosso trabalho, contribuindo à minha formação profissional e acadêmica;

Ao amigo Raul Camelo pelos trabalhos desenvolvidos em conjunto;

Aos amigos da OptiNet: Agostinho, Darli, Divanílson, Filipe, Gustavo Pavani, Gustavo Quitério, Jefferson, Karcius, Márcio, Rafael e Renato; e aos amigos Eric Fagotto, José Patrocínio, Marcelo Abbade e Ricardo Braga, pelos momentos de descontração;

À Eloísa e à Celi pelo suporte;

Aos demais colegas e funcionários da FEEC, em que, cada um, da sua forma contribuíram para a minha formação acadêmica;

À CAPES e à Ericsson do Brasil pelo apoio financeiro;

Por fim, mas não menos importante, à UNICAMP, por ter me aceito como parte do seu corpo discente.

A Deus

Obrigado, senhor, pela luz que nos tem iluminado, pelo tanto que nos tem abrigado, pelas estrelas, pelo silêncio, pela graça e pela vida.

Aos meus pais, Adauto Daniel e Francisca
Leonice, que sempre prezaram pelo meu
futuro,
Aos meus irmãos Alan Kardec, Daniel
Antônio,
E à minha irmã Maria Gardênnia sempre
presente durante a minha vida acadêmica;
À Paula Rubya, pelo carinho e apoio nos
momentos difíceis.

RESUMO

Esta Tese propõe estratégias para o provimento de QoS óptico diferenciado em redes ópticas transparentes sob a influência do efeito não-linear de Mistura de Quatro Ondas em um cenário no qual redes clientes, como IP/MPLS e SDH, solicitam dinamicamente caminhos ópticos. Tais conexões são regidas por contratos de serviço óptico e para atender aos níveis de desempenho acordados com as redes clientes, propomos o uso de mecanismos de Controle de Admissão de Chamadas (CAC) integrados aos algoritmos de Atribuição de Rota e Comprimento de Onda (RWA). A estratégia adotada nesta Tese parte de uma abordagem conservadora para permitir que as propostas de redução de complexidade do CAC/RWA sejam propriamente avaliadas usando métricas desenvolvidas neste trabalho. Os resultados obtidos destacam a interdependência de três grandezas: nível de QoS experimentado pelas redes clientes, volume total de tráfego atendido pela rede óptica e complexidade dos algoritmos. Nesta direção, a principal contribuição da Tese é CAC/RWA's com baixíssima complexidade que se mostram eficientes no provimento de QoS sob uma limitação de camada física muito complexa, no cenário de rede com ou sem diferenciação de serviço óptico.

Palavras-chave: Redes Ópticas, Algoritmos de Alocação de Rota e Comprimento de Onda, Limitações da Camada Física, Mistura de Quatro Ondas, Diferenciação de QoS Óptico.

ABSTRACT

This Thesis proposes methodologies for differentiated optical QoS in a multi-client scenario, in which client networks (e.g. IP/MPLS and SDH) dynamically request lightpaths from a transparent optical network in which Four-Wave Mixing (FWM) imposes crosstalk among lightpaths. In order to meet Optical Service Level Agreement (OSLA), it is proposed an integrated approach towards Connection Admission Control (CAC) and Routing and Wavelength Assignment (RWA) algorithms. The strategy used in this Thesis includes a progressive approach from complex to simple algorithms to properly assess the simplified control of FWM through new metrics such as Probability of Threshold Violation (TVP). In addition, it is shown that very simple CAC/RWA can be used to provide Differentiated Services. Results highlight the trade-off among three parameters: QoS levels required by client networks, total traffic transported through optical network, and complexity of QoS algorithms. Therefore, the main contribution lies in low complexity CAC/RWA algorithms to tackle a very complex physical impairment, even encompassing scenarios with differentiated requirements for OSLA.

Keywords: Optical Networks, Routing and Wavelength Assignment Algorithms, Physical Impairments, Four Wave Mixing, Optical QoS Differentiation.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
SUMÁRIO	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS	xiv
LISTA DOS PRINCIPAIS ACRÔNIMOS	xvi
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Proposta de Pesquisa	5
1.2.1 Cenário Considerado	5
1.2.2 Caracterização da Proposta de Pesquisa	10
1.3 Visão Geral da Tese	13
1.4 Principais Contribuições da Tese	15
CAPÍTULO 2 – Redes Clientes e a Camada Física	17
2.1 Redes Clientes	18
2.2 Elementos da Rede Óptica e suas Limitações	22
2.2.1 Terminais Ópticos de Linha	22
2.2.2 Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação (OADM)	23
2.2.3 Chaves Ópticas (OXC)	24
A) Limitações Impostas à Rede	26
2.2.4 Amplificadores Ópticos	27
A) Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE)	27
2.2.5 Fibra Óptica Monomodo	29
2.3 A Camada Física e suas Limitações	30
2.3.1 Propagação de Sinais em Fibras Ópticas Monomodo	30
A) Atenuação	32

b)	Efeitos Dispersivos ou Dispersão Cromática	33
c)	Modulação Cruzada de Fase e Auto Modulação de Fase	37
d)	Espalhamento Estimulado de Raman, Espalhamento Estimulado de Brillouin e Self-Steepening	38
2.3.2	Mistura de Quatro Ondas	39
A)	Caracterização	39
b)	Impacto sob a Transmissão de Sinais pela Fibra Óptica	43
c)	Técnicas de Minimização do FWM	45
2.3.3	Efeitos não Previstos pela NLSE	47
A)	Dispersão de Modo de Polarização	47
2.4	Visibilidade da Camada Física pela Rede Cliente	49
2.4.1	Modelo de Inclusão do FWM	50
2.5	Sumário	54
 Capítulo 3 – Qualidade de Serviço Óptico: Controle de Admissão, Roteamento e Atribuição de Comprimento de Onda		55
3.1	Propostas de Métricas de Desempenho	56
3.1.1	Probabilidade de Bloqueio e Equidade	56
3.1.2	Camada Física, Controle de Admissão e Nível de Serviço	56
3.1.3	Probabilidade de Violação de Limiar e Probabilidade de Violação Crítica	58
A)	Probabilidade de Violação de Limiar	58
B)	Probabilidade de Violação Crítica	59
3.2	Estudo de Caso: Redes Limitadas por FWM	59
3.2.1	Avaliação do Impacto do FWM sobre o QoS Óptico	61
3.3	CAC/RWA para Aprovisionamento e Manutenção de QoS Óptico	67
3.3.1	Algoritmos Egoístas	67
A)	Algoritmo MinFWM	70
B)	Algoritmo FWM-WA-RD	70
C)	Algoritmo FWM-WA-FF	70
3.3.2	Resultados Numéricos	70
A)	Probabilidade de Bloqueio	70
B)	Limites do Uso dos CAC/RWA's Egoístas	73
3.4	QoS Determinístico e os Algoritmos do Tipo Busca Completa	74
3.4.1	Algoritmo Ético (Strict)	74
3.4.2	Resultados Numéricos	76

A)	Probabilidade de Bloqueio	78
B)	Eqüidade (Fairness)	78
C)	Impacto do FWM sobre o Desempenho da Rede	82
3.5	Sumário	83
 Capítulo 4 – Propostas para Redução de Complexidade		85
4.1	CAC/RWA com Busca Relaxada	86
4.1.1	Resultados Numéricos	88
4.1.2	Análise de Complexidade e Perspectiva Prática	92
4.2	Geração de Listas Otimizadas para o Algoritmo FWM-Cego	93
4.2.1	Listas Baseadas em Análise de Enlace	95
A)	WAUS (Wavelength Assignment under Unequal Spacing)	95
B)	LILA (Least Impaired under Link Analysis)	96
4.2.2	Listas Baseadas em Simulação de Rede (Cálculo <i>off-line</i>)	96
A)	MUSA (Most Used under Strict Assignment)	97
B)	LIRA (Least Impaired under Random Assignment)	97
4.2.3	Desempenho das Listas Otimizadas	98
A)	TVP, CVP e Probabilidade de Bloqueio	98
B)	Análise Comparativa entre o Desempenho das Listas	102
4.3	Sumário	105
 Capítulo 5 – Implementação e Avaliação de Diferenciação Óptica de Serviço		107
5.1	Trabalhos Prévios	108
5.2	Mecanismos para Diferenciação de QoS Óptico	109
5.2.1	Isolamento Total de Classes (FCI – Full Class Isolation)	113
5.2.2	Isolamento Parcial da Classe_1 (PC1 – Partial Class_1 Isolation)	113
5.2.3	Isolamento Parcial da Classe_1 com Bloqueio Preventivo (PC1-PB – Partial Class_1 Isolation with Preventive Blocking)	114
5.2.4	Nenhum Isolamento de Classes com Bloqueio Preventivo (NCI-PB – No Class Isolation with Preventive Blocking)	115
5.3	Resultados Numéricos	116
5.3.1	Ponto de Vista do Cliente	117
5.3.2	Ponto de Vista da Vazão da Rede	122
5.4	Figura de Mérito da Rede: Regiões de Viabilidade de OSLA's	124

5.4.1	Resultados Numéricos	127
5.5	Sumário	131
Capítulo 6 – Conclusão e Trabalhos Futuros		133
6.1	Sumário da Tese	133
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	136
Referências Bibliográficas		137
Apêndice 1: Publicações		145
Apêndice 2: Ambiente de Simulação		147

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1	Diagrama de classificação geral das redes ópticas	9
Fig. 1.2	Diagrama de relacionamento entre os algoritmos	16
Fig. 2.1	Visão Multi-Cliente: o plano de controle faz a interface entre as redes clientes e a rede óptica	20
Fig. 2.2	Interligação de clientes IP e SONET/ SDH com a rede óptica com uma representação física dos elementos da rede óptica	21
Fig. 2.3	Diagrama de blocos de um OLT	22
Fig. 2.4	Arquiteturas de OADM's. a) Arquitetura Paralela b) Arquitetura Serial	23
Fig. 2.5	Representação funcional um OXC	24
Fig. 2.6	Configurações de OXC's	26
Fig. 2.7	Simulações para a propagação de pulsos gaussianos, sob regime de dispersão de primeira ordem	36
Fig. 2.8	Ilustração da geração da interferência (<i>crosstalk</i>) FWM	43
Fig. 2.9	Ilustração da geração da interferência (<i>crosstalk</i>) FWM em um sistema WDM desigualmente espaçado	46
Fig. 2.10	Ilustração da técnica de alocação desigualmente espaçada	46
Fig. 2.11	a) Interligação entre as camadas clientes, de rede e física. b) Interação entre os caminhos ópticos c) Rede hipotética com um enlace sob análise	51

	Ilustração da violação do BER_{TH} quando uma nova conexão é ativada na rede. a) BER das conexões antes da ativação de uma nova conexão. b) BER depois da ativação	59
Fig. 3.1		
Fig. 3.2	Análise de um enlace da rede sob influência do FWM	60
Fig. 3.3	Fluxograma do Algoritmo FWM-Cego	63
Fig. 3.4	Topologias Simuladas. a) Rede irregular com $N = 19$ nós; b) Rede quase regular com $N = 9$ nós. Cada enlace tem 100 km de distância. Note que as figuras não estão em escala.	63
Fig. 3.5	TVP para o Algoritmo FWM-Cego	64
Fig. 3.6	Número de conexões sem QoS – Algoritmo FWM-Cego @ 0 dBm, Grade de 50 GHz e 80 Er	65
Fig. 3.7	CVP para o Algoritmo FWM-Cego	66
Fig. 3.8	a) Ilustração das políticas de cálculo do ruído FWM. b) Fluxograma do CAC/RWA Egoísta	68
Fig. 3.9	Processo de admissão de uma requisição sob um CAC/RWA Egoísta	69
Fig. 3.10	Desempenho dos CAC/RWA`s Egoístas. a-b) Grade de 50 GHz; c-d) Grade de 100 GHz; e-f) Grade de 200 GHz	71
Fig. 3.11	Desempenho dos CAC/RWA`s Egoístas para $W=12$	72
Fig. 3.12	TVP para o algoritmo MinFWM	73
Fig. 3.13	CAC/RWA Ético	75
Fig. 3.14	Ilustração do conceito de margem usada pelo CAC/RWA Ético	76

Fig. 3.15	Desempenho dos CAC/RWA Ético, Egoísta e FWM-Cego	77
Fig. 3.16	Análise do Fairness dos CAC/RWA`s – Grade de 50 GHz	80
Fig. 3.17	Análise do Fairness dos CAC/RWA`s – Grade de 100 GHz	81
Fig. 3.18	a) TVP e b) Prob. de Bloqueio: FWM-Cego e Ético. Rede com 19 nós	82
Fig. 3.19	a) TVP e b) Prob. de Bloqueio: FWM-Cego e Ético. Rede com 9 nós	83
Fig. 4.1	CAC/RWA Relaxado	88
Fig. 4.2	Comparação de desempenho entre os CAC/RWA's	89
Fig. 4.3	Bloqueio de acordo com o tamanho da conexão: CAC/RWA Relaxado	90
Fig. 4.4	Variação do Comprimento de Interferência. Grade de 100 GHz @ 4 dBm @ 80 Er	91
Fig. 4.5	Probabilidade de Violação Crítica (CVP) CAC/RWA Relaxado	92
Fig. 4.6	CAC/RWA <i>First-Fit</i> com Listas Otimizadas	94
Fig. 4.7	Exemplo da geração da lista LILA para grade de 100 GHz @ 4 dBm @ $W = 8$	96
Fig. 4.8	Probabilidade de Violação de Limiar. Grade de 50 GHz @ 0 dBm @ 80 Er	99
Fig. 4.9	Probabilidade de Violação de Limiar. Grade de 100 GHz @ 4 dBm @ 80 Er	99
Fig. 4.10	Probabilidade de Violação Crítica. Grade de 50 GHz @ 0 dBm @ 80 Er	100

Fig. 4.11	Probabilidade de Bloqueio. Grade de 50 GHz @ 0 dBm @ 80 Er	100
Fig. 4.12	Probabilidade de Bloqueio. Grade de 100 GHz @ 4 dBm @ 80 Er	101
Fig. 4.13	Freqüência de alocação de cada comprimento de onda: $p_\lambda(\lambda=\lambda_i)$ para MUSA	103
Fig. 4.14	TVP por comprimento de onda para a lista LIRA: TVP_{λ_i} para LIRA	103
Fig. 5.1	CAC's com diferenciação óptica de serviços: TVP mútuo	111
Fig. 5.2	CAC/RWA's para diferenciação óptica de serviços	112
Fig. 5.3	Mecanismo de controle de congestionamento através de bloqueio preventive	115
Fig. 5.4	Probabilidade de bloqueio por Classe para o CAC/RWA FCI	118
Fig. 5.5	Probabilidade de bloqueio por Classe. a) e b) Pb_Cl1 ; c) e d) Pb_Cl2 . Escala Logarítmica	119
Fig. 5.6	Probabilidade de Violação de Limiar. Escala Logarítmica	120
Fig. 5.7	Probabilidade de Violação Crítica. Escala Logaritma	121
Fig. 5.8	Vazão da Rede @ $W=10$. Escala Linear	123
Fig. 5.9	Vazão da Rede @ $W=16$. Escala Linear	124
Fig. 5.10	Ilustração para a Figura de Mérito	126
Fig. 5.11	Figura de Mérito. Escala Linear	129
Fig. 5.12	Figura de Mérito CAC/RWA FCI: análise da relação de custo entre Er de cada classe de serviço	130

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

$A, A(t,z)$	Amplitude (do campo elétrico da envoltória sobre f_i) do pulso óptico
A_{eff}	Área efetiva da fibra óptica
c	Velocidade da luz
Cl_1	Classe_1
Cl_2	Classe_2
D	Dispersão cromática da fibra óptica
$D_c(\lambda)$	Dispersão cromática da fibra óptica variando com o comprimento de onda
D_{PMD}	Parâmetro de PMD da fibra
$\vec{E}(\vec{r}, t)$	Campo Elétrico
f_c	Frequência da portadora do sinal óptico
f_{ijk}	Frequência do produto FWM
h	Constante de Plank
H	Número de <i>hops</i> ou saltos de uma rota na rede óptica
L	Comprimento de um enlace óptico ou distância entre dois nós de uma rede óptica
L_D	Comprimento de dispersão de primeira ordem
L'_D	Comprimento de dispersão de segunda ordem
L_{int}	Comprimento de interferência
N	Número de nós da rede óptica
NP_{FWM}	Número de produtos FWM
n_2	Coefficiente de índice não-linear
N_{FWM}	Batimento sinal-ruído FWM
p	Proporção de conexões Cl_1 presentes na rede
Pb_Cl1	Probabilidade de bloqueio Cl_1
Pb_Cl2	Probabilidade de bloqueio Cl_2
P_{DN}	Potência do ruído FWM na recepção acumulada sobre um caminho óptico ao longo de uma rota na rede
P_{FWM}	Potência de um produto FWM gerado em um enlace sobre a frequência f_{ijk}

P_i	Potência do canal i no início da fibra ou em $z=0$
$\vec{P}_L(\vec{r}, t)$	Polarização linear
$\vec{P}_{NL}(\vec{r}, t)$	Polarização não-linear
P_0	Potência de pico do pulso óptico
P_S	Potência do sinal óptico na recepção
Q	Fator Q
R_0	Responsividade do receptor óptico
R	Número de menores rotas
S_0	Inclinação da curva de dispersão cromática da fibra óptica
t	Tempo
T	Vazão da rede (<i>throughput</i>)
T_0	Duração do pulso óptico
v_g	Velocidade de grupo
W	Número de canais em um enlace óptico ou número de comprimentos de onda operando na rede óptica
W_A	Número de comprimentos de onda ativos (em uso) em uma dada rota
z	Distância de propagação de um canal em um enlace óptico
α	Atenuação da fibra óptica
β_2	Dispersão de primeira ordem
β_3	Dispersão de segunda ordem
δ	Fator de degenerescência
$\Delta k, \Delta k'$	Fator de casamento de Fase entre os canais
$\Delta\tau$	Valor médio da distribuição de Maxwell ou atraso diferencial médio entre os dois estados de polarização
λ_i	Comprimento de onda i
λ_0	Comprimento de onda de dispersão nula da fibra óptica
η	Fator de eficiência do efeito de FWM
τ_1	Tráfego Cl_1
τ_2	Tráfego Cl_2
γ	Coefficiente não-linear da fibra óptica

LISTAS DOS PRINCIPAIS ACRÔNIMOS

ASE	Ruído de Emissão Espontânea Amplificada
ASON	<i>Automatically Swiched Optical Networks</i>
BER	Taxa de Erro de Bit
CAC	Controle de Admissão de Chamadas
CR-LDP	<i>Constraint-based Routing Label Distribution Protocol</i>
CVP	Probabilidade de Violação Crítica
CW	Canais Contínuos
dEXC	Defeitos por Erro Excessivo
DiffServ	Serviços Diferenciados
DSF	Fibras de Dispersão Deslocada
DWDM	Multiplexação por Comprimento de Onda Densa
EDFA	Amplificadores Ópticos à Fibra Dopada com Érbium
FCI	Isolamento Total de Classes
FWM	Mistura de Quatro Ondas
GMPLS	<i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i>
HNL-DSF	Fibra Altamente Não-Linear de Dispersão Deslocada
IntServ	Serviços Integrados
IS-IS	<i>Interior System to Interior System</i>
LCAF	Fibras com Larga Área Efetiva
LILA	<i>Least Impaired under Link Analysis</i>
LSP	Caminho Chaveado por Rótulo
LIRA	<i>Least Impaired under Random Assignment</i>
LMP	Protocolo de Gerenciamento de Enlace
LRM	Protocolo Gerenciador de Recursos de Enlace
MI	Instabilidade Modulacional
MUSA	<i>Most Used under Strict Assignment</i>
NCI-PB	Nenhum Isolamento de Classes com Bloqueio Preventivo

NLSE	Equação Não-Linear de Schrödinger
NZDF	Fibras com Dispersão Não-Nula
OADM	Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação
O-E-O	Conversão Óptica-Elétrica-Óptica
OFEC	Classes de Equivalência de Serviço Óptico
OLT	Terminais Ópticos de Linha
OOK	<i>On-Off Key</i>
OPM	Monitoramento Óptico de Performance
OSLA	Contrato de Serviço Óptico
OSNR	Relação Sinal Ruído Óptica
OSPF-TE	<i>Open Shortest Path First – Traffic Engineering</i>
OXC	Chaves ou Comutadores Ópticos
PCI	Isolamento Parcial da Classe_1
PCI-PB	Isolamento Parcial da Classe_1 com Bloqueio Preventivo
PMD	Dispersão de Modo de Polarização
QoS	Qualidade de serviço
RD	Algoritmo Aleatório
RSVP-TE	<i>Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering</i>
RWA	Algoritmo de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda
SBS	Espalhamento Estimulado de Brillouin
SOA	Amplificadores Ópticos a Semicondutores
SPM	Auto Modulação de Fase
SRS	Espalhamento Estimulado de Raman
STDF	Fibra Óptica Padrão
TVP	Probabilidade de Violação de Limiar
WA	Algoritmos de Alocação de Comprimento de Onda
WAUS	<i>Wavelength Assignment under Unequal Spacing</i>
WDM	Multiplexação por Comprimento de Onda
WRN	Nós Capazes de Fazer Roteamento
XPM	Modulação Cruzada de Fase

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Internet vem desempenhando um papel crucial na sociedade: o *e-mail* e a tecnologia de voz sobre Protocolo *Internet* (IP – *Internet Protocol*) já permitem comunicação global e instantânea a baixo custo, o *e-commerce* torna possíveis as relações comerciais seguras via computador e o *e-gov* propicia uma relação mais fácil e transparente entre governo e cidadão. A exigência imposta sobre a infra-estrutura de comunicações pela popularização dessas aplicações leva ao conceito de Redes de Próxima Geração, que deverão ser capazes de dar suporte a um tráfego heterogêneo composto por voz, dados e vídeo oferecendo a qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) exigida para cada aplicação particular. As redes ópticas são as únicas com largura de banda suficiente para suportar o volume de tráfego exigido pelas Redes de Próxima Geração. Todavia, a grande maioria dos sistemas ópticos atualmente em operação utiliza a Hierarquia Digital

Síncrona/Rede Óptica Síncrona (SDH/SONET – *Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Network*), adequado à transmissão do tráfego de voz por oferecer comutação por circuito e proteção. Entretanto, tais redes não serão capazes de fluir o volume de tráfego no futuro – o qual espera-se ser mais intenso e dinâmico, pois empregam muito processamento eletrônico e, com isso, criam um gargalo eletrônico. A utilização de processamento eletrônico também significa que redes SDH/SONET ainda são opacas, i.e., são baseadas em conexões ópticas terminadas em cada nó da rede por algum tipo de equipamento que realiza conversão eletro-óptica e vice-versa (O-E-O – *Optical-to-Electrical-to-Optical*). Por causa do seu alto custo, dependência a taxa de transmissão de bits e formato de modulação, conversão O-E-O pode limitar a evolução e flexibilidade da rede de próxima geração [1].

É esperado que redes ópticas transparentes surjam a partir da introdução de chaves ópticas (OXC - *Optical Crossconnect*) em alguns nós das redes opacas de tal forma que domínios de transparência sejam formados. Com isso acredita-se que a próxima geração de redes será caracterizada por domínios de transparência, i.e. existirá sub-redes totalmente ópticas tendo em suas bordas elementos que realizam O-E-O. Dentro desses domínios de transparência a qualidade fim-a-fim das conexões precisa ser preservada por causa das aplicações que estão sendo transportadas por tais conexões. Mas, para que isso possa ser contemplado deve existir um mecanismo de Controle de Admissão de Chamadas (CAC - *Connection Admission Control*) que seja capaz de gerenciar a degradação sofrida por um pedido de conexão que chega à rede óptica de forma que os níveis de QoS exigidos pelas aplicações das redes clientes sejam atendidos. Tais níveis de QoS são acordados entre a rede óptica e as redes clientes a partir de um Contrato de Serviço Óptico (OSLA – *Optical Service Level Agreement*), no qual o desempenho desejado para cada aplicação ou classe de serviço é estabelecido a partir de parâmetros como Taxa de Erro de Bit (BER – *Bit Error Rate*), probabilidade de bloqueio experimentado por determinada classe de serviço na rede, entre outros.

Para que o CAC possa conferir o atendimento ou não aos parâmetros presentes no OSLA é necessário que ele possua ligação direta com o plano de controle da rede óptica e das redes clientes. Tal ligação é necessária, pois para verificar se a nova conexão irá afetar o desempenho de outras conexões já ativas na rede e também se a nova conexão atende aos

requisitos de QoS exigidos pelo cliente, o CAC precisa conhecer, por exemplo, os estados dos enlaces por onde vai passar a nova conexão. Embora um considerável esforço de padronização em busca da melhor solução para plano de controle esteja sendo feito por organismos internacionais como: *International Telecommunications Union* (ITU-T), *Internet Engineering Task Force* (IETF) e *Optical Internetworking Fórum* (OIF); ainda não existe consenso sobre qual o padrão mais apropriado dentre o proposto *Generalized Multiprotocol Label Switching* (GMPLS) e a arquitetura proposta pelo ITU chamada de *Automatically Swiched Optical Networks* (ASON). Recentemente, foi publicada uma solução onde se utiliza o GMPLS junto com o ASON simultaneamente [2]. Mas um longo caminho ainda precisa ser percorrido até os principais problemas serem sanados, como por exemplo, até o momento o GMPLS não contempla a avaliação da qualidade do sinal óptico [3]. Adicionalmente, métodos propostos para redes IP, i.e. Serviços Integrados (IntServ) [4] e Serviços Diferenciados (DiffServ) [5], dificilmente poderão ser integrados com redes totalmente ópticas. Enquanto redes IP são baseadas no modelo de comutação por pacotes armazena-e-encaminha (*Store-and-Forward*), redes totalmente ópticas são, atualmente, baseadas em comutação por circuito com caminhos ópticos de alta capacidade [1], [6].

Neste contexto, o problema de fornecer QoS em redes totalmente ópticas continua sem solução, especialmente num cenário com múltiplas classes de serviço [7]. Reserva de largura de banda, probabilidade de perdas de pacotes, atraso e variação do atraso (*jitter*) são os parâmetros de QoS considerados do ponto de vista fim-a-fim das redes comutadas por pacotes (por exemplo, Redes IP) [8]. Atualmente, valores estáticos da Taxa de Erro de Bit (BER - *Bit Error Rate*) na camada física são adotados já que os roteadores IP são conectados por meio de redes ópticas estáticas e opacas. Entretanto, percebe-se que variações na relação sinal ruído óptica (OSNR - *Optical Signal Noise Ratio*) podem acontecer em cenários de redes ópticas transparentes dinâmicas, pois interações entre as conexões da rede (*lighpaths* ou caminhos ópticos) acontecem devido aos efeitos não-lineares da fibra – como por exemplo, Mistura de Quatro Ondas (FWM - *Four-Wave Mixing*) e Modulação Cruzada de Fase (XPM - *Cross-Phase Modulation*) e de mudança de ganho dos amplificadores e Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) em função da potência dos canais – gerando interferência (*crosstalk*) e conseqüentemente degradando a OSNR. Esses efeitos são os principais

limitantes da capacidade dos sistemas ópticos [9] – [11] e podem afetar drasticamente os parâmetros de QoS considerados nas redes da seguinte forma:

- a) A qualidade das conexões ativas na rede pode ser tão afetada que Protocolos de Gerenciamento de Enlaces (LMP - *Link Management Protocols*) podem disparar mecanismos de detecção de falhas [12] ou Defeitos por Erro Excessivo (dEXC - *Excessive Error Deffect*) podem ser detectados pelas redes clientes SDH/SONET [13].
- b) Variações na BER, como resultado de variações na OSNR, podem ocorrer quando outras conexões são ativadas e desativadas na rede óptica. Isto pode ter impacto direto na probabilidade de perda de pacotes do tráfego IP transportado pela rede em um dado caminho óptico, enquanto que atraso e variação do atraso podem ser indiretamente afetados pela variação da BER das conexões da rede óptica devido aos mecanismos de controle de fluxo e erro presentes na Camada de Transporte (por exemplo, TCP - *Transmission Control Protocol*).

Neste cenário, propõe-se que mecanismos de Controle de Admissão de Chamadas integrados com o algoritmo de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*), denotado por CAC/RWA, devam existir para que se forneça níveis adequados de QoS óptico para as conexões da rede óptica em consonância com as necessidades dos seus clientes [14], [15].

Trabalhos recentes têm também apontado para a necessidade do Monitoramento Óptico de Desempenho (OPM - *Optical Performance Monitoring*) em redes ópticas transparentes [16]. Os CAC/RWA's propostos nesta Tese podem também contribuir para o OPM por meio de métricas específicas concebidas para se avaliar o desempenho de tais CAC/RWA's e também podem ser empregados no gerenciamento de falhas causadas por degradações da qualidade do sinal óptico.

Diante do quadro traçado nesta seção, a evolução das redes ópticas rumo à integração com as Redes Clientes de Próxima Geração é portanto uma área de pesquisa estratégica e figura no estado-da-arte da pesquisa em redes ópticas [17].

1.2 PROPOSTA DE PESQUISA

1.2.1. Cenário Considerado

A Fig. 1.1 traz um diagrama mostrando uma ampla classificação dos tópicos de investigação em redes ópticas de acordo com temas principais como: gerenciamento, dinâmica de tráfego, roteamento, QoS óptico, visibilidade da camada física e transparência. Os itens em destaque são os que são considerados nesta Tese.

- a) *Gerenciamento*: No processo de estabelecimento e encerramento de requisições oriundas das redes clientes existe um mecanismo de gerenciamento de conexão. Como visto no diagrama da Fig. 1.1, o plano de controle, o qual é o responsável por tomar as “providências” para tentar servir uma requisição da rede cliente, pode implementar dois métodos de controle: o centralizado e o distribuído. Muitos trabalhos da literatura comparam as vantagens e desvantagens destas estratégias de acordo com critérios como: utilização do enlace e vazão (*throughput*) da rede, padrão dinâmico de tráfego, extensibilidade (*scalability*), probabilidade de bloqueio, entre outros [18], [19]. O controle centralizado possui vantagens com relação ao distribuído, como: menor probabilidade de bloqueio (dependendo da dinâmica do tráfego), mais simples para controlar e mais conveniente para redes de pequena escala. Algumas desvantagens são: é mais vulnerável a falhas, pois concentra o controle em um único ponto, o controlador pode se tornar um gargalo computacional para redes de grande escala, com carência de extensibilidade (*scalability*) e interoperabilidade [20]; além disso, geração de grande volume de tráfego para atualização da topologia e do estado da rede pode acontecer.
- b) *Dinâmica dos caminhos ópticos*: Como visto na Fig. 1.1, as demandas oriundas das redes clientes podem ser geradas de forma dinâmica ou estática. Nas primeiras redes usando Multiplexagem por Divisão em Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), os caminhos ópticos eram permanentes ou manualmente reconfigurados. Por esta razão, muitos estudos e investigações sobre redes estáticas foram realizados e, na sua maioria, tinham como objetivo fornecer um projeto ótimo e dimensionamento da camada

óptica para dar suporte a um determinado padrão (matriz) de tráfego estático, tentando minimizar o número de comprimentos de onda ou fibras na rede [21] – [24]. Entretanto, a tendência é que uma dinâmica de tráfego aconteça na rede devido a motivos como: o surgimento de novas aplicações multimídia na Internet; a existência de um esforço considerável para se consolidar o IP sobre WDM [25], [26]; mecanismos de proteção e restauração que também podem fornecer algum dinamismo no tráfego. O comportamento da demanda por caminhos ópticos sobre a rede óptica pode ser estudada com tráfego dinâmico, em que caminhos ópticos são ativados e desativados ao longo do tempo enquanto no estudo com tráfego incremental as demandas ocupam os caminhos ópticos permanentemente.

- c) *Roteamento e atribuição de comprimento de onda*: Como vimos anteriormente, o problema de estabelecimento de conexões em redes ópticas inclui o uso de um algoritmo RWA. Este algoritmo decompõe o roteamento e atribuição de comprimento de onda em dois problemas: a determinação da rota por onde uma requisição deve ser estabelecida e, em seguida, a atribuição do comprimento de onda a ser utilizado. Como visto no diagrama da Fig. 1.1, heurísticas como *First-Fit* [27], Aleatória [28], *Most-Used* [29], *Max-Sum* [30], etc, são usadas para a atribuição do comprimento de onda a um caminho óptico. Do ponto de vista de roteamento, os algoritmos podem ser classificados em Dinâmicos e Fixos [31]. No roteamento Fixo, a(s) rota(s) entre uma origem e um destino é (são) calculada(s) de forma *off-line* e fica(m) armazenada(s) em uma matriz de rotas. Assim, cada novo caminho óptico requisitado que chega na rede é sempre roteado pela mesma rota, o qual está armazenada na matriz de rotas. Um exemplo é o algoritmo de roteamento Fixo de menor caminho, no qual a rota para um dado par origem-destino é calculada *off-line* por um algoritmo de menor caminho padrão, como o algoritmo de Dijkstra [32]. Assim, qualquer novo caminho óptico entre dois determinados nós da rede é sempre roteado de acordo com a rota previamente calculada. Diferentemente do roteamento Fixo, no roteamento Dinâmico, a rota é calculada de forma *on-line* e depende do estado da rede, o qual é

determinado pelo conjunto de todas as conexões ativas na rede no momento da chegada de uma requisição. Da mesma forma que no Fixo, no roteamento Dinâmico estratégias de roteamento pelo menor caminho e pelo conjunto das k -ésimas menores rotas podem ser empregadas.

- d) *Transparência*: Do ponto de vista de transparência as redes ópticas são classificadas em opacas e transparentes. Redes ópticas Opacas fazem uso de conversão O-E-O, ou seja, um caminho óptico passa por estágios de regeneração elétrica ao longo da rede antes de chegar no nó de destino. A grande vantagem é que o sinal pode ser freqüentemente regenerado ao longo da rede, todavia a desvantagem deste tipo de implementação é o alto custo associado com a implantação de regeneradores. Além disso, regeneradores são dependentes de parâmetros como formato de modulação e taxa de transmissão, o que torna atualizações da rede um processo muito dispendioso [1]. Um caminho óptico transparente não sofre conversão O-E-O ao longo da rede permanecendo no domínio óptico da origem até o destino, contudo pode sofrer conversão de comprimento de onda.
- e) *QoS Óptico*: O último tópico na classificação das redes ópticas mostrada na Fig. 1.1 é QoS Óptico. QoS Óptico em redes ópticas pode ser classificado de acordo com a capacidade da rede prove às suas redes clientes caminhos ópticos com: Requisitos Funcionais, Diferenciação de QoS Óptico e/ou Qualidade do Sinal Óptico. Qualidade do Sinal Óptico está relacionada às degradações da OSNR dos caminhos ópticos impostas pelos efeitos da camada física, como por exemplo: FWM, XPM, ASE, atenuação, dispersão cromática, etc. Como será visto em detalhes no Capítulo 5, Diferenciação de QoS Óptico pode ser viabilizada por procedimentos que usam Busca Exaustiva ou Bloqueio Preventivo [33]. Requisitos Funcionais estão relacionados com falhas na rede, como cortes nas fibras, falhas nos OXC's. Perceba que, como ilustrado no diagrama da Fig. 1.1, o QoS óptico é relacionado com os algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda (setas pontilhadas) e é um dos itens compondo a "resposta" que o CAC apresenta à

rede cliente com relação ao pedido de conexão que fora feito ao plano de controle.

Os tópicos abordados no trabalho de pesquisa estão em destaque na Fig. 1.1. Nos algoritmos propostos nesta Tese é adotado o gerenciamento centralizado de conexões da rede, isto significa que existe uma entidade central que possui informações como: topologia, estado dos enlaces, uso de comprimentos de onda em cada enlace e o estado de cada elemento de rede. Com relação à geração de tráfego pelas redes clientes, é considerado que o tráfego é dinâmico com geração de chamadas poissoniana e duração exponencial. As conexões são roteadas sempre pelo menor caminho, mas quando existe mais de um menor caminho na rede, tal rota também pode ser usada, caso uma delas esteja ocupada. Como indicado na Fig. 1.1, trabalha-se também com um cenário de rede transparente sem conversão de comprimento de onda, em que o principal interesse é o desenvolvimento de CAC/RWA's que – tentando atender às solicitações das redes clientes – fornecem caminhos ópticos com QoS Óptico. Observe que é considerada apenas diferenciação de serviços e provisionamento da qualidade do sinal óptico sob ação de efeitos não-lineares, requisitos funcionais não são contemplados.

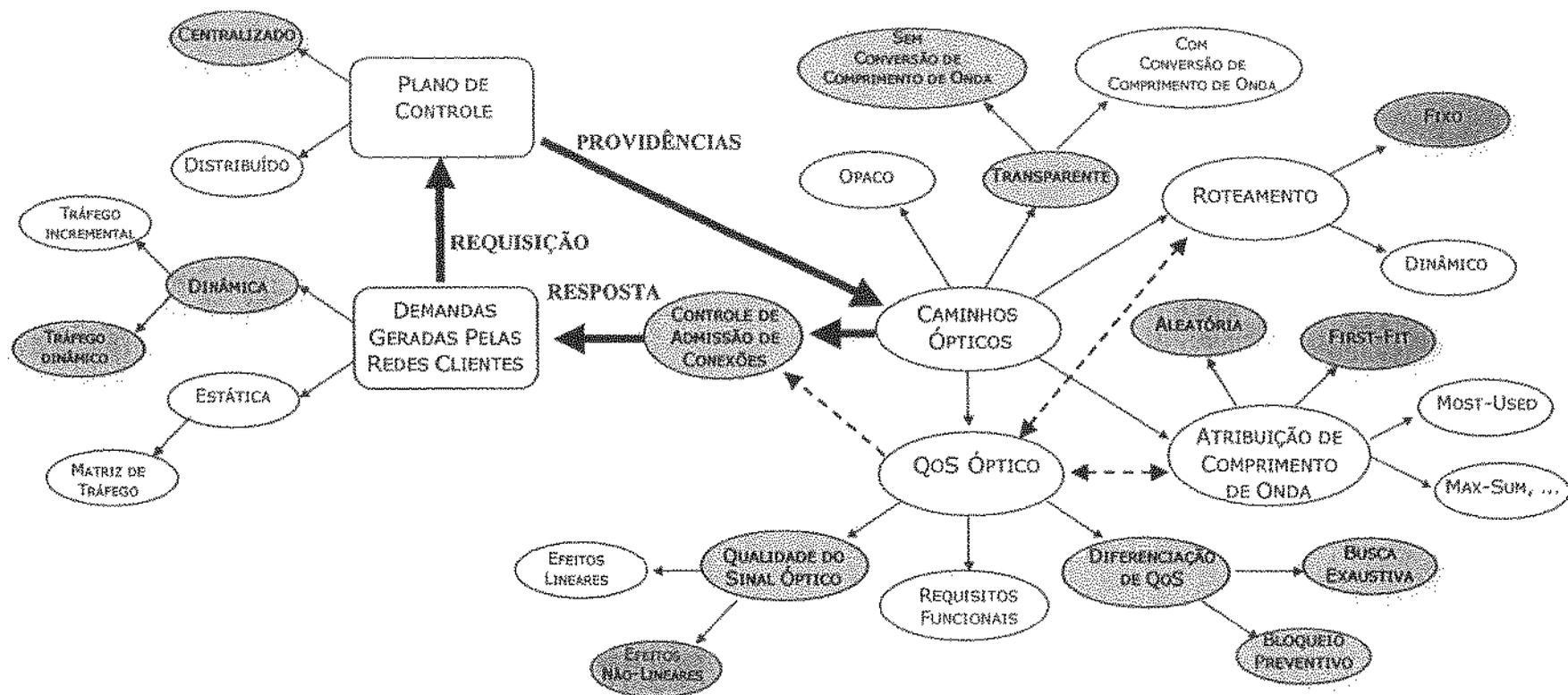


Fig. 1.1: Diagrama mostrando uma ampla classificação dos tópicos de investigação em redes ópticas. Em destaque estão os tópicos abordados nesta Tese. Setas cheias significam classificação de um dado atributo ou expressam encadeamento de etapas no processo de admissão de conexões. Setas pontilhadas significam que um dado atributo possui relação com um outro.

1.2.2. Caracterização da Proposta de Pesquisa

O conceito de QoS em redes ópticas pode ser visto de três formas: i) qualidade do sinal óptico, que é relacionada aos efeitos da camada física a serem descritos no Capítulo 2; ii) requisitos funcionais, que podem ser relacionados às falhas na rede como cortes na fibra; iii) diferenciação de QoS.

As soluções para fornecimento de QoS óptico do ponto de vista da qualidade do sinal óptico em redes roteadas por comprimento de onda têm sido principalmente focadas no desenvolvimento de algoritmos de roteamento conscientes de QoS [34] - [39]. Já no caso (ii), alguns trabalhos propõem algoritmos RWA que implementam mecanismos de proteção e restauração contra cortes nas fibras [40] - [42], mas considerando apenas a existência de uma classe de serviço.

No caso (iii), alguns artigos propõem algoritmos RWA que admitem dinamicamente atribuir um conjunto de comprimentos de onda para a classe com mais alta prioridade com o objetivo de maximizar o seu atendimento [43] - [45], mas sem levar em consideração os limitantes da camada física ou falhas na rede.

O ponto-chave é que os casos (i), (ii) e (iii) raramente foram considerados em conjunto na literatura, especialmente quando se trata de Diferenciação óptica de QoS junto com efeitos da camada física. Em [46] as classes de serviços são diferenciadas de acordo com níveis de proteção e restauração, neste caso o algoritmo RWA busca fornecer imunidade à classe com mais alta prioridade contra falhas na rede.

Diferenciação óptica de QoS, junto com efeitos da camada física, foi considerada em pouquíssimos trabalhos [47]. Além disso como mencionado anteriormente, no que se refere à qualidade do sinal óptico, as soluções para fornecimento de QoS óptico têm sido principalmente focadas no desenvolvimento de algoritmos de roteamento conscientes de QoS [34] - [39]. Poucos trabalhos, alguns dos quais foram desenvolvidos em paralelo com esta Tese, têm considerado a influência que os Algoritmos de Alocação de Comprimento de Onda (WA - *Wavelength Assignment*) podem ter sobre o QoS óptico [48] - [49]. Entretanto efeitos não-lineares, como FWM e XPM, podem também conduzir a forte degradação no desempenho das conexões [15], principalmente em redes DWDM (WDM Densa) [50], nas quais a eficiência destes efeitos é acentuada.

Percebe-se, portanto, que existem duas lacunas a serem preenchidas. Primeiro, o problema de WA precisa ser melhor estudado no cenário de rede ópticas com exigências de QoS óptico. Segundo, diferenciação de QoS, juntamente com efeitos da camada física, também tem sido pouco considerada. Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa não é apenas propor algoritmos para provimento de QoS óptico, mas também desenvolver uma metodologia para inserção de efeitos não-lineares nos algoritmos WA e, conseqüentemente, viabilizar o provisionamento de QoS. Para isso, é considerado o efeito de FWM, por ser o mais complexo dentre os efeitos não-lineares. Uma vez desenvolvida a metodologia, a inserção de outros efeitos não-lineares pode ser realizada mais facilmente, como também o estudo de mecanismos que considerem diferenciação de QoS e efeitos não-lineares ao mesmo tempo. No final, como consequência deste estudo, são criados CAC/RWA's para avaliação e provisionamento de QoS e diferenciação de QoS em redes ópticas dinâmicas transparentes limitadas por FWM.

Embora a relevância prática do FWM em sistemas que usam modulação por intensidade atualmente esteja limitada a redes ópticas construídas com Fibras de Dispersão Deslocada (DSF - *Dispersion Shifted Fiber*), o espaçamento entre canais reduzido admitido pela nova grade do ITU-T pode favorecer a eficiência do FWM [50]. Estudos experimentais têm investigado o impacto do FWM em sistemas fotônicos operando com Fibras com Dispersão Não-Nula (NZDF - *Non-Zero Dispersion Fiber*) quando o espaçamento entre os canais é reduzido [51]. Além disso, foi recentemente demonstrado que enlaces com compensação de dispersão podem sofrer maior degradação causada pela FWM do que pela XPM [52]. Adicionalmente, em redes que usam técnicas de modulação com intensidade constante, como por exemplo modulação em fase, trabalhos recentes mostraram que a FWM é o efeito limitante da capacidade dos sistemas DWDM [9] – [11].

Adicionalmente, como será visto a seguir, o fato do FWM ser o efeito da camada física mais complexo pode inviabilizar o uso dos algoritmos propostos se uma metodologia apropriada não for desenvolvida. Se, inicialmente, tem-se W canais transmitidos pela fibra, o número de produtos FWM gerados será [1]:

$$NP = W(W - 1)^2 \quad (1.1)$$

Perceba que como o número de produtos FWM cresce com W^3 , torna-se crítico em sistemas DWDM. A Tabela 1.1 traz o número de produtos FWM para vários valores de W . Observe que $W = 3$ implica em $NP = 12$ produtos FWM e o simples incremento de 1 comprimento de onda resulta em $NP = 36$. Note o esforço computacional que o CAC/RWA precisa empregar para gerenciar ao longo de uma rota, ao chegar uma nova requisição na rede, se em um único enlace de tal rota são gerados 12696 produtos FWM quando se tem $W = 24$ comprimentos de onda em operação. Soma-se a isto o fato que o provisionamento dinâmico de conexões na rede depende da estimativa do impacto sobre a OSNR de um grande número de comprimentos de onda para se poder aceitar ou rejeitar uma nova conexão. Esses produtos poderiam também ser calculados de forma *off-line* e armazenados em tabelas para serem consultadas pelos CAC/RWA's no momento da admissão de uma conexão na rede. Pelo fato da tabela dever contemplar todas as situações nas quais existe geração de produtos FWM, gerenciá-la é tão complicado quanto fazer o cálculo do ruído *on-line*. Como consequência, a complexidade do CAC/RWA pode inviabilizar o seu uso se estratégias adequadas não forem aplicadas. Isto reforça a importância de não só desenvolver um algoritmo específico, mas sim uma metodologia adequada para o tratamento do efeito não-linear de FWM no processo geração de CAC/RWA's; os quais devem reunir ao mesmo tempo atributos como baixa complexidade e eficiência, essenciais para que a aplicabilidade do CAC/RWA não seja comprometida.

Tabela 1.1: Número de produtos FWM.

NÚMERO DE COMPRIMENTOS DE ONDA (W)	NÚMERO DE PRODUTOS FWM (NP)
3	12
4	36
8	392
10	810
16	3600
24	12696

1.3 VISÃO GERAL DA TESE

Algumas características e contribuições desta Tese serão distribuídas ao longo dos capítulos como detalhado a seguir. A Fig. 1.2 traz um diagrama dos CAC/RWA's apresentados ao longo dos capítulos e estudados nesta Tese, com seus respectivos relacionamentos. Tal figura pode servir como um guia para ajudar no entendimento deste trabalho e também dar uma visão geral dos CAC/RWA's propostos nesta Tese.

No Capítulo 2 é proposto o modelo de interligação entre as redes clientes e a camada física da rede óptica que são utilizados nos CAC/RWA's desenvolvidos nesta Tese. São abordados também os conceitos e definições utilizados em todo o trabalho.

Como ilustrado no diagrama da Fig. 1.2, o Capítulo 3 é uma parte chave desta Tese, pois nele são descritos os algoritmos para provimento de QoS que servem de base para a elaboração de propostas para a simplificação dos CAC/RWA's e também são utilizados na investigação de alternativas para diferenciação de QoS óptico. No Capítulo 3 é medido o impacto que a alocação de rota e comprimento de onda cega pode causar ao QoS da rede óptica. Para isso, são investigados os algoritmos FWM-Cegos, os quais não fazem qualquer cálculo de ruído FWM durante o processo de admissão de conexões na rede. Contrastando com tal algoritmo, o CAC/RWA Ético é totalmente consciente de FWM e implementa Busca Completa de ruído FWM, ou seja, ele não permite que uma requisição seja degradada por ruído gerado por outras conexões e também não admite que uma requisição degrade alguma conexão já ativa na rede óptica. Fazendo uma implementação intermediária, o CAC/RWA Egoísta implementa Busca Parcial de ruído FWM, i.e. só se preocupa com o ruído FWM gerado pelas conexões já ativas na rede sobre uma requisição, desconsiderando o ruído que a requisição gera sobre as conexões já presentes na rede. Perceba que o algoritmo Egoísta não pode fornecer garantia determinística com relação ao QoS, mas espera-se que seu desempenho seja melhor do que o do algoritmo FWM-Cego e inferior ao do CAC/RWA Ético, o qual é o único que pode fornecer garantia determinística de QoS óptico.

Com as informações extraídas do Capítulo 3, é implementado no Capítulo 4 CAC/RWA's com complexidade reduzida. É apresentado o algoritmo Relaxado, o qual usa Busca Completa ou Busca Parcial de ruído FWM dependendo de parâmetros sistêmicos, como grade de comprimentos de onda, e parâmetros específicos da conexão, como o seu

comprimento e sua potência. Além disso, como mostrado na Fig. 1.2, é proposto no Capítulo 4 uma estratégia para utilizar algoritmos FWM-Cegos no provisionamento de QoS óptico, com o algoritmo *First-Fit* com Listas Otimizadas de comprimento de onda. Esta é uma das principais contribuições desta Tese, pois tais estratégias eliminam o cálculo *on-line* de ruído FWM pelos CAC/RWA's e, portanto, diminuem drasticamente a complexidade do algoritmo RWA, sem, no entanto, resultar em perda significativa de desempenho, segundo as métricas propostas neste trabalho.

Finalmente, no Capítulo 5 é proposto o uso das Listas Otimizadas de comprimento de onda para se fazer diferenciação de QoS óptico. São implementados quatro CAC/RWA's que diferem principalmente quanto ao nível de isolamento de ruído entre as duas classes de serviço presentes na rede óptica. Além disso, é definida uma nova métrica que incorpora os conceitos de isolamento de ruído e de tráfego chamada de figura de mérito da rede indicando o volume de tráfego das duas classes de serviço que a rede suporta de forma que os OSLA's de cada classe sejam atendidos. Os resultados obtidos podem auxiliar na escolha do algoritmo a ser usado na rede e seu respectivo plano de tarifação.

A interdependência dos algoritmos propostos pode também ser vista na Fig. 1.2. As setas cheias significam que um dado algoritmo é utilizado para conceber um novo CAC/RWA. Já as setas pontilhadas indicam que um determinado algoritmo foi utilizado na elaboração de um outro. Por exemplo, a figura mostra que o CAC/RWA Relaxado foi obtido a partir do uso dos algoritmos Egoísta MinFWM e Ético MaxMin. Como será visto no Capítulo 4, no processo de geração da lista LIRA (*Least Impaired under Random Assignment*), o algoritmo FWM-Cego Aleatório (*Random*) é utilizado para a simulação da rede de forma *off-line*. Da mesma forma, o algoritmo Ético MaxMin é utilizado na geração da lista MUSA (*Most Used under Strict Assignment*). Perceba que os algoritmos Ético, Egoísta e FWM-Cego servem de base para a geração de todos os outros CAC/RWA's desenvolvidos nesta Tese, inclusive aqueles que implementam diferenciação de QoS.

1.4 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA TESE

As principais contribuições dadas por esta Tese podem ser resumidas nos tópicos a seguir:

- Desenvolvimento de uma metodologia e métricas para abordar um problema complexo de interdependência entre caminhos ópticos em redes dinâmicas transparentes;
- Criar um procedimento com baixa complexidade para tratamento de efeitos não-lineares por algoritmos CAC/RWA's que visem prover a rede de QoS óptico;
- Desenvolvimento e avaliação de CAC/RWA's para provisionamento e diferenciação de QoS em redes ópticas dinâmicas sobre a influência de um efeito não-linear de FWM;
- Composição de métricas elaboradas para avaliação de desempenho de uma rede óptica num cenário multicliente e multiserviço com provisionamento de QoS óptico.

Nota: É importante lembrar que, assim como na grande maioria das áreas tecnológicas, há uma presença muito grande de termos estrangeiros, sobretudo em Inglês, no jargão da área de comunicações ópticas. No desenrolar de nosso texto, sempre é utilizada a tradução desses termos, exceto nos casos em que o português ainda não apresente um termo consagrado pelo uso. Entretanto, observa-se que raramente os acrônimos dos termos em português são adotados pelos pesquisadores de nosso país. Seguindo essa tendência, sempre que um acrônimo é utilizado, considera-se o termo original em inglês. Como regra, além da lista de acrônimos, sempre que é mencionado um termo pela primeira vez no texto, coloca-se entre parênteses seu acrônimo correspondente seguido de sua equivalência, ambos em inglês.

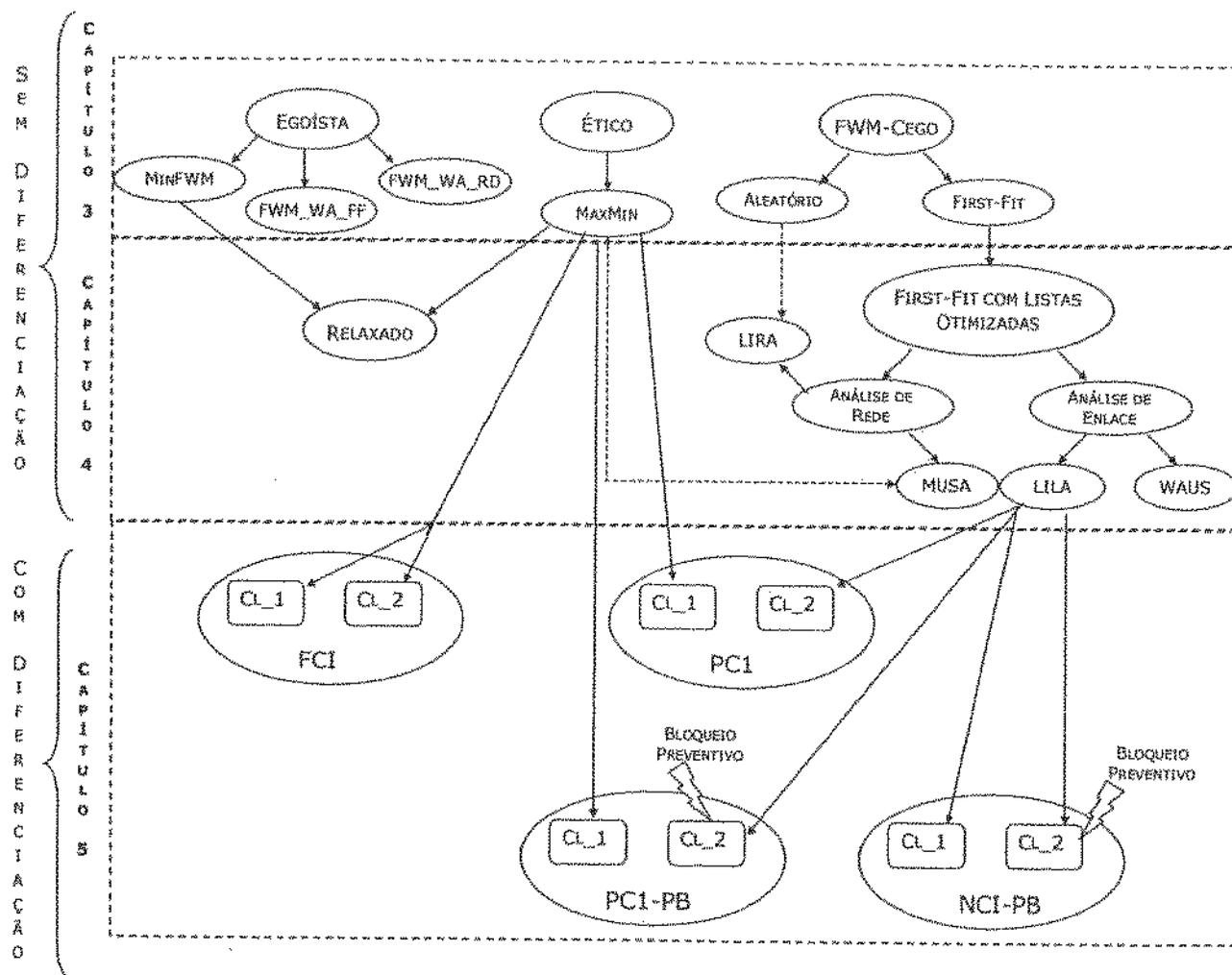


Fig. 1.2: Diagrama de relacionamento entre os algoritmos. As setas cheias significam que um dado algoritmo é utilizado para conceber um novo CAC/RWA. Já as setas pontilhadas indicam que um determinado algoritmo foi utilizado na elaboração *off-line* de um outro.

CAPÍTULO 2

REDES CLIENTES E A CAMADA FÍSICA

Este capítulo apresenta o modelo de interligação entre as redes clientes e a camada física da rede óptica abordando conceitos e definições que serão utilizados no restante da Tese. Na Seção 2.2 a concepção da rede óptica como uma rede com o propósito de ser multicliente e a arquitetura de seus principais elementos é abordada. O modelo de camada física será apresentado, discutindo brevemente a teoria de propagação de sinais por fibras ópticas monomodo, e também serão detalhados os aspectos relacionados ao efeito de FWM, sua origem e impacto sobre o desempenho de enlaces. Finalmente, a Seção 2.3 aborda o ponto principal da Tese: a interligação entre as redes clientes e a rede óptica transparente; apontando para a necessidade da introdução de controle de admissão (CAC) de forma que os efeitos presentes na camada física sejam eliminados, ou afetem minimamente o desempenho das redes clientes, e que recursos da rede óptica sejam eficientemente utilizados via algoritmos de Alocação de Rota e de Comprimentos de onda (RWA) que considerem as limitações da camada física.

2.1. REDES CLIENTES

Como foi visto na Introdução desta Tese, o principal objetivo da rede óptica é dar suporte às suas redes clientes fornecendo-lhes caminhos ópticos (*lighpaths*), também chamados de conexões. O problema de estabelecer dinamicamente conexões em uma rede óptica envolve o uso de um algoritmo RWA. Um caminho óptico é composto por uma sucessão de enlaces entre a origem e destino conectados por Nós Capazes de Fazer Roteamento (WRN – *Wavelength-Routing Node*). Tradicionalmente, um caminho óptico era caracterizado pelo conjunto (rota, comprimento de onda); entretanto, numa visão multi-cliente, caminhos ópticos na rede transparente podem possuir características diferentes dependendo da aplicação e/ou da rede cliente que os está solicitando. Sendo assim, além de uma rota e de um comprimento de onda, para sua melhor caracterização é necessário que um caminho óptico possua também atributos de QoS óptico associados à sua criação num contexto de rede transparente. Isto é feito a partir do estabelecimento de um OSLA entre a rede cliente e a rede óptica. No OSLA parâmetros como: probabilidade de bloqueio, que representa o número de caminhos ópticos rejeitados dentre o número total de pedidos de caminhos ópticos que chegam na rede óptica; BER, que representa o número de bits recebidos com erro na recepção dividido pelo número total de bits que estão sendo transportados por um dado caminho óptico; entre outros parâmetros, podem ser acordados entre a rede cliente e a rede óptica.

Para que isto possa ser coordenado de maneira funcional, deve existir uma entidade que se encarregue de mapear as solicitações de conexões com os níveis de QoS adequados. Assim, este trabalho propõe a introdução de um mecanismo de CAC/RWA para gerenciar o atendimento de novas requisições na rede, visando também a manutenção de níveis de QoS óptico adequados para as conexões já presentes na rede. Um CAC é um mecanismo que verifica a viabilidade de um determinado pedido de conexão na rede óptica ser atendido ou não [53]. Como será visto no Capítulo 3, basicamente os CAC's propostos nesta Tese podem trabalhar com as seguintes questões isoladamente ou as duas ao mesmo tempo: i) a nova conexão afeta os parâmetros de QoS óptico de alguma conexão ativa na rede óptica? ii) as conexões ativas na rede óptica afetarão os parâmetros de QoS óptico da nova requisição?

Todavia, para que isso possa ser viabilizado, deve também existir alguma entidade que se encarregue da interconexão entre as redes clientes e a rede óptica. A Fig. 2.1 traz uma ilustração tridimensional de interligação entre as redes clientes e a rede óptica. Note que existe uma entidade, o plano de controle, fazendo a interface entre as redes clientes e a rede óptica. Padrões de interconexão entre as redes clientes e a rede óptica estão sendo estudados. Duas soluções estão sendo propostas: GMPLS do IETF e o ASON do ITU-T. Enquanto o GMPLS é uma solução para um plano de controle único para as redes ópticas e suas clientes, o ASON não padroniza somente o plano de controle mas também define todos os aspectos da rede óptica englobando aspectos arquiteturais, estruturas e mapeamentos, características funcionais, aspectos de gerenciamento e aspectos da camada física [54]. Já existem também soluções que utilizam a arquitetura ASON e o padrão GMPLS ao mesmo tempo [2].

A principal função do plano de controle é configurar conexões dinamicamente na rede. Como em uma rede óptica o problema de estabelecer conexões dinamicamente envolve o uso de um Algoritmo RWA, tal algoritmo RWA trabalha em consonância com o plano de controle. No contexto de GMPLS, todas as conexões são referenciadas por um nome comum chamado de Caminho Chaveado por Rótulo (LSP – *Label Swiched Path*), o qual é estabelecido baseado nos requisitos da rede cliente (como por exemplo, níveis de QoS). Tal LSP pode iniciar em uma rede IP e depois ser comutado em uma rede óptica por um dado comprimento de onda. Para que um LSP possa ser estabelecido, a arquitetura GMPLS especifica alguns protocolos que desempenham funções específicas como: funções de sinalização, por intermédio dos protocolos *Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering* (RSVP-TE) e *Constraint-based Routing Label Distribution Protocol* (CR-LDP); funções de roteamento, por meio dos protocolos *Open Shortest Path First – Traffic Engineering* (OSPF-TE) e *Interior System to Interior System* (IS-IS) e funções de gerenciamento de enlace, com o Protocolo de Gerenciamento de Enlace (LMP – *Link Management Protocol*). Assim, quando uma rede cliente solicita uma requisição estes protocolos são acionados.

Por exemplo, suponha que a rede IP solicite uma conexão com um dado nível de QoS, como mostrado na Fig. 2.1. Não será descrito aqui todos os passos realizados pelo Plano de Controle, mas um dos procedimentos principais é solicitar ao algoritmo

CAC/RWA da rede óptica uma rota e um comprimento de onda. Neste exemplo, baseado nas exigências feitas pela rede cliente, o CAC/RWA forneceu a rota 1 – 2 – 4 e o comprimento de onda λ_1 , que pode ser o rótulo que será associado pelo protocolo RSVP-TE ao LSP que será estabelecido. Perceba que para que o algoritmo CAC/RWA possa escolher a rota e comprimento de onda que atendam às exigências da conexão solicitada pela rede IP, ele precisa conhecer o estado e as restrições ao uso de certos recursos físicos da fibra e suas respectivas propriedades. Isto pode ser viabilizado no GMPLS através do protocolo LMP, enquanto que na arquitetura ASON através do protocolo Gerenciador de Recursos de Enlace (LRM – *Link Resource Management*). O LMP e o LRM também podem gerenciar falhas nos enlaces, como por exemplo cortes nas fibras.

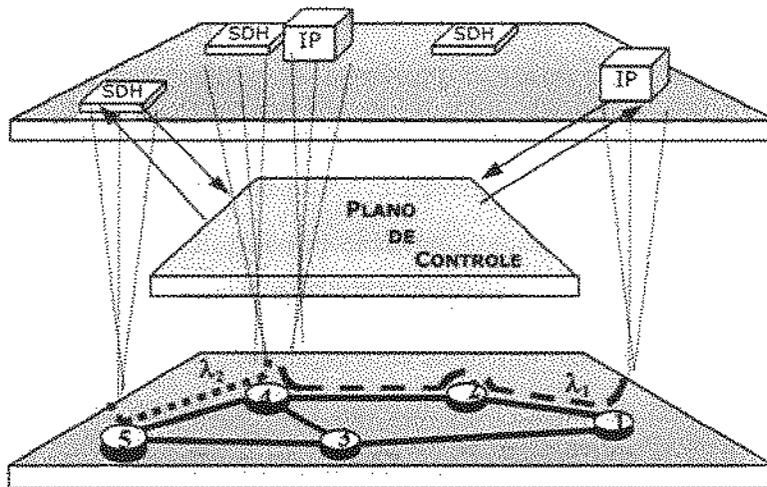


Fig. 2.1: Visão Multi-Cliente: o plano de controle faz a interface entre as redes clientes e a rede óptica.

Note que o nível de QoS solicitado pela rede cliente é mapeado de forma implícita na escolha apropriada da rota e do comprimento de onda pelo algoritmo CAC/RWA. Todavia, a representação da rede óptica mostrada na Fig. 2.1 é insuficiente para se compreender como os algoritmos CAC/RWA são capazes de selecionar rotas e comprimentos de onda com QoS óptico. Além da representação lógica mostrada na Fig. 2.1 (com conectividade dos nós, comprimentos de onda em uso em cada enlace, etc) é preciso também se ter uma representação física mostrando a arquitetura dos nós da rede, que tipo

de fibra está sendo utilizada em cada enlace, comprimento de cada enlace, número e onde estão localizados os amplificadores ópticos, potência e frequência de cada canal em uso e suas respectivas limitações. A Fig. 2.2 mostra uma vista em duas dimensões da rede óptica com alguns elementos, sua interligação com outras redes (como redes IP e SDH) e os principais efeitos da camada física inserida por cada um deles às conexões ópticas. Observe que os caminhos ópticos interligando roteadores IP e terminais SONET/SDH passam por Terminais Ópticos de Linha (OLT – *Optical Line Terminals*), Chaves Ópticas (OXC - *Optical Crossconnect*), fibras, entre outros dispositivos, sofrendo degradações de sua OSNR e conseqüentemente de sua BER.

Assim, é importante que alguns destes elementos sejam descritos em mais detalhes antes da abordagem do modelo de interligação das camadas. A seguir será visto brevemente alguns elementos presentes nas redes ópticas.

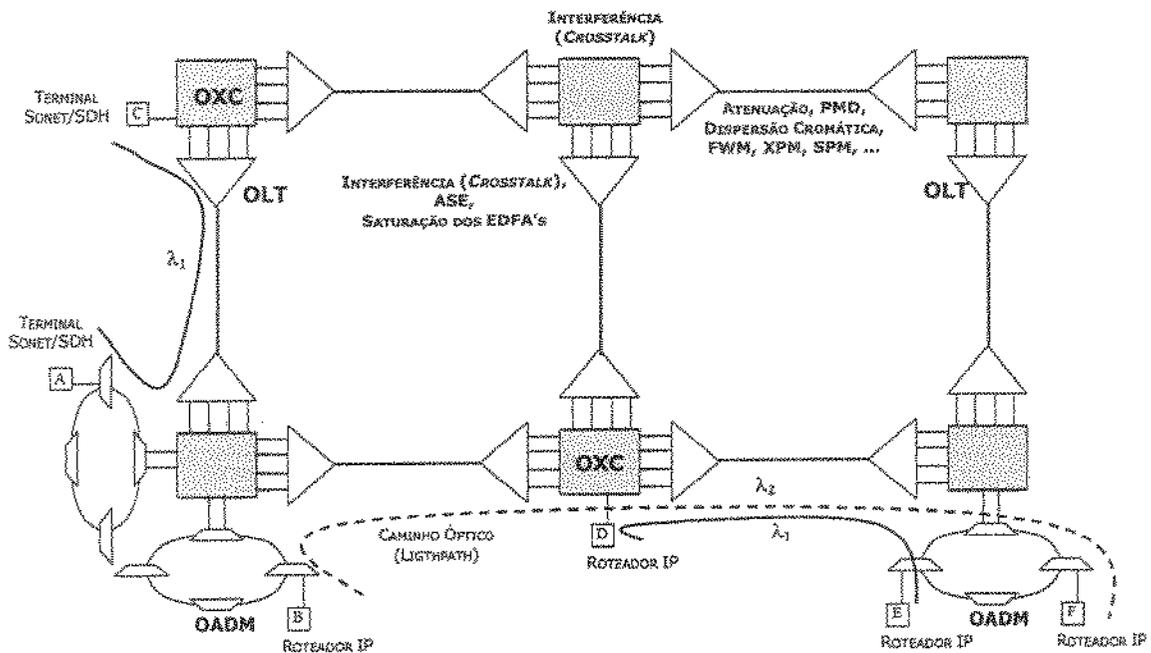


Fig. 2.2: Interligação de clientes IP e SONET/ SDH com a rede óptica com uma representação física dos elementos da rede óptica.

2.2. ELEMENTOS DA REDE ÓPTICA E SUAS LIMITAÇÕES

2.2.1. Terminais Ópticos de Linha

Os Terminais Ópticos de Linha (OLT – *Optical Line Terminals*) são utilizados para multiplexar e demultiplexar canais em um sistema WDM. Um OLT possui basicamente 3 componentes funcionais: transponder, multiplexadores/demultiplexadores e, opcionalmente, amplificadores ópticos. A Fig. 2.3 mostra um diagrama de blocos de um OLT.

O transponder adapta o sinal vindo de uma rede cliente para um formato do ITU [50] apropriado para a transmissão em um sistema WDM, e vice-versa. Esta adaptação inclui várias funções. Por exemplo, o sinal pode precisar ser convertido para um comprimento de onda que seja utilizável na rede óptica. A grade de comprimentos de onda gerada pelo transponder tipicamente obedece ao padrão ITU na janela de 1550 nm [50]. O transponder pode também inserir códigos corretores de erro (FEC – *Forward Error Correction*), monitorar a BER de sinais de ingresso e egresso da rede. O OLT também pode ter um laser e um receptor à parte para geração/recepção de um canal de supervisão óptica separado dos demais canais. Por estes motivos, a adaptação muitas vezes envolve conversão Óptica-Elétrica-Óptica (O-E-O – *Optical-to-Electrical-to-Optical*) [1]. Como consequência, o custo de um OLT é relativamente alto correspondendo a uma significativa porção do custo do sistema.

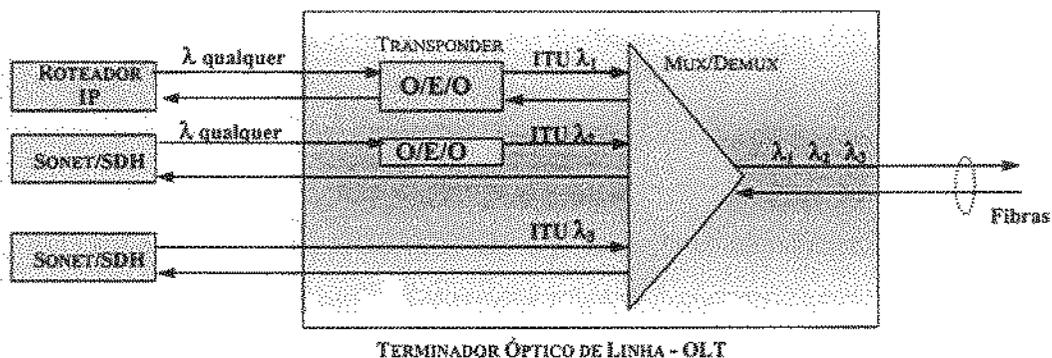


Fig. 2.3: Diagrama de blocos de um OLT.

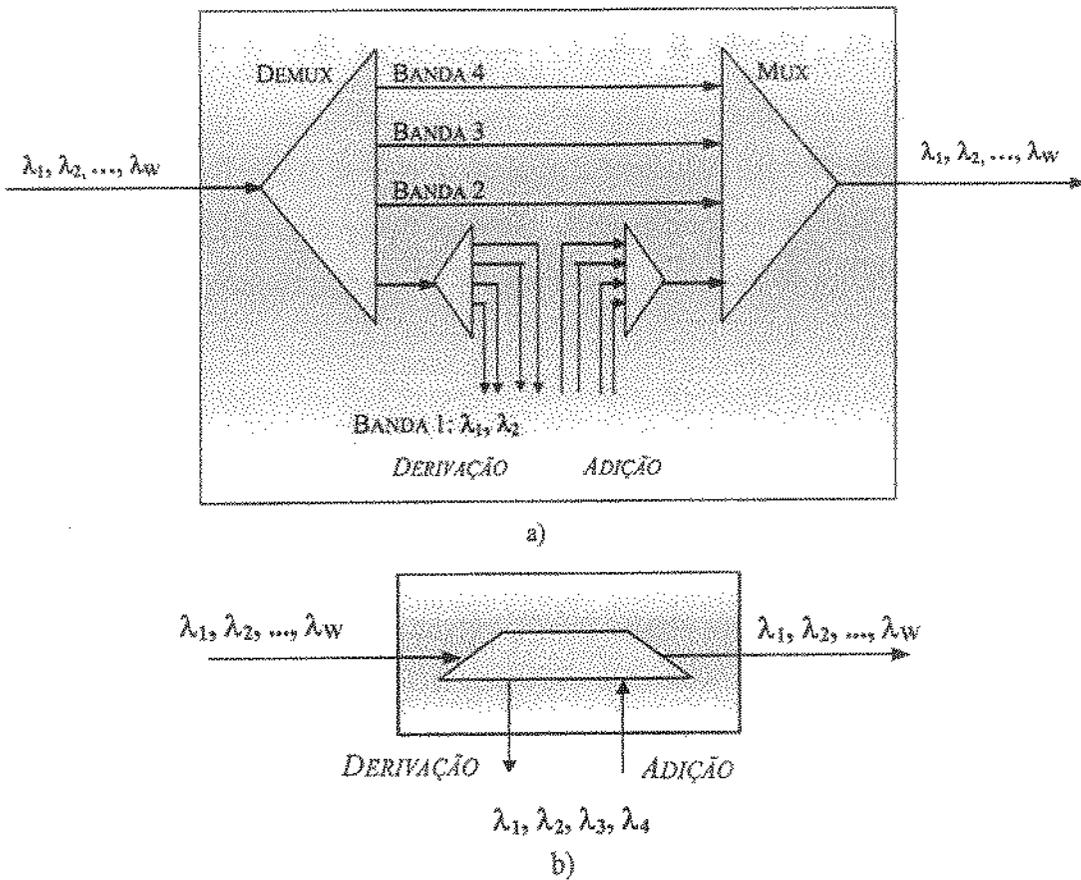


Fig. 2.4: Arquiteturas de OADM's. a) Arquitetura Paralela b) Arquitetura Serial.

2.2.2. Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação (OADM – Optical Add/Dropp Multiplexers)

Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação (OADM – *Optical Add/Drop Multiplexers*) recebem vários sinais em múltiplos comprimentos de onda e seletivamente derivam alguns comprimentos de onda enquanto deixam passar os demais. Além disso, novos canais podem ser adicionados à rede por um OADM. Uma das grandes contribuições dadas pelos OADM's às redes ópticas é o barateamento do sistema, já que uma economia considerável de OLT's é possível [1]. A Fig. 2.4 mostra duas arquiteturas de OADM's. Percebe-se que por possuírem apenas dois portos troncos, os quais fornecem a entrada/saída para a fibra, os OADM's são utilizados sobretudo em redes ópticas com topologias lineares ou anulares. Como será visto adiante, os OADM's podem ser considerados como um tipo especial de OXC.

2.2.3. Chaves Ópticas (Optical Crossconnect)

Como visto anteriormente, OADM's são utilizados em topologias lineares e anulares. Todavia, um elemento adicional é necessário para se construir redes ópticas com topologia em malha. As chaves ópticas (OXC - *Optical Crossconnect*) são responsáveis por executar todas as funções de roteamento dos caminhos ópticos e também o estabelecimento e terminação destes.

A Fig. 2.5 mostra uma representação funcional de um OXC [55]. OXC's são basicamente compostos por: *portos troncos*, aos quais são fixados pares de fibras (assumindo aqui que todos os portos sejam bidirecionais) com o propósito de conectá-los a outros nós da rede; *portos tributários* ou *locais*, que podem ser elétricos ou ópticos, cuja finalidade é servir como fonte ou sorvedouro de tráfego, pois são neles que se originam e terminam os caminhos ópticos; além dos *elementos gerenciadores de rede*, responsáveis por todo o controle e gerenciamento de dispositivos dinâmicos que possam vir a existir. O núcleo do OXC, também chamado de comutador, como descrito adiante pode ser elétrico ou óptico.

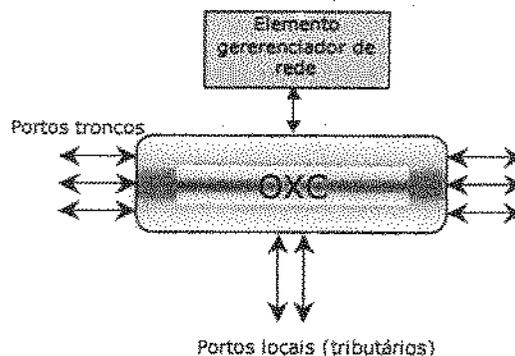


Fig. 2.5: Representação funcional um OXC.

Os OXC's fornecem várias funcionalidades para redes ópticas:

- *Aprovisionamento de serviços*: um OXC pode provisionar caminhos ópticos de maneira automática. Esta função é particularmente importante quando os caminhos ópticos na rede precisam ser reconfigurados de forma a se adequarem a mudanças no tráfego;

- *Proteção*: Proteger os caminhos ópticos contra cortes nas fibras ou falhas nos equipamentos na rede é uma das mais importantes funcionalidades dos OXC's. Os OXC's podem rapidamente detectar falhas na rede e rapidamente re-rotear os caminhos ópticos que foram prejudicados pelas falhas;
- *Transparência à taxa de bits*;
- *Monitoramento de desempenho, acesso a testes e localização de falhas*: OXC's também podem fornecer visibilidade para os parâmetros de desempenho de um sinal em um nó intermediário. Eles admitem acoplamento de equipamentos para testes dos sinais;
- *Conversão de comprimento de onda*;
- *Agregação de Tráfego (Grooming)*.

A Fig. 2.6 mostra quatro configurações de OXC's que diferem na maneira como podem ser interligados com OLT's ou OADM's em um nó e no grau de transparência que cada configuração oferece. Perceba que a única configuração totalmente óptica é a última configuração. As demais aplicam O-E-O e podem possuir núcleo óptico ou elétrico. Uma grande vantagem de se ter núcleo elétrico comparado com o óptico é a capacidade de agregação de tráfego que pode ser oferecida pelo primeiro, entretanto à medida que a taxa de bits aumenta, o custo do OXC com núcleo elétrico também aumenta. Além disso, a capacidade de chaveamento do OXC diminui com a adição de partes elétricas, assim a configuração 2.6a é a que possui menor capacidade de chaveamento, enquanto que a 2.6d apresenta o melhor desempenho com relação a este atributo [1].

Por ser a única configuração que pode fornecer a implementação de uma rede totalmente óptica, o OXC da Fig. 2.6d é a adotada neste trabalho de pesquisa.

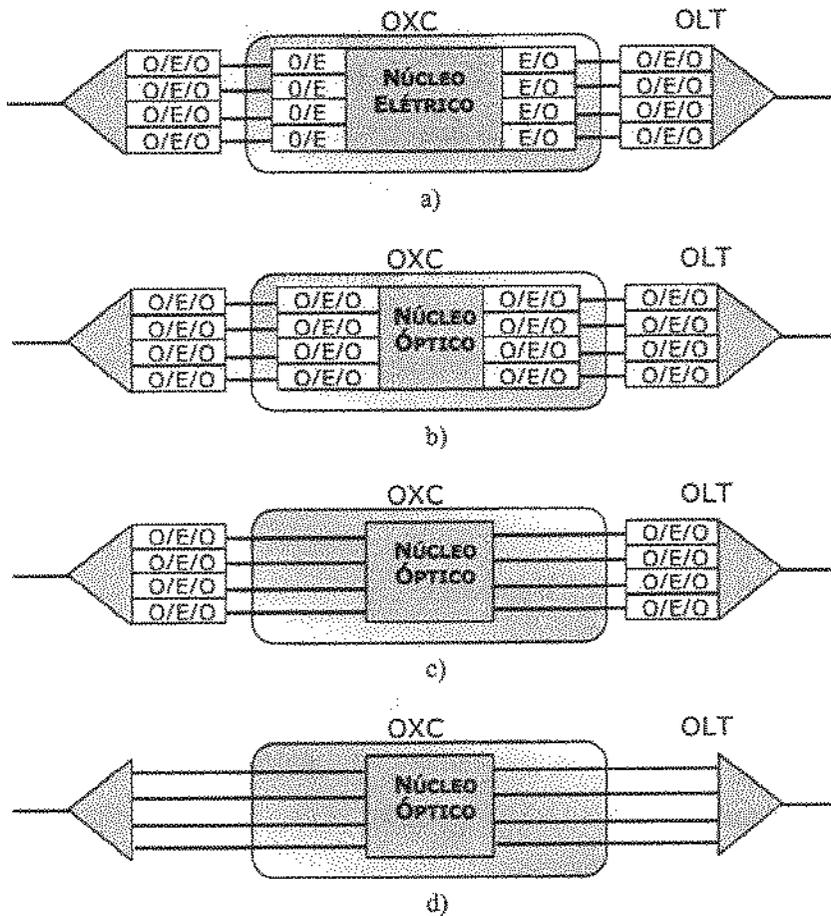


Fig. 2.6: Configurações de OXC's.

a) LIMITAÇÕES IMPOSTAS À REDE

Quase todos os componentes presentes nos OLT's, OXC's e OADM's, por exemplo Mux/Demux e filtros ópticos, introduzem distorções nos caminhos ópticos que passam por eles devido às reflexões que ocorrem. Tal efeito se torna especialmente importante em redes porque à medida que o caminho óptico passa por MUX/DEMUX's, filtros ópticos, OXC's, etc, o sinal vai sofrendo mais interferência (*crosstalk*). O nível de interferência (*crosstalk*) gerado em cada elemento depende de parâmetros como: número de portas do OXC, da qualidade dos dispositivos utilizados na sua construção, etc.

Este tipo de interferência (*crosstalk*) pode ser classificada em duas categorias:

- Intracanal: É a geração de interferência de um caminho óptico sobre outro no mesmo comprimento de onda que também esteja sendo processado pelo OXC;

- Intercanal: É a geração de interferência de um caminho óptico sobre outros caminhos ópticos com comprimentos de onda diferentes.

No contexto de redes ópticas dinâmicas, interferência (*crosstalk*) gerada nos OXC's foi recentemente estudado em [56] com o desenvolvimento de algoritmos de atribuição de comprimento de onda que levam em conta tal efeito.

2.2.4. Amplificadores Ópticos

Amplificadores ópticos são utilizados para compensar as perdas devido à atenuação imposta pela fibra óptica, às perdas nos OXC's ou para injetar potência em um sinal na entrada da fibra. O tipo mais consagrado de amplificadores ópticos são os Amplificadores Ópticos à Fibra Dopada com Érbium (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*) [61], os quais são mais utilizados na banda C do espectro eletromagnético (1530 – 1565 nm); embora já exista outra versão do EDFA que trabalha na banda L (1565 – 1625 nm) [57]. Por possuírem uma largura de banda da ordem de 4 THz¹, sendo capazes de amplificar vários canais ao mesmo tempo, e transparência com relação à taxa de bits e formato de modulação, os EDFA's foram os principais responsáveis pela implementação prática e viabilidade econômica dos sistemas WDM. Recentemente os amplificadores de Raman e os amplificadores paramétricos passaram a ser utilizados juntos com os EDFA's nos sistemas fotônicos [58] – [60]. Outra maneira de se fazer amplificação óptica é por meio de Amplificadores Ópticos Semicondutores (SOA - *Semiconductor Optical Amplifiers*), entretanto SOA's são mais utilizados em dispositivos fotônicos, como por exemplo, conversores de comprimento de onda.

a) Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) e Efeito de Saturação

O ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) é inerente ao processo de amplificação óptica em amplificadores que usam como meio de amplificação algum tipo de fibra dopada² [61], como por exemplo os EDFA's.

¹ Considerando apenas a operação na Banda C.

² Nesta classe de amplificadores não se encontram os Amplificadores Raman e os Amplificadores Paramétricos, pois estes fazem uso das não-linearidades da fibra para se fazer amplificação óptica. Não é descrito o processo de Emissão Espontânea pois esta fora do escopo deste trabalho de pesquisa. A descrição detalhada pode ser encontrada nas referências indicadas.

Quando um sinal óptico com frequência f_c passa por um EDFA, devido ao processo de Emissão Estimulada, ocorre o clone de fótons deste sinal óptico. Ou seja, novos fótons com mesma energia (hf_c , em que h é a constante de Plank), direção, polarização e fase que os fótons do sinal óptico original são gerados, viabilizando a amplificação óptica. Junto com a Emissão Estimulada ocorre a Emissão Espontânea e, embora os fótons gerados possuam mesma energia que os fótons do sinal óptico de entrada, suas direções, polarizações e fases são aleatórias.

O processo de Emissão Espontânea acaba sendo prejudicial ao sinal óptico, pois o amplificador trata-o como um outro campo eletromagnético na frequência f_c e também o amplifica. Esta Emissão Espontânea Amplificada (ASE) aparece como ruído na saída do amplificador tendo impacto negativo no projeto de sistemas ópticos [62] – [65].

Alguns trabalhos têm também considerado o impacto que o ruído ASE pode ter sobre o desempenho de redes ópticas dinâmicas. Em [35], [37] – [39] foram estudados algoritmos RWA que lidam com o ASE por intermédio do cálculo do seu acúmulo ao longo de uma cascata de amplificadores pertencentes a uma dada rota na rede. Em geral, o objetivo destes RWA's é selecionar rotas que minimizam o acúmulo de ruído ASE sobre uma dada requisição que chega na rede. Quando a potência do ASE é suficientemente alta de forma que a OSNR de uma requisição atinja níveis não permitidos, tal requisição é bloqueada; caso contrário, é aceita.

Tratar o ASE por meio do seu acúmulo ao longo da rede pode trazer como consequência a limitação no número máximo de saltos que uma requisição pode atingir. Assim, é bem provável que conexões mais longas na rede possuam uma alta probabilidade de bloqueio. Percebe-se que nesse procedimento não é levado em conta o efeito que a entrada de uma conexão na rede tem sobre as outras conexões já presentes na rede, ou seja, da forma como está sendo tratado, o acúmulo de ASE age como um efeito linear.

Uma outra questão é que não é considerado o efeito de saturação dos amplificadores. Uma consequência do efeito da saturação de um amplificador é a diminuição de seu ganho. O ponto chave é que existe uma potência de entrada a partir da qual ocorre tal efeito. Assim, à medida que o número de conexões que passa por um dado amplificador na rede vai aumentando, o amplificador se aproxima do ponto de saturação. Em um dado momento, a ativação de uma nova requisição levará o amplificador à

saturação, com a conseqüente diminuição do ganho experimentado não só por essa nova conexão, mas também por todas as outras conexões que passam por esse amplificador [39]. Em outras palavras, o efeito de saturação de um amplificador se comporta como um efeito não-linear. Este efeito de saturação de amplificadores pode levar também à formação de laços de instabilidade de potência na rede óptica [66].

2.2.5. Fibra Óptica Monomodo

Os principais tipos de fibras utilizadas em redes ópticas são: Fibra Óptica Padrão (STDF - *Standard Fiber*), Fibra de Dispersão Deslocada (DSF - *Dispersion Shifted Fiber*) e Fibra de Dispersão Não-Nula (NZDF- *Non Zero Dispersion Fiber*). As características geométricas e propriedades de transmissão das fibras STDF, DSF e NZDF estão descritas nas recomendações G. 652 [67], G.653 [68] e G. 655 [69] do ITU-T. Estas fibras diferem principalmente nos seus perfis de dispersão cromática. Enquanto que a fibra STDF apresenta comprimento de onda de dispersão nula por volta de 1310 nm e uma dispersão da ordem de 17 ps/nm.km na janela de 1550 nm, a fibra DSF apresenta dispersão nula na janela de 1550 nm e a fibra NZDF possui um perfil de dispersão variando de 2 - 8 ps/nm.km na banda C (1530 – 1565 nm).

Basicamente, pode-se dividir os efeitos na fibra em duas categorias:

- i) Efeitos Lineares
 - Atenuação
 - Dispersão Cromática
 - Dispersão de Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*)
- ii) Efeitos Não-Lineares
 - Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*)
 - Modulação Cruzada de Fase (XPM – *Cross-Phase Modulation*)
 - Auto Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*)
 - Instabilidade Modulacional (MI – *Modulation Instability*)
 - Espalhamento Estimulado de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*)
 - Espalhamento Estimulado de Brillouin (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*)
 - Auto-Desvio de Freqüência

– *Self-Steepening*

Como este é o foco principal deste trabalho estes efeitos são destacados na seção a seguir.

2.3 A CAMADA FÍSICA E SUAS LIMITAÇÕES

A resolução do problema de RWA em redes ópticas transparentes dinâmicas têm cada vez mais dado ênfase às limitações da camada física [14], [15], [33] – [39], [48], [49], [66]. Um dos principais motivos para isso é que a dinâmica do tráfego causa flutuações na BER dos caminhos ópticos [39] e até pode levar a estados de instabilidade de potência na rede [66]. Entretanto, em redes opacas, i.e. redes compostas por pequenos domínios de transparência interconectados por regeneradores elétricos, os domínios de transparência são cuidadosa e estaticamente projetados durante a etapa de planejamento considerando em geral a situação de pior caso [3]. Basicamente este procedimento tem dois problemas: primeiro, devido ao projeto ser baseado na situação de pior caso, os domínios de transparência acabam sendo pequenos; segundo, em decorrência disso, o número de regeneradores utilizados é relativamente grande aumentando consideravelmente o custo da rede. Portanto, o desenvolvimento de soluções que tratem de forma adequada os efeitos da camada física é capital para a evolução das redes ópticas. Todavia, para isso é necessário conhecer os efeitos da camada física intimamente para que uma metodologia adequada possa ser aplicada aos algoritmos RWA's nas redes dinâmicas.

2.3.1. Propagação de Sinais em Fibras Ópticas Monomodo

A propagação de pulsos em fibras ópticas monomodo é descrita, com boa precisão, pela Equação Não-Linear de Schrödinger (NLSE - *Non Linear Schrödinger Equation*)³, que é dada por [70]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A, \quad (2.1)$$

³ Não abordaremos a dedução matemática dessa equações, estas deduções podem ser facilmente encontradas na bibliografia indicada.

na qual o coeficiente não-linear γ da fibra é definido como

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi n_2}{\lambda_1 A_{\text{eff}}} \quad (2.2)$$

e

$$\beta_n = \left(\frac{d^n \beta}{df^n} \right)_{f=f_i}, \quad (2.3)$$

com $v_g = \frac{1}{\beta_1}$ sendo a velocidade de grupo do canal, β_2 é conhecido como dispersão de primeira ordem e se relaciona com a dispersão cromática da fibra óptica monomodo por

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda_1^2} \beta_2. \quad (2.4)$$

O parâmetro α em (2.1) é responsável pela atenuação na fibra óptica. $A = A(t, z)$ é a amplitude (do campo elétrico da envoltória para f_i) do pulso óptico. Nas Equações (2.2) e (2.3) n_2 e λ_1 são, respectivamente, o coeficiente de índice não-linear (dado em m^2/W) e o comprimento de onda do canal sob análise. A área efetiva da fibra é A_{eff} , que tem relação com a geometria e a distribuição dos modos da fibra. Os parâmetros β_1 , β_2 e β_3 são resultantes da expansão em Série de Taylor da constante de propagação $\beta(f)$ em torno da frequência f_i do canal.

Percebe-se que o coeficiente não-linear da fibra, também conhecido como o parâmetro γ , é inversamente proporcional à área efetiva da fibra. Esta relação é fundamental para o projeto de modernas fibras ópticas, como por exemplo a Fibra Altamente Não-Linear de Dispersão Deslocada (HNL-DSF – *High Nonlinearity-Dispersion Shifted Fiber*) e Fibras com Larga Área Efetiva (LCAF – *Large Core Area Fiber*). As HNL-DSF's são utilizadas em dispositivos fotônicos que usam os efeitos não-lineares para realizar uma dada função (por exemplo, conversão de comprimento de onda, amplificação

paramétrica, etc.). Já as LCAF's foram apontadas como uma possível solução para minimizar as limitações impostas pelos efeitos não-lineares à transmissão de sinais por fibras ópticas monomodo.

Fazendo a transformação de variáveis $T = t - \beta_1 z$, (2.1) pode ser reescrita como [70]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A. \quad (2.5)$$

Desprezando as pequenas variações da velocidade de grupo dentro de um mesmo canal, a Equação (2.1) é totalmente equivalente à (2.5). A única alteração é que, em (2.5), é adotado um referencial que se move com a mesma velocidade que a velocidade de grupo de $A(z, t)$.

A maioria dos efeitos oriunda da transmissão de sinais pela fibra óptica é prevista por (2.5), da forma como está apresentada, exceto a Dispersão de Modo de Polarização (PMD). Os efeitos de FWM, XPM, SPM, MI, Auto-Desvio de Frequência e *Self-Steepening* ocorrem devido à dependência do índice de refração da fibra com a potência óptica. Auto-Desvio de Frequência e *Self-Steepening* são efeitos não-lineares de ordem superior e são relevantes na propagação de pulsos de duração inferior a 1 ps. Já o SRS e o SBS compreendem os efeitos de espalhamento devido à interação entre o campo eletromagnético e os fônons (vibrações acústicas moleculares) do meio que constitui a fibra [71].

A seguir são descritos brevemente cada um dos efeitos citados acima e a FWM será abordada em uma seção à parte.

a) ATENUAÇÃO

Esse termo é responsável pela perda de potência do sinal à medida que se propaga pela fibra e, para verificar sua ação, (2.5) é reescrita anulando as contribuições dos outros efeitos

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A(z, T). \quad (2.6)$$

A solução dessa equação é bastante simples

$$A(z, T) = A(0, T) \exp\left(-\frac{\alpha z}{2}\right) \quad \text{ou} \quad (2.7)$$

$$P(z, T) = P(0, T) \exp(-\alpha z),$$

e mostra que a potência $P(z, T)$, $P(z, T) = |A(z, T)|^2$, de um pulso que se propaga por uma fibra decai exponencialmente com o aumento da distância.

Embora, nos sistemas de telecomunicações procure-se trabalhar em regiões espectrais nas quais o coeficiente de atenuação α é aproximadamente constante, em geral, ele é função do comprimento de onda, $\alpha = \alpha(\lambda)$. Informações mais detalhadas sobre os mecanismos que causam a atenuação podem ser obtidas, por exemplo, em [72] e suas referências.

b) EFEITOS DISPERSIVOS OU DISPERSÃO CROMÁTICA

O termo proporcional a β_2 descreve a dispersão de primeira ordem, ou seja, a variação da velocidade de grupo de cada componente espectral da onda durante sua propagação pela fibra. Isso pode ser observado anulando-se todos os outros termos de (2.5)

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2}, \quad (2.8)$$

que tem como soluções, no domínio da frequência e do tempo, respectivamente:

$$A(z, f) = \tilde{A}(0, f) \exp(2\pi^2 i \beta_2 f^2 z) \quad (2.9a)$$

e

$$A(z, T) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(0, f) \exp(2\pi^2 \beta_2 f^2 z - i2\pi fT) df, \quad (2.9b)$$

na qual $\tilde{A}(0, f)$ é a forma do pulso de entrada expressa no domínio da frequência e é relacionada com sua forma temporal através de:

$$A(0, T) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(0, f) \exp(-i2\pi fT) df. \quad (2.9c)$$

A partir de (2.9a), verifica-se que a intensidade do espectro dos pulsos não se altera durante sua propagação pela fibra, $|A(z, f)|^2 = |\tilde{A}(0, f)|^2$. Essa é uma característica importante de pulsos que se propagam, exclusivamente, sob o regime de dispersão. A Equação (2.9b) depende da forma do pulso incidente na fibra, por meio de (2.9c). Para exemplificar seu efeito, se a potência de pico desse pulso for P_0 e ele possuir um perfil gaussiano [70]

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right), \quad (2.10)$$

a Equação (2.9b) indica que após se propagar por uma distância z , ele terá a forma

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 - i\beta_2 z}} \exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)}\right). \quad (2.11)$$

Comparando (2.10) e (2.11) verifica-se que à medida que o pulso se propaga, exclusivamente sob o regime de dispersão de primeira ordem, ele sofrerá um alargamento temporal e uma diminuição em sua amplitude. Pode-se analisar o efeito do termo de dispersão de segunda ordem, proporcional a β_3 , de maneira similar à apresentada anteriormente. No domínio do tempo, o principal resultado da dispersão de segunda ordem é distorcer a forma do pulso, de tal modo que ele se torna assimétrico com uma estrutura oscilatória em uma de suas extremidades. Entretanto, para que isso aconteça a magnitude

de $\beta_3(2\pi f)^3$ deve ser comparável à de $\beta_2(2\pi f)^2$. Um ponto importante a ser observado é que a importância relativa dos efeitos de dispersão de segunda ordem aumenta ao se considerar, em um modelo um pouco mais realista, a dependência da dispersão com o comprimento de onda. Uma discussão mais detalhada pode ser encontrada em [73].

Em Fibras Padrão, β_2 varia de ~ 0 ps²/km, na região em torno de 1310 nm, a cerca de -20 ps²/km, em torno de 1550 nm. Enquanto que β_3 varia de $0,13$ ps³/km a $0,08$ ps³/km, nessas mesmas regiões espectrais. Já em Fibras DSF, β_2 varia, aproximadamente, de 1 a -1 ps²/km, e β_3 se mantém aproximadamente constante em $0,075$ ps³/km, entre 1540 e 1560 nm.

A dispersão de segunda ordem será mais importante, qualquer que seja o tipo de fibra, nas regiões em que o comprimento de onda está próximo ao comprimento de onda de dispersão nula, ou nas situações em que a largura temporal dos pulsos é inferior a ~ 100 fs.

Uma maneira usual para verificar a relevância da dispersão de segunda ordem é por meio da introdução de duas figuras de mérito [70]:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad \text{e} \quad (2.12a)$$

$$L_{D'} = \frac{T_0^3}{|\beta_3|}, \quad (2.12b)$$

nas quais T_0 é a meia-largura do pulso no ponto em que sua intensidade decai a $1/e$ do valor máximo e L_D e $L_{D'}$ são chamados, respectivamente, de comprimento de dispersão de primeira ordem e comprimento de dispersão de segunda ordem.

Quanto maior a razão $\frac{L_D}{L_{D'}}$, menos significativa a ação dos efeitos de dispersão de segunda ordem.

Como exemplo do efeito da dispersão sobre os pulsos ópticos, na Fig. 2.7, é apresentada a propagação de um pulso gaussiano (em campo) por fibras ópticas STDF e DSF, sob influência exclusiva da dispersão de primeira ordem.

Em ambos casos, $T_0 = 100 \text{ ps}$ na entrada da fibra e o perfil do pulso é ilustrado para as distâncias $z = 0$, $z = 2L_D$ e $z = 4L_D$. As dispersões utilizadas foram $D(1312 \text{ nm}) = 0 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ e $D(1550 \text{ nm}) = 17 \text{ ps}/(\text{nm.km})$, para a fibra STDF, e $D(1550 \text{ nm}) = 0 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ e $D(1553 \text{ nm}) = 0.2 \text{ ps}/(\text{nm.km})$, para a fibra DSF. O comprimento de onda da portadora foi $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$ e $\lambda_c = 1553 \text{ nm}$, respectivamente, para as simulações na fibra DSF e STDF.

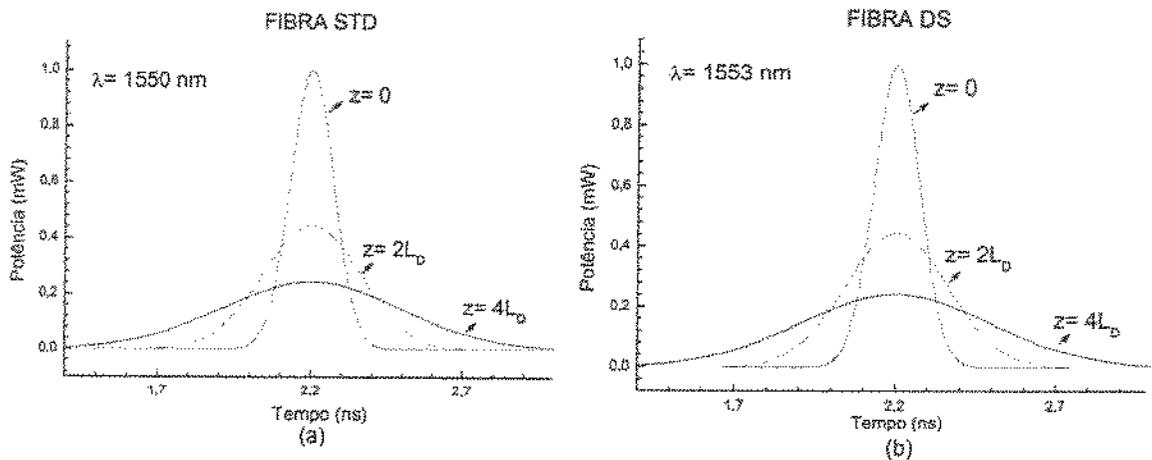


Fig. 2.7 Simulações para a propagação de pulsos gaussianos, sob regime de dispersão de primeira ordem. As distâncias de propagação são $z = 2L_D$ e $z = 4L_D$ e $T_0 = 100 \text{ ps}$, $\alpha = 0 \text{ dB/km}$ e $\gamma = 0 \text{ (W.km)}^{-1}$. (a) Fibra STDF: $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$, $D(1312 \text{ nm}) = 0 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ e $D(1550 \text{ nm}) = 17 \text{ ps}/(\text{nm.km})$. (b) Fibra DSF: $\lambda_c = 1553 \text{ nm}$, $D(1550 \text{ nm}) = 0 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ e $D(1553 \text{ nm}) = 0,2 \text{ ps}/(\text{nm.km})$.

Os resultados obtidos para as propagações nas fibras STDF e DSF são bastante similares. Isso é razoável, uma vez que as simulações consideraram a mesma distância de propagação em relação ao comprimento de dispersão de primeira ordem, L_D . Em $z = 2L_D$ e $z = 4L_D$ as potências de pico caem para, respectivamente, $\sim 44\%$ e $\sim 24\%$ da potência de pico do sinal de entrada na fibra. Outra observação importante é que a área sob cada uma das curvas da Fig. 2.7 tem sempre o mesmo valor. Isso está em concordância com

a ausência de atenuação (conservação da energia). Em geral, o efeito conjunto das dispersões de primeira e segunda ordem é o alargamento temporal do pulso propagado, juntamente com o surgimento de distorções na sua forma. Em [73] podem ser encontradas simulações ilustrando este efeito conjunto.

c) MODULAÇÃO CRUZADA DE FASE E AUTO MODULAÇÃO DE FASE

Considere agora que é feita a propagação de dois canais ao longo da fibra óptica, ou seja, é considerando um sistema WDM de dois canais. É possível mostrar que a propagação dos pulsos será descrita pelo seguinte par de equações acopladas [70]

$$\frac{\partial A_i}{\partial z} + \beta_{1i} \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2i} \frac{\partial^2 A_i}{\partial t^2} + \frac{\alpha_i}{2} A_i = i\gamma_i \left[|A_i|^2 + 2|A_j|^2 \right] A_i, \quad (2.13)$$

nas quais A_i , β_{1i} , β_{2i} , α_i e γ_i têm o mesmo significado que na seção anterior, porém são aplicados para o i -ésimo canal ($i = 1, 2; j = 1, 2; i \neq j$).

Quanto a esses parâmetros, pode-se dizer que, nos casos de maior interesse atual em telecomunicações, os coeficientes de atenuação e não-linear da fibra óptica monomodo têm pequena dependência com a frequência e podem ser aproximados por constantes, $\alpha_i = \alpha$ e $\gamma_i = \gamma$. Se os $\beta_{1i}(\lambda)$ forem suficientemente próximos, pode-se adotar um referencial que se mova com velocidade $1/\beta_{1i}$ simplificando a Equação (2.13), em acordo com o discutido no início desta subseção. Entretanto, para a maioria das fibras utilizadas atualmente, $\beta_{2i}(\lambda)$ só será, aproximadamente constante se os comprimentos de onda de operação estiverem suficientemente distantes do comprimento de onda de dispersão nula. Em particular, sempre se deve considerar a dependência entre a dispersão de primeira ordem e a frequência para fibras DSF, NZDF e HNL-DSF operando na terceira janela.

É válido ressaltar que as Equações (2.13) só são válidas se as distribuições modais nas duas frequências, f_1 e f_2 , forem aproximadamente as mesmas. Essa consideração é verificada no caso de fibras monomodo.

A Equação (2.13) é muito parecida com a NLSE (2.1). A diferença está no último termo do lado direito da igualdade, $i2\gamma_1|A_2|^2 A_1$. Esse termo é responsável pelo acoplamento entre essas duas equações. Note que ele é análogo ao termo responsável pela Auto-Modulação de Fase, i.e. $i\gamma_1|A_1|^2 A_1$, porém envolve o dobro da potência da onda copropagante. Por isso, o fenômeno descrito por ele é conhecido por Modulação Cruzada de Fase XPM.

Assim, na XPM, a fase óptica de um canal torna-se modulada pela potência do outro canal e a dispersão cromática converte essas flutuações de fase em variações de amplitude, gerando o que é chamado de interferência (*crosstalk*) de um canal sobre outro. O mesmo fenômeno ocorre se houver mais de dois canais, como em sistemas WDM típicos. Nesse caso, a potência média dos outros canais é que será responsável pela modulação da fase óptica de um dado canal. A SPM produz efeito semelhante ao XPM, entretanto este efeito é gerado por um canal em cima dele mesmo.

As penalidades geradas pela interferência (*crosstalk*) induzida pela XPM e SPM são os principais limitantes dos atuais sistemas WDM sobre fibras monomodo padrão e vêm sendo extensivamente relatadas na literatura [74]-[82].

Uma última importante observação quanto a XPM é que ela sempre ocorre em conjunto com a SPM. Isso pode ser facilmente verificado a partir de (2.13).

d) **ESPALHAMENTO ESTIMULADO DE RAMAN, ESPALHAMENTO ESTIMULADO DE BRILLOUIN E SELF-STEEPENING**

O Espalhamento Estimulado de Raman, Espalhamento Estimulado de Brillouin, a Instabilidade Modulacional, o Auto-Desvio de Frequência e o efeito de *Self-Steepening* só serão prejudiciais à transmissão de sinais por fibras ópticas monomodo se elevados níveis de potências são transmitidos por canal [70]; tal situação não corresponde a um caso de interesse prático. Portanto, não iremos entrar no mérito destes efeitos. Informações detalhadas acerca de suas origens e comportamento podem ser obtidas em [83] – [94].

2.3.2. Mistura de Quatro Ondas

a) CARACTERIZAÇÃO

Fisicamente, a Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*) é caracterizada pela geração de novas frequências a partir da interação entre as frequências (canais) que estão se propagando pela fibra. Esses canais, mediados pelas propriedades não-lineares da fibra, fornecem parte de sua energia para a geração de sinais em novas frequências [70]. Para fibras DSF (1550 nm) e separação entre canais de 25 GHz entre canais, 80% da energia pode ser transferida para outras frequências. Entretanto, para a fibra padrão (dispersão de 17 ps/nm.km) o efeito é mínimo.

O estudo da propagação de ondas em diferentes portadoras, ou seja, o estudo de propagação de sinais em sistemas WDM, pode ser feito a partir da análise de equações similares à NLSE, (2.1). Entretanto, deve-se levar em consideração que o campo elétrico $\vec{E}(\vec{r}, t)$ e as polarizações, linear $\vec{P}_L(\vec{r}, t)$ e não-linear $\vec{P}_{NL}(\vec{r}, t)$, devem conter termos relativos a todas as frequências ópticas. Se é considerado apenas quatro canais se propagando pela fibra, as equações de $\vec{E}(\vec{r}, t)$, $\vec{P}_L(\vec{r}, t)$ e $\vec{P}_{NL}(\vec{r}, t)$ podem ser escritas sob a forma [70]:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{i=1}^4 [E_i \exp(k_i z - i2\pi f_i t)] + c.c., \quad (2.14a)$$

$$\vec{P}_L(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{i=1}^4 [P_{Li} \exp(k_i z - i2\pi f_i t)] + c.c., \quad (2.14b)$$

$$\vec{P}_{NL}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{i=1}^4 [P_{NLi} \exp(k_i z - i2\pi f_i t)] + c.c., \quad (2.14c)$$

nas quais

$$k_i = \frac{n_i 2\pi f_i}{c}. \quad (2.14d)$$

As componentes não-lineares dessa polarização conterão um número elevado de termos, envolvendo o produto entre três campos elétricos e a exponencial da fase entre esses campos e a polarização induzida no material. Escolhendo, por exemplo, a quarta onda, obtém-se

$$P_{NL_4} = \frac{3\varepsilon_0}{4} \chi_{xxxx} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left[|E_4|^2 + 2(|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_3|^2)E_4 \right] + \\ & 2E_1E_2E_3 \exp[i(k_1 + k_2 + k_3 - k_4)z - i2\pi(f_1 + f_2 + f_3 - f_4)t] + \\ & 2E_1^*E_2E_3 \exp[i(-k_1 + k_2 + k_3 - k_4)z - i2\pi(-f_1 + f_2 + f_3 - f_4)t] + \\ & 2E_1E_2^*E_3 \exp[i(k_1 - k_2 + k_3 - k_4)z - i2\pi(f_1 - f_2 + f_3 - f_4)t] + \\ & 2E_1E_2E_3^* \exp[i(k_1 + k_2 - k_3 - k_4)z - i2\pi(f_1 + f_2 - f_3 - f_4)t] + \\ & 2E_1^*E_2^*E_3 \exp[i(-k_1 - k_2 + k_3 - k_4)z - i2\pi(-f_1 - f_2 + f_3 - f_4)t] + \\ & 2E_1^*E_2E_3^* \exp[i(-k_1 + k_2 - k_3 - k_4)z - i2\pi(-f_1 + f_2 - f_3 - f_4)t] + \\ & 2E_1E_2^*E_3^* \exp[i(k_1 - k_2 - k_3 - k_4)z - i2\pi(f_1 - f_2 - f_3 - f_4)t] + \\ & 2E_1^*E_2^*E_3^* \exp[i(-k_1 - k_2 - k_3 - k_4)z - i2\pi(-f_1 - f_2 - f_3 - f_4)t] \end{aligned} \right\}. \quad (2.15)$$

Nesta equação, o primeiro termo entre colchetes, proporcional a E_4 , é responsável pelos fenômenos de auto-modulação de fase e modulação cruzada de fase, já discutidos na subseção anterior. Os outros oito termos são responsáveis pelo fenômeno chamado de Mistura de Quatro Ondas.

Cada um deles só será apreciável quando a sua respectiva fase for, aproximadamente, nula para quaisquer z e t . Essa condição é conhecida como condição de casamento de fase e expressa, no caso da onda considerada, por

$$\begin{aligned} \Delta k &= (-1)^p k_1 + (-1)^q k_2 + (-1)^r k_3 - k_4 \\ &= (-1)^p \frac{2\pi n_1 f_1}{c} + (-1)^q \frac{2\pi n_2 f_2}{c} + (-1)^r \frac{2\pi n_3 f_3}{c} - \frac{2\pi n_4 f_4}{c} \cong 0, \end{aligned} \quad (2.16a)$$

na qual p , q e r são inteiros que podem assumir os valores 0 ou 1. No caso em que as ondas estão suficientemente próximas em frequência, de tal forma que a variação do índice de refração possa ser desprezada, essa condição pode ser aproximada pela relação

$$f_4 = (-1)^p f_1 + (-1)^q f_2 + (-1)^r f_3. \quad (2.16b)$$

Em (2.15) pode-se observar a existência de três classes de termos responsáveis pela geração dos efeitos de FWM. A primeira dessas corresponde aos quatro termos que possuem três frequências precedidas pelo mesmo sinal e uma outra com sinal oposto. Esses termos são responsáveis, por exemplo, pelo fenômeno de geração de terceiro harmônico [1], [70]. Entretanto, a condição de casamento de fase para esses termos dificilmente é verificada e, a não ser em situações muito especiais, seus efeitos não são muito significativas para os casos de interesse em telecomunicações [70].

A segunda classe corresponde ao termo que possui todas as frequências f_i precedidas pelo sinal negativo. A contribuição deste termo será muito pequena, uma vez que a condição (2.16) nunca será satisfeita.

A última dessas classes, e de maior interesse para o trabalho, é composta pelos três termos que possuem duas frequências f_i precedidas pelo sinal negativo e as outras duas pelo sinal positivo. Se, além de f_4 , a outra frequência precedida por sinal negativo for f_3 , a condição de casamento de fase será satisfeita para

$$f_4 + f_3 = f_1 + f_2. \quad (2.17)$$

Essa condição implica que dois fótons de frequências f_1 e f_2 serão aniquilados e dois fótons de frequências f_3 e f_4 serão gerados pelo fenômeno de Mistura de Quatro Ondas. Durante esse processo, a energia e o *momentum* dos fótons envolvidos devem se conservar.

A Equação (2.17) prevê que a potência de dois canais pode ser transferida para frequências que já transmitem seus próprios sinais, originando produtos FWM, também conhecidos como interferência (*crosstalk*) FWM ou ruído FWM. De fato, a interferência

(*crosstalk*) gerada pela FWM é uma das principais fontes de limitação do alcance dos sistemas que empregam fibras de baixa dispersão [95] – [98]. Se, inicialmente, tem-se W canais propagando-se pela fibra, o número de produtos gerados será [1]

$$NP_{FWM} = W(W - 1)^2. \quad (2.18)$$

A frequência na qual os produtos FWM são gerados é dada por

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \quad i \neq j, j \neq k. \quad i, j, k = 1, 2, \dots, W. \quad (2.19)$$

A Fig. 2.8 traz uma ilustração da geração de produtos FWM para o caso em que se tem um sistema WDM com três canais. Perceba que alguns dos produtos são gerados sobre os canais ativos, isto ocasiona a degradação de suas relações sinal-ruído e portanto limita o alcance do sistema. Além disso, note que as frequências vizinhas a f_i e f_j são também contaminadas pelo ruído FWM. Num cenário ponto-a-ponto na qual os canais são estaticamente alocados, tal contaminação não é muito importante já que esses produtos serão eliminados pelos filtros na recepção. Entretanto, como visto mais tarde, esse ruído não pode ser desconsiderado em um cenário de rede no qual os canais são alocados dinamicamente em redes ópticas transparentes, pois as frequências ora livres, poderão ser requisitadas para abrigarem uma nova conexão na rede.

Um comentário final é que é levada em consideração apenas a interação entre os canais que foram inicialmente introduzidos na fibra - essa interação é chamada de *Interação de Primeira Ordem*. A FWM também proporciona a interação entre os produtos gerados e os canais incidentes na fibra caracterizando uma *Interação de Segunda Ordem*. Pode-se também ter interações de ordens superiores, levando a um processo contínuo de geração de novos produtos FWM. Felizmente, a eficiência de geração de produtos FWM diminui com a ordem das interações [99] - [101] e para os níveis de potência utilizados por canal nos atuais sistemas fotônicos, os produtos de alta ordem podem ser desprezados.

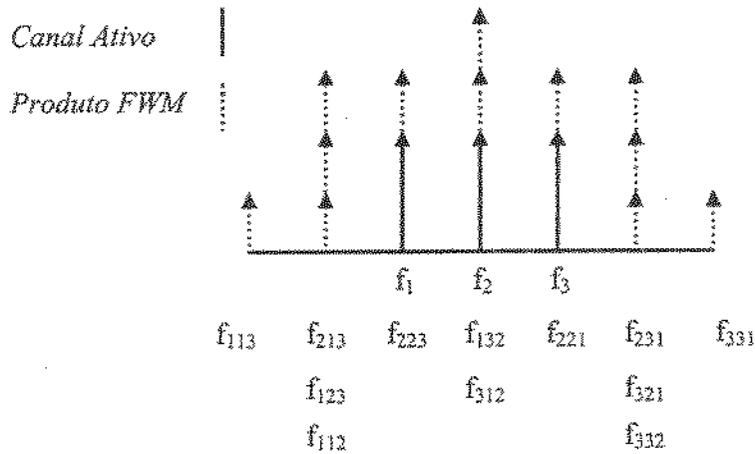


Fig. 2.8: Ilustração da geração da interferência (*crosstalk*) FWM.

b) IMPACTO NA TRANSMISSÃO DE SINAIS PELA FIBRA ÓPTICA

Como foi visto até agora, os efeitos de transmissão pela fibra óptica são previstos pela NLSE. Se um cenário ponto-a-ponto é considerado em que os canais são alocados estaticamente e, portanto, inexistem algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda, a NLSE pode ser utilizada diretamente na etapa de projeto de um dado sistema WDM. Em geral, os Simuladores de Sistemas Fotônicos, comerciais e acadêmicos, aplicam um determinado método numérico (na maioria dos casos o método de *Split-Step Fourier* [102] – [104]) para resolver a NLSE e, conseqüentemente, conhecer o impacto dos efeitos sobre o desempenho do sistema em análise. Todavia, como será visto adiante, numa rede óptica transparente utilizar tal procedimento, i.e. resolver a NLSE na parte do algoritmo RWA responsável pelo cálculo das limitações da camada física não é uma estratégia viável devido à sua considerável complexidade. Uma alternativa para esse caso é utilizar modelos matemáticos que façam uma boa estimativa do impacto do efeito que se deseja estudar.

Especificamente no caso da FWM, Hill *et al.* [101] desenvolveram expressões analíticas para estimar a potência do ruído FWM. Essa formulação, posteriormente modificada por Shibata *et al.* [105] e, mais recentemente, por Song *et al.* [106], vem sendo bastante utilizada para avaliar a interferência (*crosstalk*) induzida pela FWM. Segundo ela, a potência do ruído FWM, é dada por

$$P_{FWM}(L) = \frac{\eta}{9} \delta^2 \gamma^2 P_i P_j P_k \exp(-\alpha L) L_{off}^2, \quad (2.20a)$$

com

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}, \quad (2.20b)$$

e na qual P_i , P_j e P_k são as potências, respectivamente, dos canais de frequências f_i , f_j e f_k , L é o comprimento da fibra, δ é o fator de degenerescência, igual a três para dois canais ou igual a seis para três canais e a eficiência η é dada por

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta k'} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \text{sen}^2(\Delta k' L / 2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\}, \quad (2.20c)$$

com

$$\Delta k' = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[D_c + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) S(\lambda_k) \right] - \gamma (P_i + P_j - P_k) \left[\frac{1 - \exp(-\alpha L_{\text{eff}})}{\alpha L_{\text{eff}}} \right], \quad (2.20d)$$

Na última expressão, λ_k representa o comprimento de onda correspondente à frequência f_k na qual um dos fótons é gerado, $\Delta f_{mn} = |f_m - f_n|$ é o espaçamento entre os canais em análise, para $m, n = (i, j, k)$ e $S(\lambda_k) = \left. \frac{d}{d\lambda} D(\lambda) \right|_{\lambda=\lambda_k}$ é a inclinação da dispersão em λ_k .

Percebe-se que o fator de casamento de fase, $\Delta k'$, em (2.20d) é dependente da potência dos canais. Isto garante que esse modelo também pode ser utilizado em situações em que as contribuições do XPM e SPM não são ignoradas [107]. Nesse modelo a influência da taxa de bits não é contemplada, pois só recentemente foi desenvolvido um modelo para a estimativa da potência FWM para canais com modulação RZ (Return to Zero) [108].

A eficiência da FWM é incrementada com a condição de casamento de fase dos canais propagantes [109]. As possibilidades para se obter um casamento de fase são [70]: (i) operar próximo do comprimento de onda de dispersão nula; (ii) operar no regime de dispersão anômalo (iii) utilizar espaçamento entre canais pequeno.

c) TÉCNICAS DE MINIMIZAÇÃO DO FWM

Uma das primeiras técnicas para se minimizar o FWM em sistemas ponto-a-ponto foi desenvolvida por *Forghieri et al.* [110]. Essa técnica consiste no projeto da alocação dos canais ao longo do espectro de frequências de forma que a diferença entre as frequências de qualquer dois canais não pode ser repetida. Ou seja, o sistema WDM possui uma alocação com canais desigualmente espaçados em frequência. Com isso garante-se a ausência de produto FWM sobre qualquer canal. Por exemplo, a Fig. 2.9 mostra o caso de um sistema WDM com três canais; diferentemente do caso igualmente espaçado (ver Fig. 2.8), nenhum produto foi gerado sobre os canais em f_1 , f_2 e f_3 . A alocação desigualmente espaçada pode ser sintetizada no lema a seguir [111].

Lema 1: Para evitar que produtos FWM sejam gerados sobre qualquer um dos W canais de um dado sistema WDM, a separação em frequência entre quaisquer dois canais deve ser distinta.

Prova:

┌ Para que nenhum produto FWM caia sobre um canal do sistema WDM, f_{ijk} em (2.19) não pode coincidir com um dos canais existentes no sistema WDM, por exemplo f_a , para $i, j, k, a \in [1, W]$ e $k, a \neq \{i, j\}$. Portanto, isto é equivalente a interpretar (2.19) como

$$f_a \neq f_i + f_j - f_k \Rightarrow \therefore f_a - f_i \neq f_j - f_k. \quad (2.21)$$

Ou seja, a separação em frequência entre quaisquer dois canais deve ser diferente. ┘

A título de ilustração, considere-se agora um sistema WDM com quatro canais operando sob a grade recomendada pelo ITU [50] com fatias de 100 GHz. A Fig. 2.10 mostra uma possível alocação desigualmente espaçada, note que as frequências f_3 , f_4 e f_6 não podem ser utilizadas devido à restrição (2.21). A grande desvantagem dessa técnica é que existe um fator de expansão da largura de banda total do sistema WDM desigualmente espaçado quando comparado com um igualmente espaçado [112]. Para o exemplo da Fig. 2.10, esse fator é igual a dois. Ou seja, é necessário o dobro da largura de banda para alocar os quatro canais.

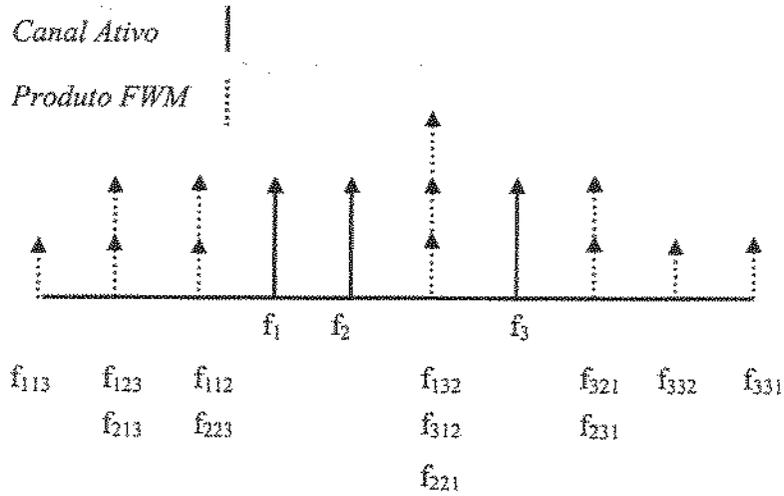


Fig. 2.9: Ilustração da geração da interferência (*crosstalk*) FWM em um sistema WDM desigualmente espaçado.

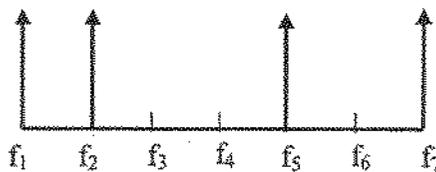


Fig. 2.10: Ilustração da técnica de alocação desigualmente espaçada.

Outras propostas para a minimização do FWM têm como base a técnica de alocação desigualmente espaçada descrita anteriormente, mas utilizada de uma maneira diferente [113] - [114].

Em outra frente, tentou-se combater o FWM utilizando gerenciamento de dispersão cromática [115], [98]. Como visto anteriormente, uma das maneiras de se viabilizar o casamento de fase entre os canais do sistema WDM é operar em regiões do espectro da fibra em que se tenha baixa dispersão cromática. Alguns trabalhos seguiram essa direção e concluíram que a compensação total de dispersão do sistema acaba sendo benéfica para o efeito do FWM. Outros trabalhos conseguiram diminuir o impacto do efeito trabalhando com um esquema de gerenciamento de dispersão que sempre deixa o sistema com uma dispersão residual [116] - [117], assim o casamento de fase entre os canais é fraco e conseqüentemente a eficiência do FWM diminui. Contudo, ainda pode continuar prejudicial dependendo de outros parâmetros do sistema, como por exemplo, espaçamento entre os canais. Dessa linha de raciocínio surgiram as fibras NZDF, as quais conseguiram amenizar o problema do FWM nos sistemas WDM. As fibras NZDF possuem um perfil de dispersão cromática que tem como característica principal a existência de uma dispersão variando de 2 – 8 ps/nm.km na banda C (1530 – 1565 nm). Exemplos comerciais de fibras NZDF são a Fibra LS, da *Corning Corporation*, e a Fibra *True Wave™*, da Lucent Technologies.

Embora as técnicas de minimização do FWM até aqui apresentadas tenham apresentado relativo sucesso, o espaçamento reduzido entre canais admitido pela nova grade do ITU-T pode voltar a favorecer a eficiência do FWM [50]. Estudos experimentais têm estudado o impacto do FWM em sistemas fotônicos operando com fibras NZDF quando o espaçamento entre os canais é reduzido [51]. Além disso, trabalhos recentes mostraram que se em vez de modulação *On-Off Keying* (OOK) modulação com intensidade constante (por exemplo, modulação em fase) for utilizada, a FWM continua sendo o efeito limitante da capacidade nos sistemas WDM, mesmo em sistemas usando fibras NZDF [9] – [11].

2.3.3. Efeitos não Previstos pela NLSE

a) DISPERSÃO DE MODO DE POLARIZAÇÃO (PMD - POLARIZATION-MODE DISPERSION)

Uma das condições de validade da NLSE, (2.1), é que a polarização seja mantida ao longo da fibra; ou seja, a fibra é Não-Birrefringente [70]. Como conseqüência, quando essa equação é utilizada para descrever a propagação dos sinais por uma fibra óptica

monomodo, o impacto do efeito de PMD não é visto no resultado final. Para que o PMD possa ser contemplado pela NLSE, duas equações acopladas descrevendo a propagação em cada modo devem ser escritas [70].

Sob condições ideais de perfeita geometria cilíndrica e anisotropia do material, o modo excitado na direção x não possui nenhuma interação com o polarizado na direção y . Mas, na prática, a fibra não é verdadeiramente monomodo, pois suporta dois modos degenerados que são polarizados em duas direções ortogonais. Em condições reais, pequenas imperfeições na geometria cilíndrica e pequenas flutuações na anisotropia do material resultam em um acoplamento entre os modos polarizados, pois agora cada modo se propaga pela fibra com constantes de propagação distintas. Como a energia de um pulso que se propaga pela fibra se divide pelos dois modos, tal diferença na constante de propagação é traduzida em um alargamento temporal desse pulso [1]. Esse efeito é chamado de Dispersão de Modo de Polarização.

Um ponto importante é que o alargamento temporal introduzido pela PMD varia com o passar do tempo, por causa, por exemplo, de variações de temperatura, tempo de uso da fibra, etc. Portanto à medida que a fibra vai envelhecendo, a PMD muda o seu perfil. Considera-se que tal atraso temporal é uma variável aleatória que segue uma distribuição de Maxwell [118]. O valor médio desta distribuição ($\Delta\tau$), chamado aqui de atraso diferencial médio entre os dois estados de polarização, em um enlace de comprimento L obedece a relação [1]

$$\Delta\tau = D_{PMD} \sqrt{L} . \quad (2.22)$$

na qual D_{PMD} é o parâmetro de PMD da fibra e é medido em ps/\sqrt{km} . Para fibras mais antigas esse parâmetro figura entre $0,5 - 2 ps/\sqrt{km}$. Já para fibras mais modernas esse valor está em torno de $0,1 ps/\sqrt{km}$.

A ITU por meio de sua recomendação [119] estabelece alguns limites de projeto para a penalidade imposta pela PMD.

2.4. VISIBILIDADE DA CAMADA FÍSICA PELA REDE CLIENTE

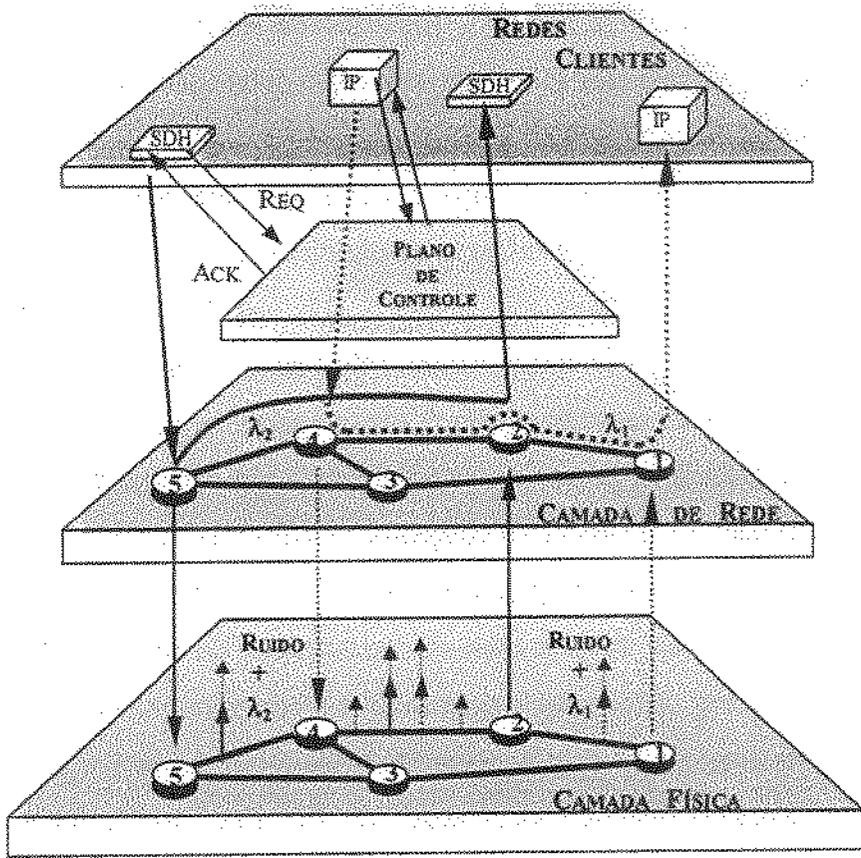
Pelo o que foi visto até agora, percebe-se que existe uma necessidade funcional de se desenvolver modelos de interligação entre as redes clientes e a rede óptica. Os modelos podem ser traduzidos em formas para a inclusão de efeitos da camada física nos algoritmos CAC/RWA's. Para que possam ser aplicadas em redes reais, essas estratégias devem possuir concomitantemente baixa complexidade computacional, pois dado que uma requisição é solicitada pela rede cliente à rede óptica, o CAC/RWA não pode demorar muito tempo para dar uma resposta, e uma representação confiável das limitações da camada física se faz necessária. Entretanto, para a completa caracterização da maioria desses efeitos é preciso se resolver a NLSE, (2.1), por meio de um método numérico (normalmente o *Split-Step Fourier*). Sem contar com os efeitos não previstos pela NLSE, como por exemplo, ASE e saturação dos EDFA's, os quais são tratados na etapa de planejamento do sistema WDM em questão. Isto é o que é feito no projeto de sistemas WDM ponto-a-ponto. Contudo, em um cenário de rede com tráfego dinâmico, no qual conexões são ativadas e encerradas dinamicamente, utilizar tal procedimento pode ser inviável devido ao tempo demandado para a sua execução e a sua alta complexidade, já que é necessária a resolução da NLSE por um método numérico. Além disso, como visto anteriormente, tal abordagem resulta em pequenos domínios de transparência e em uma rede com alto custo [3].

Portanto, uma alternativa para a inclusão dos limitantes da camada física nos CAC/RWA's é a utilização de modelos analíticos consagrados na literatura e/ou desenvolver heurísticas para serem aplicadas nos algoritmos. Devido às razões colocadas na Seção de Introdução desta Tese, optou-se por estudar o efeito de FWM, o qual será incluído nos CAC/RWA's apresentados nos Capítulos 3, 4 e 5 desta Tese de acordo com o modelo proposto a seguir.

2.4.1. Modelo de Inclusão do FWM

O relacionamento entre o plano de controle, as redes clientes e física é ilustrado na Fig. 2.11a. Percebe-se que as requisições dos clientes são feitas diretamente à entidade que gerencia o plano de controle, a qual adota-se ser centralizada e é a responsável por acionar

o algoritmo CAC/RWA solicitando uma rota e um comprimento de onda que atendam a um determinado nível de QoS. Com a definição da requisição feita, ou seja, com a definição dos nós origem e destino e o nível de QoS desejado, o algoritmo CAC/RWA inicia seu trabalho fazendo as análises necessárias. Basicamente, dois grandes passos são realizados pelos algoritmos CAC/RWA's propostos neste trabalho. O primeiro passo é ligado à restrição de continuidade de comprimento de onda, ou seja, um comprimento de onda não pode ser utilizado simultaneamente no mesmo enlace; assim é necessário que o CAC/RWA conheça o estado dos enlaces para poder escolher o comprimento de onda adequado para servir uma determinada conexão. O segundo grande passo é relacionado à estimação do impacto dos efeitos da camada física sobre a qualidade do sinal (OSNR e/ou BER). Nota-se que diferentemente da Fig. 2.1 em que não existe preocupação com o que ocorre na camada física, na Fig. 2.11a a geração de ruído sobre os caminhos ópticos é representada. Por exemplo, a conexão que liga os roteadores IP, que está usando o comprimento de onda λ_1 , divide o enlace 4 – 2 com a conexão em λ_2 ligando estações SDH. Devido aos efeitos não-lineares, nesse enlace ocorre interação entre essas conexões com a geração de ruído sobre elas e sobre frequências laterais. O ruído presente nas frequências laterais é eliminado nos OXC's da rede pelos filtros ópticos dos MUX/DEMUX, mas o ruído gerado em cima de uma conexão não pode ser eliminado por tais filtros ópticos. Assim, tanto a conexão em λ_1 quanto a λ_2 irão carregar esse ruído até os seus destinos finais. Se a potência do ruído gerado for suficientemente alta, o nível de QoS óptico exigido pelos clientes pode ser violado. As consequências disso podem variar desde disparo de alarmes de falhas na rede seguido do acionamento dos mecanismos de proteção e restauração, até a simples perda de pacotes IP fazendo com que protocolos como o TCP acionem seus mecanismos de reenvio de pacotes [12].



a)

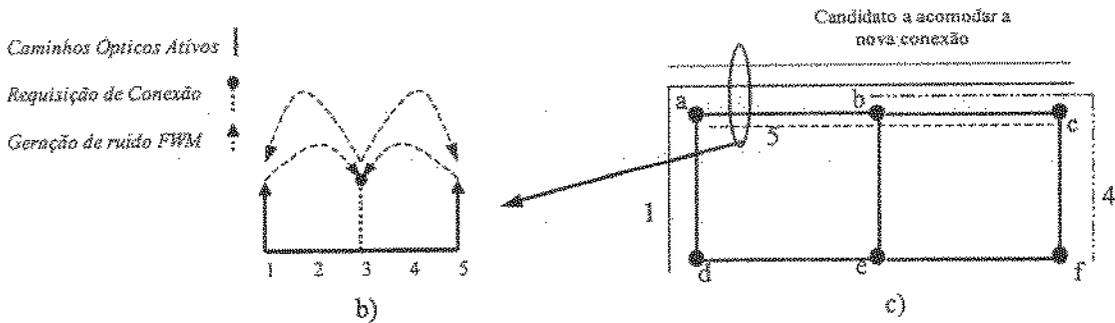


Fig. 2.11: a) Interligação entre as camadas clientes, de rede e física. b) Interação entre os caminhos ópticos c) Rede hipotética com um enlace sob análise.

Sendo assim, é preciso que os CAC/RWA's possuam mecanismos para evitar e/ou minimizar essas situações. Como no passo da verificação da restrição de continuidade, para que o CAC/RWA possa estimar a potência do FWM também é preciso que a entidade que controla a rede informe quais são os parâmetros dos caminhos ópticos (comprimentos de onda, potências, etc) que dividem algum enlace com a rota na qual a requisição será

possivelmente alocada. Nas Figs. 2.11b e 2.11c mostra-se um exemplo de como essa estimativa pode ser feita numa rede que opera com cinco comprimentos de onda, i.e. $W = 5$. Suponha que em um dado momento chega um pedido de conexão entre os nós 'a' e 'c' na Fig. 2.11c e que a rota a – b – c seja a escolhida para abrigar esta requisição. Imediatamente, o plano de controle informa ao algoritmo RWA quais são os caminhos ópticos ativos que dividem enlaces com a rota a – b – c. Em linhas gerais, o que o CAC/RWA faz daí em diante é computar o ruído FWM enlace a enlace até o último enlace da rota a – b – c. Como pode ser visto na Fig. 2.11c, no primeiro enlace da rota em questão os comprimentos de onda '1' e '5' estão servindo outras conexões que dividem este enlace com a rota da requisição. Sendo assim, os comprimentos de onda '2', '3' e '4' estão livres e qualquer um deles pode ser alocado para a requisição caso obedeça ao requisito de QoS exigido. O CAC/RWA então inicia a etapa de investigação do ruído FWM no primeiro enlace, como mostra a Fig. 2.11b para o caso em que o comprimento de onda '3' está sob análise. As políticas empregadas para se levar em conta a influência que a requisição tem sobre os demais caminhos ópticos e vice-versa serão descritas nos Capítulos 3 e 4 desta Tese.

O CAC/RWA faz a estimativa da potência do ruído FWM, a qual é denotada por P_{FWM} , em um enlace usando o modelo analítico descrito na Subseção 2.1.2, especificamente (2.20) é utilizada. Os enlaces são constituídos por Fibras de Dispersão Deslocada, caracterizando o cenário de pior caso para geração de FWM, tendo a dispersão cromática variando com o comprimento de onda, denotada por $D_c(\lambda)$, de acordo com

$$D_c(\lambda) = S_0(\lambda - \lambda_0), \quad (2.23)$$

em que λ_0 é o comprimento de onda de dispersão nula e S_0 é a inclinação da curva de dispersão cromática.

Na aproximação do ruído gaussiana, a BER de um sinal OOK modulado em intensidade pode ser calculada por [120]

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-t^2) dt. \quad (2.24)$$

Assumindo que tanto o ruído térmico quanto o ruído *shot* são desprezados, na presença do ruído FWM o fator Q pode ser calculado como

$$Q = \frac{R_o P_s}{\sqrt{N_{FWM}}}, \quad (2.25)$$

em que N_{FWM} é o batimento sinal-ruído FWM e é escrito como

$$N_{FWM} = 2R_o^2 \frac{P_{FWM}}{8}. \quad (2.26)$$

Em (2.25) e (2.26) R_o é a responsividade do receptor óptico, P_s é a potência do canal sob análise no receptor. $P_s = P_i e^{-\alpha L}$, P_i é a potência do canal lançada na entrada da fibra óptica.

Como mencionado anteriormente, para avaliar o impacto do ruído ao longo de uma rota, deve-se somar as contribuições de cada enlace. Assim, a potência total do ruído FWM no nó destino, denotada por P_{DN} , gerado sobre uma dada requisição de conexão ou sobre um caminho óptico pode ser calculado por

$$P_{DN}(f_a) = \sum_{c=1}^H \sum_{f_{kc}=f_{ic}+f_{jc}-f_a} \sum_{f_{jc}} \sum_{f_{ic}} P_{FWM}(f_{ic}, f_{jc}, f_{kc}), \quad (2.27)$$

em que H é o número de saltos ou *hops* da rota; f_a é a frequência equivalente ao comprimento de onda da conexão sob análise; P_{FWM} é calculado usando (2.20); f_i , f_j , e f_k ($i, j, k = 1, 2, \dots, W$; $i \neq k$, $j \neq k$) são as frequências ópticas equivalentes aos comprimentos de onda dos caminhos ópticos interferentes, ou seja os caminhos ópticos que dividem algum enlace com conexão ou requisição sob análise; W é o número de comprimentos de onda por enlace da rede.

Com P_{DN} calculado, a BER da conexão em análise pode ser estimada de acordo com (2.24) – (2.26). Com isso o CAC/RWA pode tomar a decisão sobre o bloqueio ou não da requisição baseado no nível de QoS óptico solicitado por ela.

Nota-se que a complexidade envolvida na inclusão da FWM no procedimento de admissão de chamadas é razoavelmente alta. Em um cenário para o qual os diversos efeitos da camada física devam ser tratados, a fiel caracterização de tais efeitos inviabilizaria a utilização prática do CAC/RWA, se uma estratégia apropriada não for aplicada. Portanto, neste trabalho de pesquisa optou-se por desenvolver não só um CAC/RWA específico, mas também metodologias simplificadas para a inclusão de tais efeitos. Para isso, no entanto, a análise será restringida apenas ao efeito mais complexo do ponto de vista de alocação de comprimento de onda, i.e. a FWM. Como este é um trabalho pioneiro, poder-se-ia ter optado pela inclusão de muitos efeitos no CAC/RWA's, entretanto é bem provável que não se conseguiria chegar a resultados importantes devido ao grau de dificuldade de se encontrar soluções que sejam ao mesmo tempo eficientes e de baixa complexidade. Mas, uma vez que a metodologia tenha sido desenvolvida para a inclusão do efeito mais complexo, a inclusão de outros efeitos pode ser feita a partir das contribuições dadas nesta Tese.

2.5. SUMÁRIO

Neste capítulo foi visto os conceitos e definições que serão utilizados ao longo desta Tese. Embora seja assumido que o plano de controle é ideal, ou seja, não é levada em conta a limitação imposta por ele (como o atraso de propagação dos protocolos de sinalização), foi discutido brevemente o relacionamento entre a rede óptica e as redes clientes em fase da interconexão via um plano de controle como o GMPLS. Além disso, foram apresentados os principais elementos da rede óptica e suas respectivas limitações. Tais pontos são importantes para a compreensão da necessidade de existência de um CAC integrado com o RWA nesse cenário multiciente e com exigência de QoS óptico. No próximo capítulo será dado início à apresentação de propostas de tais CAC/RWA's iniciando por procedimentos que serão canônicos para as demais propostas a serem vistas nos Capítulos 4 e 5.

CAPÍTULO 3

QUALIDADE DE SERVIÇO ÓPTICO: CONTROLE DE ADMISSÃO, ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Neste capítulo são apresentados CAC/RWA's conscientes de FWM que servirão de base para o entendimento e implementação dos CAC/RWA's com complexidade reduzida a serem abordados nos Capítulos 4 e 5 desta Tese. Será mostrado também um estudo de caso em que um algoritmo sem visibilidade física é empregado para se fazer a admissão de chamadas em uma rede óptica dinâmica. Será visto que o QoS óptico global da rede é comprometido nessa situação e que se faz necessário o uso de algum mecanismo para provimento de QoS. Dois mecanismos são propostos e estudados, o que permite obter informações a respeito do comportamento do FWM ao nível de rede, o qual era ainda desconhecido na época do início desta Tese, para a implementação de versões mais simplificadas dos CAC/RWA's.

3.1 PROPOSTAS DE MÉTRICAS DE DESEMPENHO

3.1.1 Probabilidade de Bloqueio e Equidade (*fairness*)

Uma das métricas que é utilizada para medir o desempenho dos algoritmos propostos é a probabilidade de bloqueio. A probabilidade de bloqueio representa o número de caminhos ópticos rejeitados perante o número total de requisições de caminhos ópticos (feitas pelas redes clientes) que chegam na rede óptica.

Além da probabilidade de bloqueio, em alguns casos será medido também a equidade (*fairness*) da rede. O *fairness* da rede no presente estudo tem relação com a capacidade da rede fornecer probabilidade de bloqueio semelhante para caminhos ópticos com (de) dimensões (tamanhos) diferentes. Devido a motivos como a restrição de continuidade de comprimento de onda e o acúmulo de ruído FWM é esperado que conexões longas sofram bloqueio bem maior do que conexões curtas se nenhuma política para beneficiar conexões longas for empregada.

3.1.2 Camada Física, Controle de Admissão e Nível de Serviço

Como visto anteriormente, este trabalho propõe a introdução de um mecanismo de CAC integrado com o RWA para gerenciar o atendimento de novas requisições bem como a manutenção de níveis de QoS óptico adequados para as conexões já aceitas. O estabelecimento de um OSLA entre a rede cliente e a rede óptica especifica tais níveis de QoS óptico e serve como referência para o CAC desempenhar a sua função. No OSLA parâmetros como probabilidade de bloqueio, BER, entre outros parâmetros, podem ser acordados entre a rede cliente e a rede óptica.

Em redes de pacotes, um CAC tenta regular o compartilhamento de recursos limitados para evitar a influência de novas sessões sobre as antigas e verificar se o nível de serviço acordado é mantido [53]. Aproveitando esse conceito vindo das redes de pacotes, é definido um CAC como um mecanismo que verifica a viabilidade de um determinado pedido de conexão na rede óptica ser atendido ou não. Os CAC's propostos nesta Tese podem trabalhar com as seguintes questões isoladamente ou as duas ao mesmo tempo: i) a nova conexão afeta o OSLA de alguma conexão ativa na rede óptica? ii) as conexões ativas

na rede óptica afetam o OSLA da nova requisição? Com isso, a decisão sobre bloqueio ou não de uma requisição vinda de uma rede cliente pode ser tomada.

Na nova geração de algoritmos RWA, que levam em consideração QoS em redes ópticas relacionado com efeitos da camada física, QoS é normalmente definido como um valor estático para a BER admitida pelos caminhos ópticos ao longo da rede [34]. Se for considerado um cenário estático, para o qual as conexões são estabelecidas e ficam de forma permanente na rede, tal procedimento pode ser adequado. Entretanto, em um cenário com tráfego dinâmico, a BER de um ou mais caminhos ópticos pode flutuar quando uma conexão é estabelecida ou encerrada na rede. Isso se deve principalmente à ocorrência de efeitos não-lineares. Do ponto de vista dos efeitos lineares, os CAC's estudados em [35] – [36] operam no roteamento para selecionar rotas que minimizam o acúmulo do efeito linear sob análise e estabelecem um nível de BER estático como restrição de QoS óptico usado na decisão sobre a aceitação (ou não) de uma requisição. Tais CAC's não levam em conta a interação entre os caminhos ópticos e, dessa forma, as variações na relação Sinal Ruído Óptica (OSNR) e conseqüente variação na BER não podem ser detectadas em cenários de redes ópticas transparentes dinâmicas.

As interações entre os caminhos ópticos acontecem devido aos efeitos não-lineares da fibra – como por exemplo, FWM e XPM, e também devido à saturação dos amplificadores gerando interferência (*crosstalk*) – e degradam a OSNR [15], [38], [39], [48], [49]. Note que o preço pago pelo cálculo *on-line* das interações entre os caminhos ópticos ao longo de toda a rede é a alta complexidade do CAC [14].

Para que as variações da BER possam ser detectadas é necessário o uso de novas métricas diferentes das tradicionais probabilidade de bloqueio e BER. Com o objetivo de avaliar tal impacto e de se ter um parâmetro mais adequado relacionado com o QoS óptico em uma rede óptica limitada por efeitos não-lineares, é definido a seguir duas métricas: a Probabilidade de Violação de Limiar (TVP – *Threshold Violation Probability*) e a Probabilidade de Violação Crítica (CVP – *Critical Violation Probability*). Após a definição destas métricas, um estudo de caso mostrando simulações de uma rede óptica dinâmica sob a influência do FWM pode ser feito.

3.1.3. Probabilidade de Violação de Limiar e Probabilidade de Violação Crítica

a) PROBABILIDADE DE VIOLAÇÃO DE LIMIAR

Como visto no capítulo anterior, flutuações de BER na rede óptica podem ser refletidas para as redes clientes prejudicando e/ou violando o contrato de serviço estabelecido previamente entre a rede cliente e a rede óptica. Portanto, para que a solicitação de QoS da rede cliente seja corretamente tratada e mapeada em um caminho óptico na rede óptica, a rede cliente pode exigir que uma BER de limiar máxima aceitável (BER_{TH} – *Threshold BER*) seja um parâmetro compondo o OSLA. A Fig. 3.1 traz uma ilustração do conceito de BER_{TH} . Suponha que se têm três conexões ativas na rede quando uma nova conexão é ativada. Percebe-se que quando a conexão em λ_4 é estabelecida, as conexões em λ_2 e λ_3 têm suas BER's degradadas acima do BER_{TH} . Apesar das conexões em λ_3 não terem sido suficientemente prejudicadas, o fato das conexões em λ_2 e λ_3 terem tido a sua BER violada acima do valor máximo aceitável é considerado no cálculo da Probabilidade de Violação de Limiar (TVP) da rede.

O TVP significa a probabilidade de pelo menos uma conexão ativa em toda a rede ter a sua BER acima do BER_{TH} após a mudança do estado de um caminho óptico na rede, i.e. após a ativação ou encerramento de uma conexão na rede [14]. Esta métrica pode ser expressa como:

Seja $p_x = Prob\{X=x\}$ a probabilidade de se ter $x=0,1,2,\dots$ conexões ativas com sua BER acima do máximo permitido depois que uma conexão é estabelecida ou encerrada na rede. O TVP representa a probabilidade de que pelos menos uma conexão ativa ser degradada, i.e. $TVP = [1 - p_x(x=0)]$. O TVP pode ser útil para dar uma representatividade global de QoS na rede, pois provê uma medida de preservação e fornecimento de QoS estatístico. QoS determinístico é atingido à medida que $TVP \rightarrow 0$, em outras palavras, o processo de estabelecimento e encerramento de conexões nunca violaria o OSNR de outras conexões ativas na rede inteira (além de satisfazer a sua própria exigência de desempenho).

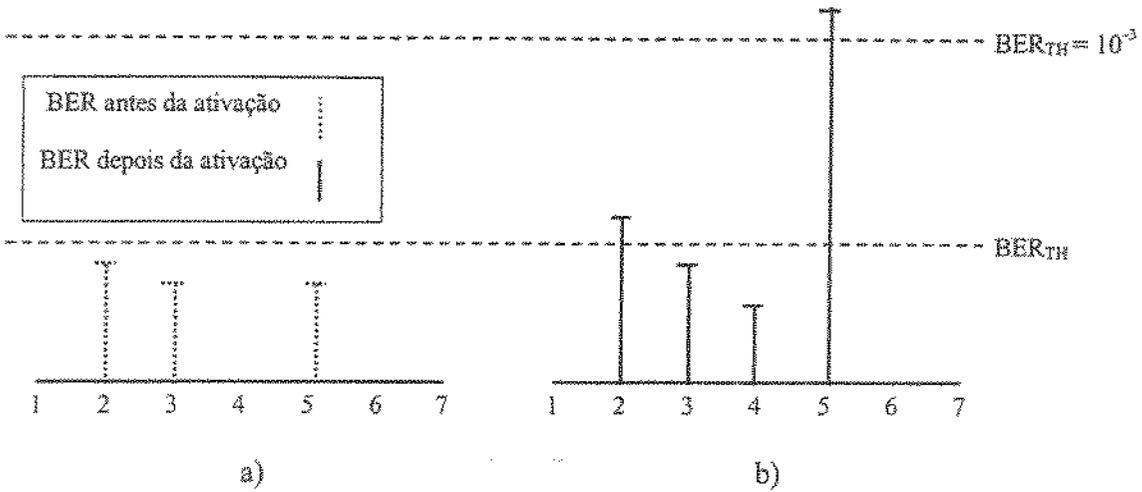


Fig. 3.1: Ilustração da violação do BER_{TH} quando uma nova conexão é ativada na rede. a) BER das conexões antes da ativação de uma nova conexão. b) BER depois da ativação.

b) PROBABILIDADE DE VIOLAÇÃO CRÍTICA

Com o objetivo de monitorar degradações excessivas da BER, é proposto a Probabilidade de Violação Crítica. CVP é uma métrica similar ao TVP, mas com BER_{TH} igual a 10^{-3} para todos os caminhos ópticos e de acordo com métricas já definidas para o SDH por meio do Defeito por Erro Excessivo (dEXC – *Excessive Error Defect*) em ITU-T G.806 [13]. Considera-se que CVP deve ser menor do que 0,01% para que os mecanismos de proteção e restauração da rede não sejam ativados com muita frequência. No exemplo da Fig. 3.1 embora somente a conexão em λ_5 tenha tido sua BER violada acima de 10^{-3} , tal situação é considerada no cômputo do CVP.

3.2 ESTUDO DE CASO: REDES LIMITADAS POR FWM

Ao contrário de efeitos lineares, os quais foram considerados em trabalhos prévios [35] – [36], em redes limitadas por um efeito não-linear de FWM um dado caminho óptico tem sua OSNR não só relacionada com a presença de outros caminhos ópticos interferentes, mas também com sua própria presença. A Fig. 3.2a mostra um exemplo ilustrativo em que há dois caminhos ópticos ativos em um dado enlace da rede nos comprimentos de onda λ_3 e

λ_5 ; os respectivos produtos FWM gerados por estes caminhos ópticos estão em λ_1 e λ_7 . Suponha que uma nova conexão passando por este enlace vai ser estabelecida na rede. Um CAC/RWA que leva em conta efeitos da camada física via análise prévia de OSNR, como por exemplo em [35], [48] irá apontar os comprimentos de onda λ_2 , λ_4 e λ_6 como os que possuem melhor OSNR, sendo portanto os candidatos mais indicados para servir a nova conexão. Mas diferentemente de [48], em que o efeito de FWM foi abordado, a influência da nova requisição que está entrando na rede deve ser considerada. Suponha que o comprimento de onda λ_4 seja escolhido pelo CAC/RWA em Fig 3.2b. Neste caso, quando a conexão for estabelecida, irá ocorrer a geração de produtos FWM em λ_3 , λ_5 e sobre o próprio λ_4 , o qual estava livre de ruído antes da ativação da nova conexão na rede.

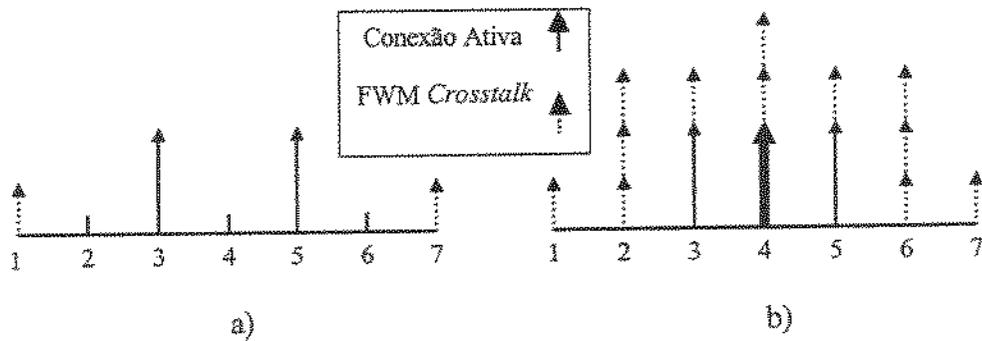


Fig. 3.2: Análise de um enlace da rede sob influência do FWM. Diferentemente de efeitos lineares, a OSNR de um caminho óptico depende agora não só da presença de outros caminhos ópticos, mas também da presença dele mesmo.

Se o montante de ruído gerado sobre as conexões em λ_3 , λ_5 e sobre o próprio λ_4 for suficientemente grande pode acontecer que a BER aumente para níveis maiores de que o permitido ou até para níveis críticos nos quais o sistema não pode mais funcionar. Essas situações não podiam ser tratadas pelos algoritmos RWA's tradicionais [122] – [125] já que eles consideravam que os elementos da rede e a propagação dos sinais pela fibra ópticas eram ideais. Em outras palavras, a camada física não era considerada na primeira geração de algoritmos RWA's. Como consequência, as métricas usadas por estes algoritmos para se avaliar o desempenho da rede, como, por exemplo a probabilidade de bloqueio, eram implementadas somente a partir de parâmetros lógicos da rede. Assim, não era possível

identificar qual o impacto sobre as conexões que a desconsideração dos efeitos da camada física poderia trazer nem tal pouco que níveis de QoS óptico devem ser mapeados para conexões servindo diferentes clientes da rede óptica.

3.2.1. Avaliação do Impacto do FWM sobre o QoS Óptico

Como visto anteriormente, na década passada ocorreu avanços em estudos teóricos e experimentais de redes com roteamento de comprimento de onda e também de enlaces ponto-a-ponto. Entretanto, como naturalmente acontece no desenvolvimento tecnológico, a maioria destes estudos foi realizada com modelos simplificados e de forma segmentada, por exemplo, separando desempenho de camada física e desempenho da rede óptica. Essa simplificação e segmentação representam uma lacuna na modelagem destes sistemas, na medida em que o ambiente das redes com roteamento de comprimento de onda impõe severas restrições aos enlaces estabelecidos, que não estavam presentes no ambiente dos sistemas ponto-a-ponto.

Para avaliar qual o impacto sobre o QoS óptico que os primeiros algoritmos RWA impunham ao desconsiderarem a camada física, foi feita algumas simulações para medir o TVP e CVP desses algoritmos. Não se mostrará a probabilidade de bloqueio já que estes algoritmos não bloqueiam devido à restrição de QoS, essas curvas são mostradas e comparadas com as dos CAC/RWA's propostos na próxima subseção.

Pelo fato dos algoritmos RWA's tradicionais desprezarem os efeitos da camada física, eles são chamados de Algoritmos Cegos. A Fig. 3.3 mostra o fluxograma de um Algoritmo FWM-Cego com um passo adicional que é a estimativa do TVP e CVP. Quando uma requisição é recebida, o algoritmo de roteamento utilizado busca a menor rota de acordo com o número de saltos (*hops*). Se existe mais de uma menor rota, todas essas opções são consideradas pelo algoritmo de Alocação de Comprimento de Onda. Nessas simulações utiliza-se o algoritmo aleatório (RD - *Random Algorithm*) [31], o qual seleciona um comprimento de onda aleatoriamente dentre os que obedecem à restrição de continuidade. Se todos os comprimentos de onda estiverem ocupados, a requisição é bloqueada; caso contrário, é aceita. Finalmente, para avaliar o impacto do ruído FWM sobre as conexões da rede, são medidos o TVP e CVP.

As simulações apresentadas a seguir foram feitas nas duas redes mostradas nas Figs. 3.4a e 3.4b usando potências transmitidas de 0 e 4 dBm por caminho óptico sob uma grade de 50 e 100 GHz de espaçamento entre os canais, respectivamente. Amplificadores ópticos, para compensar as perdas dos 100 km de fibra DSF conectando dois nós adjacentes, são aplicados. A atenuação da fibra, o coeficiente não-linear, o comprimento de onda de dispersão nula e a inclinação da curva de dispersão cromática são, respectivamente, 0.22 dB/km, $2.3 (W.km)^{-1}$, 1550 nm, and $0.067 ps/[(nm)^2 km]$. A responsividade do receptor é de 1 A/W. Adota-se que os canais são contínuos (cw – *continuous-wave*), caracterizando o pior caso para o processo de FWM [70]. Adota-se também tráfego uniforme entre os nós da rede, sendo que as requisições seguem uma distribuição poissoniana e tendo duração com distribuição exponencial (média = 1s). O desempenho para as diferentes topologias simuladas é comparado usando o tráfego total na rede e não o tráfego por nó da rede. A BER de limiar, BER_{TH} , é igual a 10^{-9} . Em todas as simulações utilizou-se 10^6 requisições. Note que a listagem de alguns parâmetros característicos da camada física é necessária, pois o objetivo é medir o TVP e CVP. Percebe-se também que o passo que envolve o cálculo do TVP e CVP na Fig. 3.3 não tem influência na decisão sobre admissão ou bloqueio de requisições na rede.

Observe que o fato do Algoritmo FWM-Cego não levar em conta o FWM implica em alta probabilidade de degradação de conexões fazendo com que o algoritmo FWM-Cego possa servir como um valor de referência superior para o TVP e CVP para comparar com o desempenho dos CAC/RWA's propostos. Por outro lado, o fato dele não efetuar bloqueio devido às restrições de QoS das redes clientes faz com que o algoritmo FWM-Cego também sirva como valor de referência inferior para a probabilidade de bloqueio. Portanto, o ideal é que os CAC/RWA's propostos apresentem bloqueio o mais próximo possível do bloqueio do FWM-Cego e TVP e CVP o mais distante possível dos apresentados pelo algoritmo FWM-Cego.

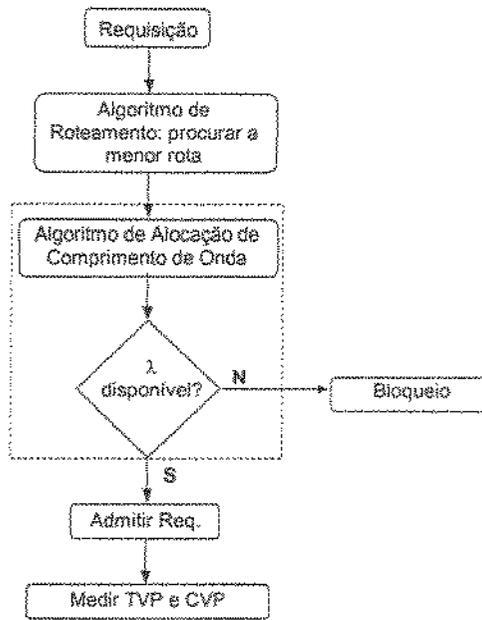


Fig. 3.3: Fluxograma do Algoritmo FWM-Cego.

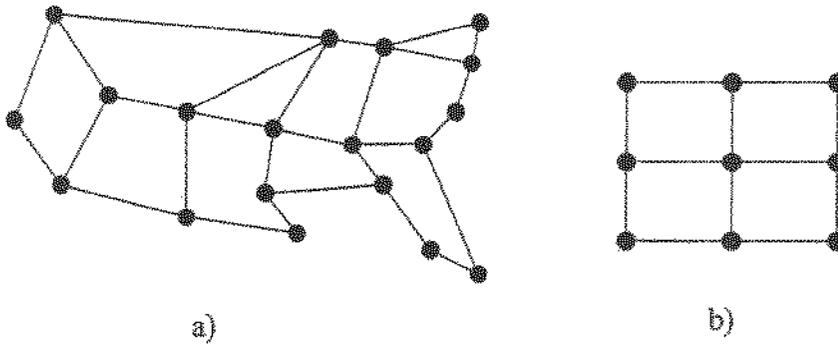


Fig. 3.4: Topologias Simuladas. a) Rede irregular com $N = 19$ nós; b) Rede quase regular com $N = 9$ nós. Cada enlace tem 100 km de distância. Note que as figuras não estão em escala.

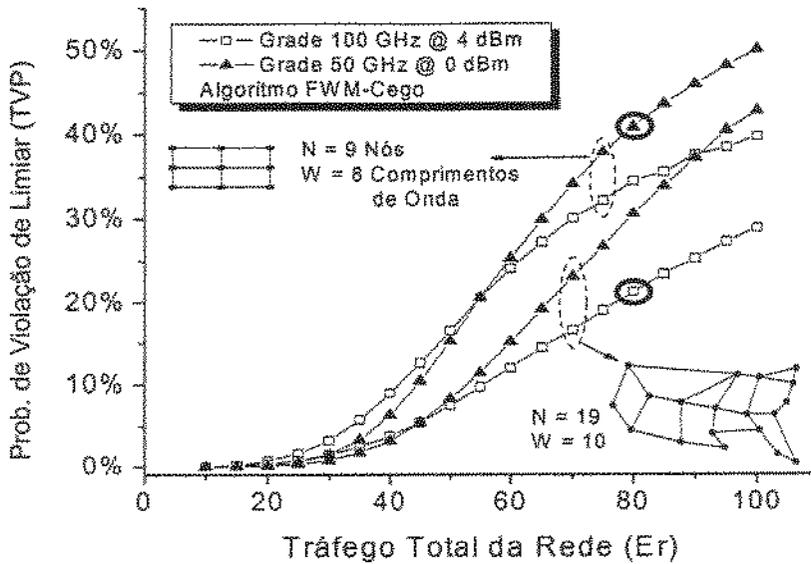


Fig. 3.5: TVP para o Algoritmo FWM-Cego.

A Fig. 3.5 mostra os valores de TVP obtidos para duas redes, uma rede pequena com $N = 9$ nós usando $W = 8$ comprimentos de onda e outra de dimensão maior com $N = 19$ e $W = 10$ e mais conectada. A rede pequena ($N = 8$ e $W = 10$) quando operando com tráfego de $80 Er$, usando a Grade de $50 GHz$ e $0 dBm$ de potência por canal apresenta em torno de 40% de chances de se ter pelo menos um caminho óptico degradado, i. e. $BER > 10^{-9}$, no momento em que uma nova conexão é cegamente ativada na rede. Embora operando com mesmo tráfego total ($80 Er$) existindo menos conexões por nó e mais comprimentos de onda por enlace, na rede grande ($N = 19$ e $W = 10$) a probabilidade de se ter conexões violando QoS (i.e, com $BER > 10^{-9}$) permanece acima de 20% , mesmo para a grade de $100 GHz$ usando uma potência de $4 dBm$. Além de altos valores de TVP, o número de conexões com QoS não satisfatório na rede também é elevado, como mostrado na Fig. 3.6, a qual apresenta em mais detalhes a probabilidade de se encontrar um dado número de conexões com BER acima de BER_{TH} . Perceba que a probabilidade de se ter K conexões degradadas cai rapidamente à medida que K cresce. Por exemplo, para $Prob(k=1) = 0,59$ para a rede pequena com $W = 8$ e $0,69$ para a rede grande com $W = 10$, enquanto que $Prob(k=8) = 7,3 \cdot 10^{-6}$ e $2 \cdot 10^{-5}$ para as redes pequena e grande, respectivamente.

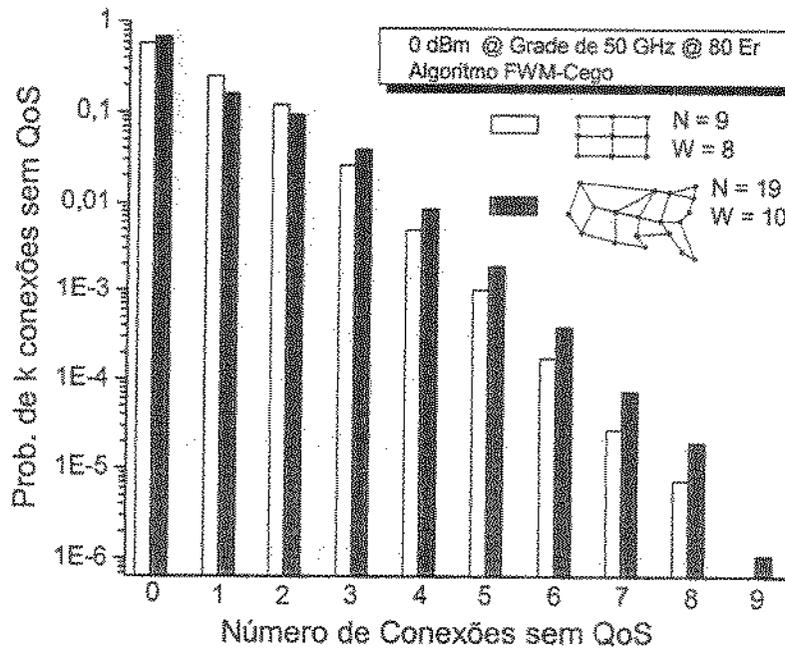


Fig. 3.6: Número de conexões sem QoS – Algoritmo FWM-Cego @ 0 dBm, Grade de 50 GHz e 80 Er.

Pode-se perceber que o fornecimento de QoS óptico para a rede operando com o algoritmo RWA FWM-Cego só será possível se o montante de tráfego permitido for limitado. Suponha que $TVP < 10\%$ é valor aceitável para a degradação global de QoS na rede. A Fig. 3.5 mostra que o tráfego total na rede deve ser menor do que 45 e 53 Er para as redes pequena e grande, respectivamente. Portanto, se o QoS óptico deve ser controlado em redes aplicando um algoritmo RWA FWM-Cego, a Fig. 3.5 mostra que os recursos da rede devem permanecer sub-utilizados para que a interação entre as conexões diminua e cause a redução no TVP. Como alternativa para solucionar esse problema são propostos algoritmos que fazem a integração do CAC com o RWA para que o acoplamento entre os caminhos ópticos diminua e com isso o desempenho da rede melhore. Neste capítulo são estudados dois desses CAC/RWA's.

A Fig. 3.7 mostra que o algoritmo FWM-Cego apresenta também uma alta probabilidade de ocorrência de erros excessivos. Percebe-se que chances de até 4% de ativação dos mecanismos de proteção e restauração podem ser obtidas para a rede com $N=9$ e operando com oito comprimentos de onda. Tanto o TVP quanto o CVP nas Figs. 3.5 e 3.7 caem à medida que a carga na rede diminui, pois uma carga menor significa um menor

número médio de caminhos ópticos ativos por enlace da rede e conseqüentemente uma menor interação entre tais caminhos ópticos; com isso o montante de ruído FWM gerado também é menor.

Como se considera que CVP deve ser menor do que 0,01% para que os mecanismos de proteção e restauração da rede não sejam ativados, o tráfego total na rede operando sob a grade de 50 GHz deve permanecer menor do que 50 Er e menor do que 40 Er para a grade de 100 GHz para se reduzir as chances que tais mecanismos sejam ativados. Isto significa sub-utilização dos recursos da rede, com conseqüências negativas para o faturamento da operadora da rede.

Note que um processo simplificado de descarte aleatório de conexões poderia ser empregado (novamente à custa de sub-utilização dos recursos da rede) para manter a carga na rede nos níveis que o FWM gerasse pouco ruído e, portanto, o TVP pudesse ser mantido em um nível aceitável. Todavia, um processo mais racional pode ser proposto como forma de controle do TVP.

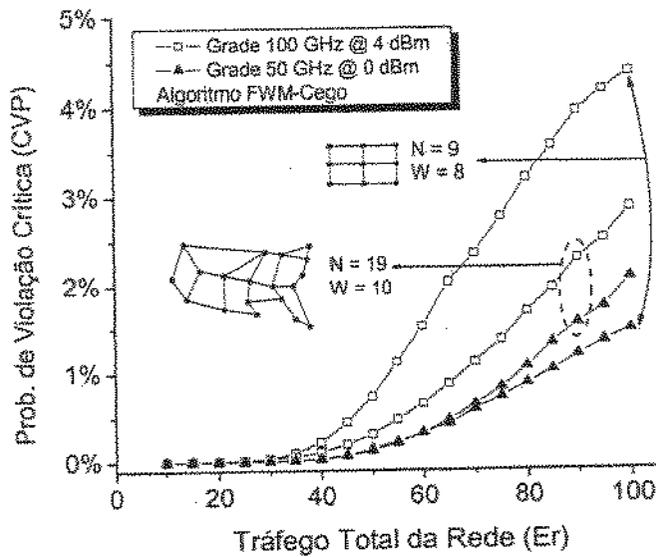


Fig. 3.7: CVP para o Algoritmo FWM-Cego.

3.3 CAC/RWA PARA APROVISIONAMENTO E MANUTENÇÃO DE QoS ÓPTICO

Segundo a proposta de investigação desta Tese, implementada pela primeira vez na literatura, metodologias para calcular o ruído FWM em redes ópticas transparentes dinâmicas. O cálculo da influência do FWM causado por uma requisição na rede é dividido em dois tipos: (i) *Busca Parcial*: neste caso calcula-se somente o ruído FWM que as conexões que já estão ativas na rede irão gerar sobre a requisição em análise mais o ruído gerado pela própria requisição sobre ela mesma; (ii) *Busca Completa*: calcula-se o ruído FWM do caso (i) mais o ruído gerado pela requisição sobre as conexões já presentes na rede. A Fig. 3.8a mostra um exemplo ilustrativo dos casos (i) e (ii). A descrição dos CAC/RWA's é iniciada pelo caso mais simples, i.e., o caso (i), deixando o caso (ii) para a Seção 3.4. Algoritmos que aplicam a estratégia de Busca Parcial só poderão fornecer QoS estatístico para o sinal óptico. Ou seja, o fato de um caminho óptico encontrar condições favoráveis à sua aceitação não implica que a sua presença não prejudicará as demais conexões já ativas na rede. Portanto, QoS determinístico só é possível se Busca Completa for utilizada pelos algoritmos, mas a custo de maior complexidade. A classe de algoritmos que realizam a busca parcial é chamada de Egoístas, enquanto os que realizam a busca completa são classificados como algoritmos Éticos.

3.3.1. Algoritmos Egoístas

Os algoritmos Egoístas aplicam a política de Busca Parcial para o cálculo do ruído FWM e seguem os passos mostrados no fluxograma da Fig. 3.8b. O roteamento é sempre feito pela menor rota, mas caso exista mais de uma menor rota, a rota que possui o menor impacto de ruído FWM sobre a rede é a escolhida. Em seguida, é calculado o ruído FWM gerado pelas conexões ativas na rede sobre cada comprimento de onda candidato, ou seja, aqueles que obedecem à restrição de continuidade de comprimento de onda. Não é calculado o ruído que um comprimento de onda candidato gera sobre as conexões ativas na rede, conseqüentemente $TVP \neq 0$ para os algoritmos Egoístas. O CAC/RWA testa a seguir a restrição de QoS exigida pela rede cliente.

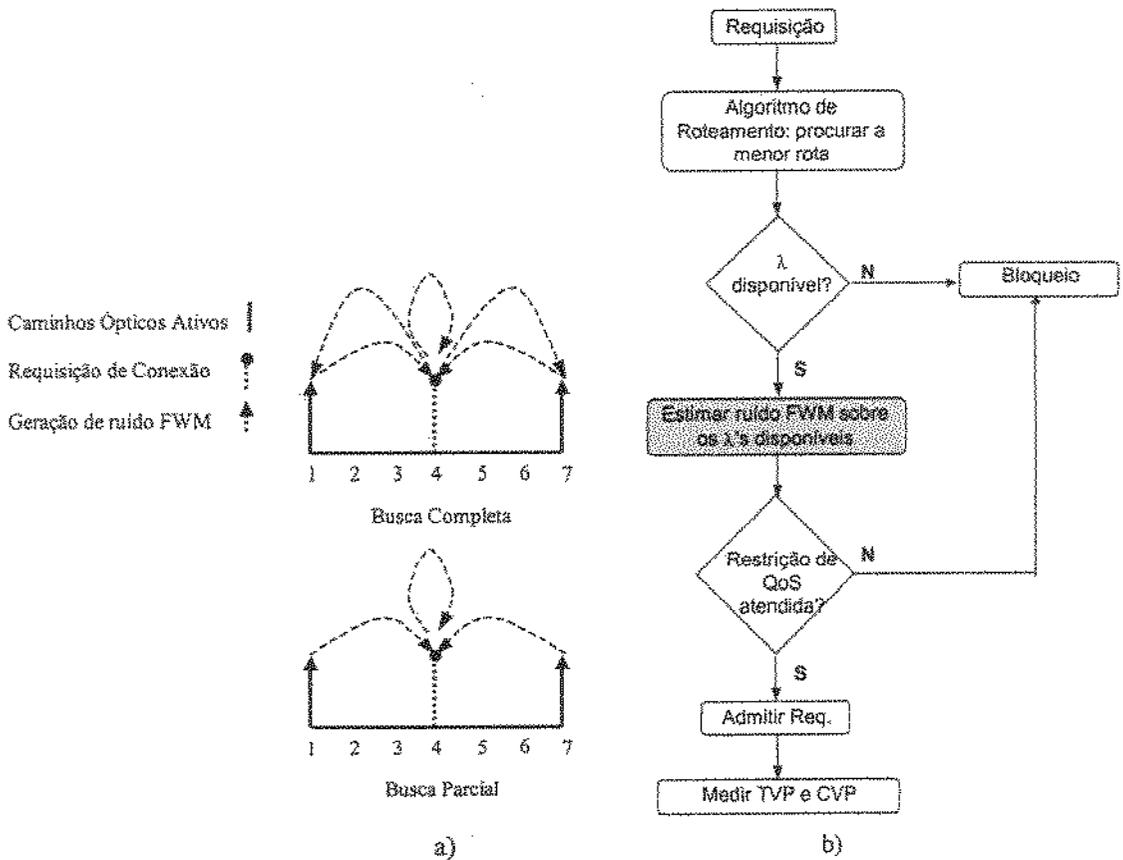


Fig. 3.8: a) Ilustração das políticas de cálculo do ruído FWM. b) Fluxograma do CAC/RWA Egoísta.

Os comprimentos de onda que obedecem às restrições de continuidade e QoS formam o *conjunto de qualificados*.

Uma ilustração dos algoritmos é dada na Fig. 3.9, em que uma situação hipotética é analisada. Assuma que em um dado instante existem quatro conexões ativas na rede com $N = 9$ e $W = 8$. Neste momento chega uma requisição do nó 0 para o nó 2. O algoritmo de roteamento escolherá a rota 0-1-2 (ver Fig. 3.9) já que esta é a única menor rota. Os passos a seguir serão executados pelos algoritmos:

1 – Como se pode ver na Fig. 3.8b, o próximo passo do algoritmo é encontrar os comprimentos de onda disponíveis na rota já selecionada; procedendo assim os comprimentos de onda $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ e λ_8 são descobertos;

2 – A estimativa do ruído FWM é feita sob cada comprimento de onda encontrado no passo 1 usando (2.27);

2.1 – O primeiro candidato é o λ_4 . No enlace 0-1 existe apenas uma conexão ativa, então não será gerado ruído sobre o comprimento de onda λ_4 . O valor do ruído na recepção (i.e. no nó 2) é obtido somando as contribuições dos enlaces 0-1 e 1-2. Percebe-se que a conexão ativa 6-7-8 não é um caminho óptico interferente e, portanto não tem influência sobre o cálculo do ruído FWM sobre λ_4 ;

2.2 – O passo 2.1 é repetido para $\lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ e λ_8 ;

3 – Verificar se a restrição de QoS é obedecida e encontrar o conjunto de comprimentos de onda *qualificados*.

4 – Se ao final do passo 3 nenhum comprimento de onda sobrar, i.e se o conjunto de *qualificados* for um conjunto vazio, a requisição será bloqueada. Caso contrário, o algoritmo WA irá escolher um dos *qualificados* de acordo com as políticas descritas a seguir.

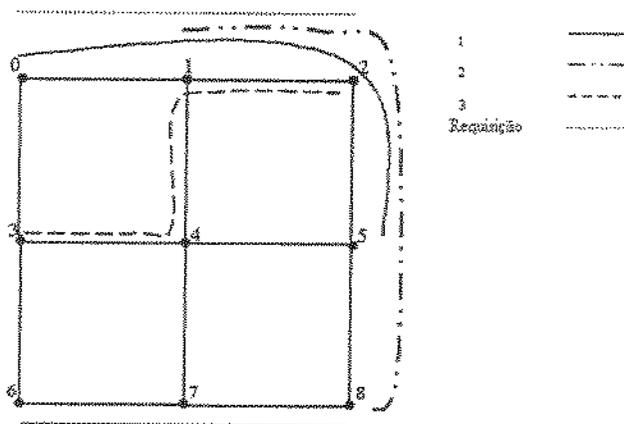


Fig. 3.9: Processo de admissão de uma requisição sob um CAC/RWA Egoísta.

Uma vez que um conjunto de comprimentos de onda *qualificados*, i.e. aqueles que obedecem às restrições de continuidade e de QoS concomitantemente é encontrado, os CAC/RWA's aplicam as estratégias a seguir para se escolher um comprimento de onda para servir a uma requisição [126].

a) **Algoritmo MinFWM**

MinFWM escolhe o comprimento de onda com menor BER no conjunto de comprimentos de onda *qualificados*.

b) **Algoritmo FWM-WA-RD**

Dentre os comprimentos de onda presentes no conjunto de *qualificados*, FWM-WA-RD escolhe um aleatoriamente.

c) **Algoritmo FWM-WA-FF**

Para o FWM-WA-FF a bem conhecida técnica *First-Fit* [31] é aplicada no conjunto de comprimentos de onda *qualificados*. Neste caso, a maior prioridade é dada de acordo com o índice do comprimento de onda, por exemplo, se conjunto de *qualificados* for composto por λ_2 e λ_3 , o algoritmo escolherá λ_2 .

3.3.2 Resultados Numéricos

As simulações apresentadas nesta Subseção usam os mesmos parâmetros usados nas simulações mostradas na Subseção 3.1.2. A rede simulada foi a mostrada na Fig. 3.4b operando com $W = 8$. Neste caso, é mostrada uma série de resultados que serão úteis para a compreensão de como atua o FWM no cenário de rede e para a implementação de um algoritmo simplificado a ser apresentado no Capítulo 4.

a) **Probabilidade de bloqueio**

Fig. 3.10 mostra a probabilidade de bloqueio para uma rede com $N=9$ e $W=8$ operando com os CAC/RWA's Egoístas e sob a grade do ITU-T de 50, 100 e 200 GHz e usando as potências de 0 e 4 dBm por canal.

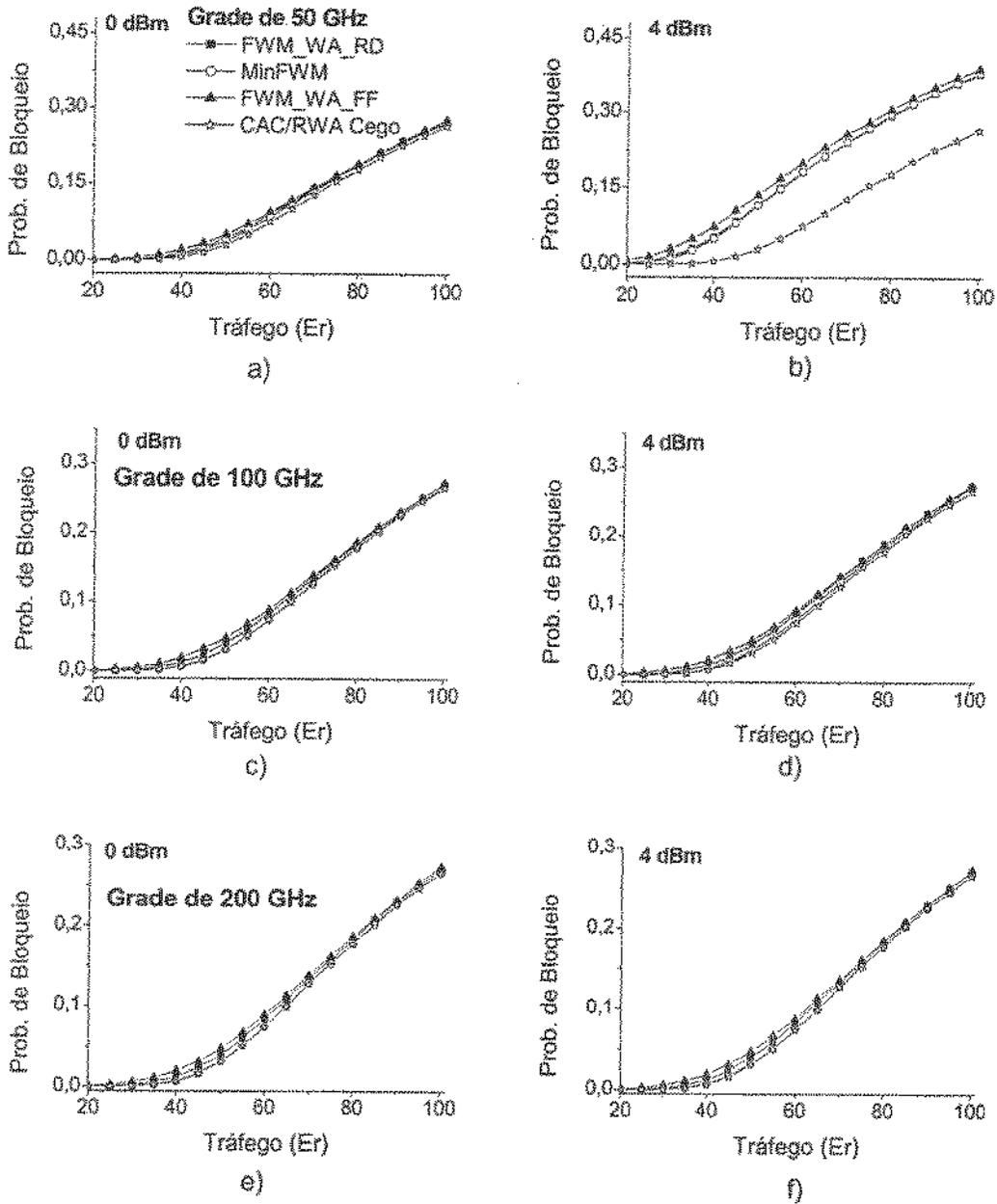


Fig. 3.10: Desempenho dos CAC/RWA's Egoístas. a-b) Grade de 50 GHz; c-d) Grade de 100 GHz; e-f) Grade de 200 GHz.

Os resultados para as grades de 50, 100 e 200 GHz mostram que os CAC/RWA's Egoístas apresentam desempenho similar ao do Algoritmo FWM-Cego para valor baixo de potência, i.e. 0 dBm. O mesmo acontece para valores altos de potência nas Grades de 100 e 200 GHz como pode ser visto em Figs. 3.10c-f. Como o algoritmo FWM-Cego serve como valor de referência com relação à probabilidade de bloqueio, observe que o desempenho dos CAC/RWA's Egoístas se aproxima do valor de referência quando a eficiência do FWM não é muito alta. Somente quando a eficiência do efeito é mais elevada, ou seja, para grade de 50 GHz com valor alto de potência (4 dBm), a probabilidade de bloqueio induzida pelo FWM leva a um comportamento diferente. Nesse caso uma diferença significativa é observada, por exemplo, para um tráfego total na rede de 80 Er, enquanto o Algoritmo FWM-Cego apresenta uma probabilidade de bloqueio aproximadamente de 0,17, os CAC/RWA's Egoístas têm em torno 0,29 de chances de bloquear uma requisição na rede.

Assim, como visto nas Figs. 3.10c-f, os algoritmos propostos podem ser apropriados para a diminuição do bloqueio na rede devido ao FWM para os casos em que os níveis de interferência (*crosstalk*) são baixos.

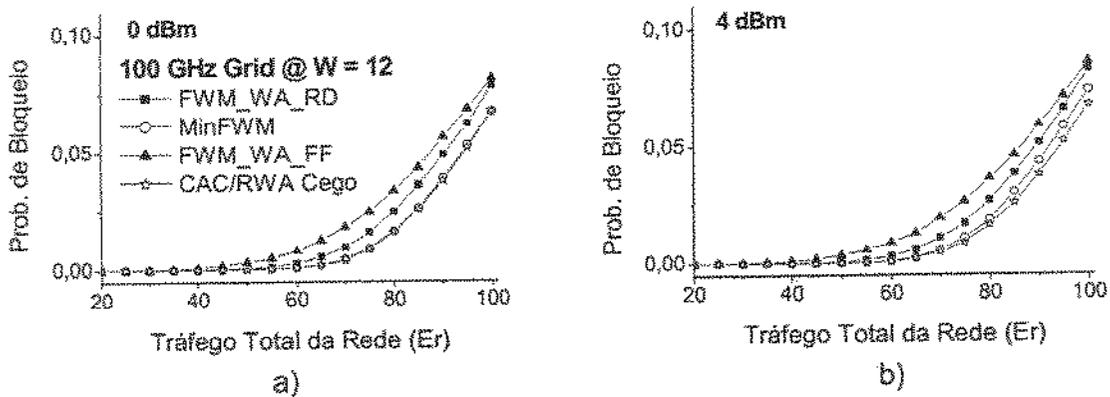


Fig. 3.11: Desempenho dos CAC/RWA's Egoístas para $W=12$.

Dentre os CAC/RWA's Egoístas (FWM_WA_RD, FWM_WA_FF e MinFWM), é intuitivo imaginar que MinFWM possa ser a melhor estratégia para se fazer a atribuição de comprimento de onda. Isso se deve ao fato de que o MinFWM sempre seleciona o comprimento de onda com menor BER no conjunto de *qualificados*. As simulações apresentadas anteriormente não mostram muita diferença de desempenho entre os algoritmos FWM_WA_RD, FWM_WA_FF e MinFWM, todavia os resultados

apresentados na Fig. 3.11 para a rede pequena operando com $W = 12$ na grade de 100 GHz e a 4 dBm de potência por canal mostram que o CAC/RWA Egoísta MinFWM é o que mais se aproxima do valor de referência estabelecido pelo FWM-Cego. Isto pode ser explicado pelo fato de que com um maior número de comprimentos de onda, MinFWM tem mais opções para escolher o comprimento de onda que minimiza o impacto do ruído FWM.

b) Limites do Uso dos CAC/RWA's Egoístas

Os resultados apresentados até agora desconsideram o impacto que o ruído gerado pelas conexões mais recentemente estabelecidas tem sobre os caminhos ópticos já estabelecidos na rede. Tal impacto pode ser analisado por meio da métrica definida na Subseção 3.1.2, a Probabilidade de Violação de Limiar. Esta análise foi restringida somente a um dos algoritmos Egoístas propostos, o CAC/RWA MinFWM, pois este mostrou o melhor desempenho dentre os algoritmos investigados.

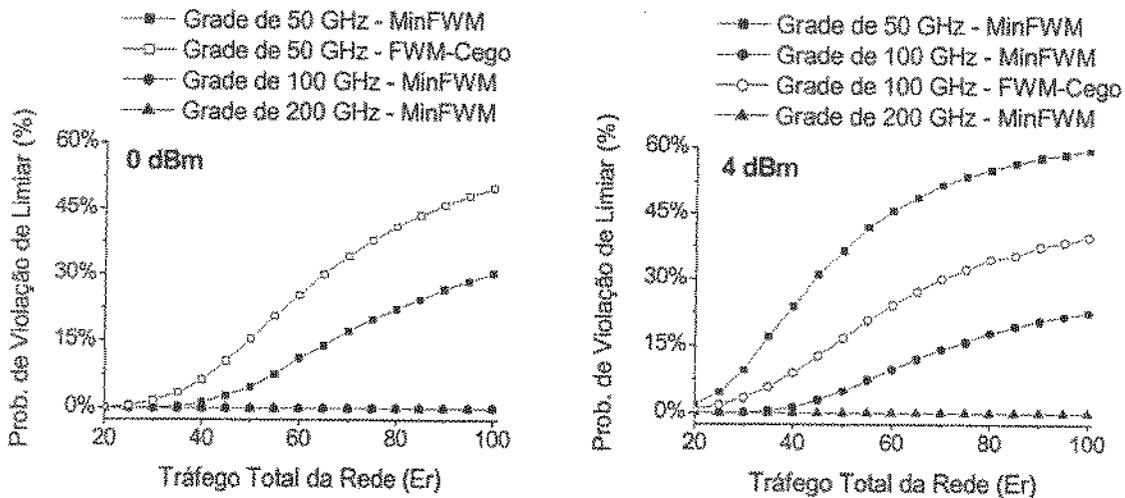


Fig. 3.12: TVP para o algoritmo MinFWM.

A Fig. 3.12 mostra os valores de TVP obtidos para o algoritmo MinFWM e para o algoritmo FWM-Cego operando na grade de 50 GHz com 0 dBm por canal e na grade de 100 GHz com 4 dBm por canal. Em concordância com os resultados apresentados na seção anterior, as simulações mostradas na Fig. 3.12 sugerem que o CAC/RWA MinFWM não deve ser utilizado em situações nas quais a eficiência do efeito de FWM é alta. Por exemplo, para a Grade de 50 GHz com 0 dBm de potência por canal e com a rede operando

com um tráfego de 80 Er, MinFWM apresenta em torno de 23% de chances de alguma conexão ativa na rede ser degradada por uma requisição que acaba de ser admitida, mas note que uma redução de 18 pontos percentuais foi alcançada pelo MinFWM quando comparado com o FWM-Cego. Já para a grade de 100 GHz com potência de 4 dBm por canal, o TVP figura em torno de 18% para o MinFWM e 35% para o algoritmo FWM-Cego, desta vez MinFWM consegue reduzir pela metade a Probabilidade de Violação de Limiar. Para a Grade de 200 GHz e para a Grade de 100 GHz a baixa potência, MinFWM apresenta baixos valores de TVP, viabilizando a sua utilização para estes casos. Embora os valores de TVP apresentados para esses últimos casos tenham sido baixos, note que isto ainda representa fornecimento de QoS Estatístico. QoS Determinístico só é possível se algoritmos do tipo Busca Completa são empregados, isto é o que investigado a seguir.

3.4 QoS DETERMINÍSTICO E OS ALGORITMOS DO TIPO BUSCA COMPLETA

Em redes que exigem QoS Óptico Determinístico, i.e. $TVP=0$, o CAC/RWA deve ser inteiramente consciente do ruído FWM e todas suas fontes [14], i.e., Busca Completa do ruído deve ser empregada. Como ilustrado na Fig. 3.8a, a escolha de um comprimento de onda para servir uma determinada requisição de um cliente da rede sob a influência de FWM deve levar em consideração o impacto que cada comprimento de onda disponível tem sobre os caminhos ópticos ativos que dividem pelo menos um enlace com a requisição. Não devem ser verificados somente os comprimentos de onda disponíveis, o excesso de ruído também deve ser evitado sobre os caminhos ópticos ativos na rede. Sendo assim, a interferência (*crosstalk*) gerada nos comprimentos de onda disponíveis é calculada objetivando alocar um comprimento de onda para servir a requisição do cliente da rede ou bloquear tal requisição devido ao desempenho de BER global insatisfatório.

3.4.1 Algoritmo Ético (*Strict*)

O CAC/RWA Ético implementa tal busca de acordo com a Fig. 3.13.

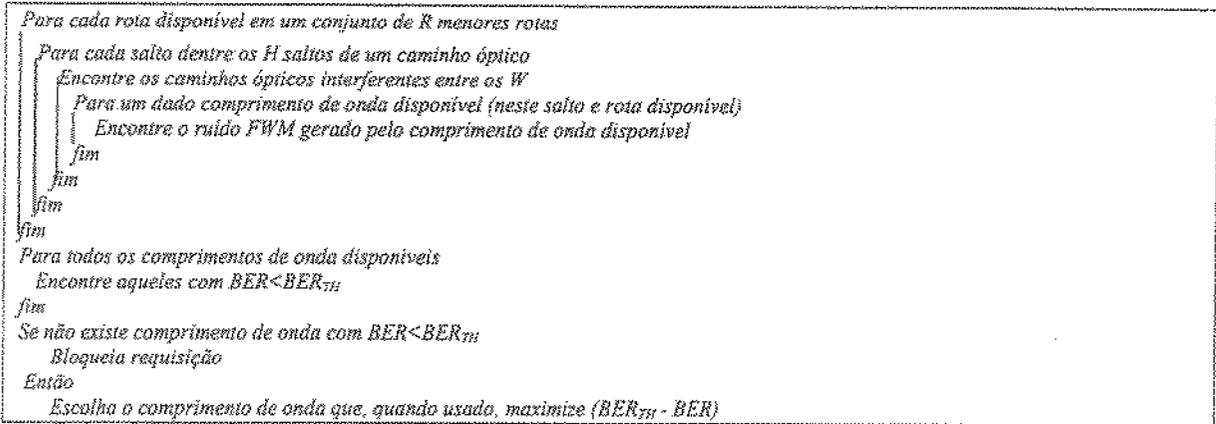


Fig. 3.13: CAC/RWA Ético.

A rota junto com o comprimento de onda que causa o menor impacto sobre o conjunto de caminhos ópticos ativos, e sobre ela mesma, é escolhida em um conjunto de menores rotas previamente selecionadas pelo algoritmo de roteamento. Como resultado, e pode ser verificado na Fig. 3.13, a complexidade de CAC/RWA Ético é $\sim O(RHW^4)$, uma vez que uma busca exaustiva de produtos FWM conforme (2.27) é realizada em cada salto do caminho óptico roteado pelo conjunto com R menores rotas escolhidas pelo algoritmo de roteamento. O fluxograma da Fig. 3.13 é um detalhamento do fluxograma mostrado na Fig. 3.8b, mas adequando à etapa da estimativa do ruído FWM para o caso de algoritmos do tipo busca completa, como o algoritmo Ético.

O algoritmo Ético utiliza o conceito de margem, que é denotado por Max-Min, para a escolha de um comprimento de onda no conjunto de *qualificados*. Para entender esse conceito considere a situação descrita na Fig. 3.14. Suponha que o conjunto de comprimentos de onda *qualificados* é composto pelos comprimentos de onda λ_1 e λ_7 . Os comprimentos de onda λ_4 e λ_6 foram descartados no passo da restrição de continuidade. As situações quando λ_1 ou λ_7 são ativados estão mostradas nas Figs. 3.14b e 3.14c respectivamente. Note que no caso da ativação de λ_1 a conexão em λ_2 ficou com a menor distância entre a sua BER e a BER_{TH} , ou seja, ficou com a menor margem, a qual é denotada por ξ_1 . Já no caso de λ_7 , a conexão em λ_5 apresentou a menor margem, denotada por ξ_7 . Suponha que a margem em λ_7 seja maior do que a margem em λ_1 , i.e., $\xi_7 > \xi_1$. Com

essa informação o CAC/RWA Ético escolhe o comprimento de onda λ_7 para servir à conexão, pois ele é o comprimento de onda que deixará a maior margem de BER quando ativado. Diz-se então que o algoritmo Ético tenta *maximizar a mínima margem de BER*.

Observe que o algoritmo Ético Max-Min é o dual do algoritmo Egoísta MinFWM, já o MinFWM escolhe o comprimento de onda candidato com melhor OSNR. Entretanto o Max-Min além de evitar a degradação do comprimento de onda candidato e de todas as conexões ativas na rede, procurar também minimizar degradações futuras ao escolher o comprimento de onda candidato que deixa a maior margem [127].

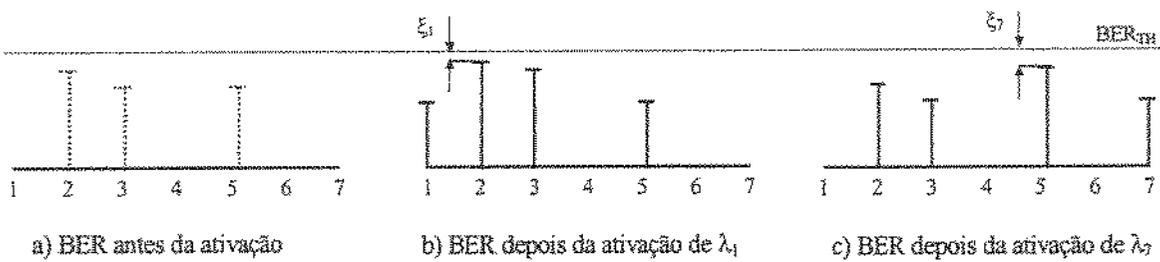


Fig. 3.14: Ilustração do conceito de margem usada pelo CAC/RWA Ético.

3.4.2 Resultados Numéricos

As simulações apresentadas nesta seção usam os mesmos parâmetros usados nas simulações mostradas na Subseção 3.1.2. Simulou-se a rede mostrada na Fig. 3.4b. Nesse caso, é mostrada uma série de resultados comparando os algoritmos Ético, Egoísta MinFWM e FWM-Cego avaliando tanto a probabilidade média de bloqueio quanto a probabilidade de bloqueio por tamanho da rota. As conclusões retiradas dessas simulações também serão úteis para a implementação de um CAC/RWA simplificado a ser apresentado no Capítulo 4.

⁴ O algoritmo Egoísta utilizado foi o Algoritmo MinFWM. Mas ao longo do texto sempre usa-se o termo Egoísta em vez de Egoísta MinFWM.

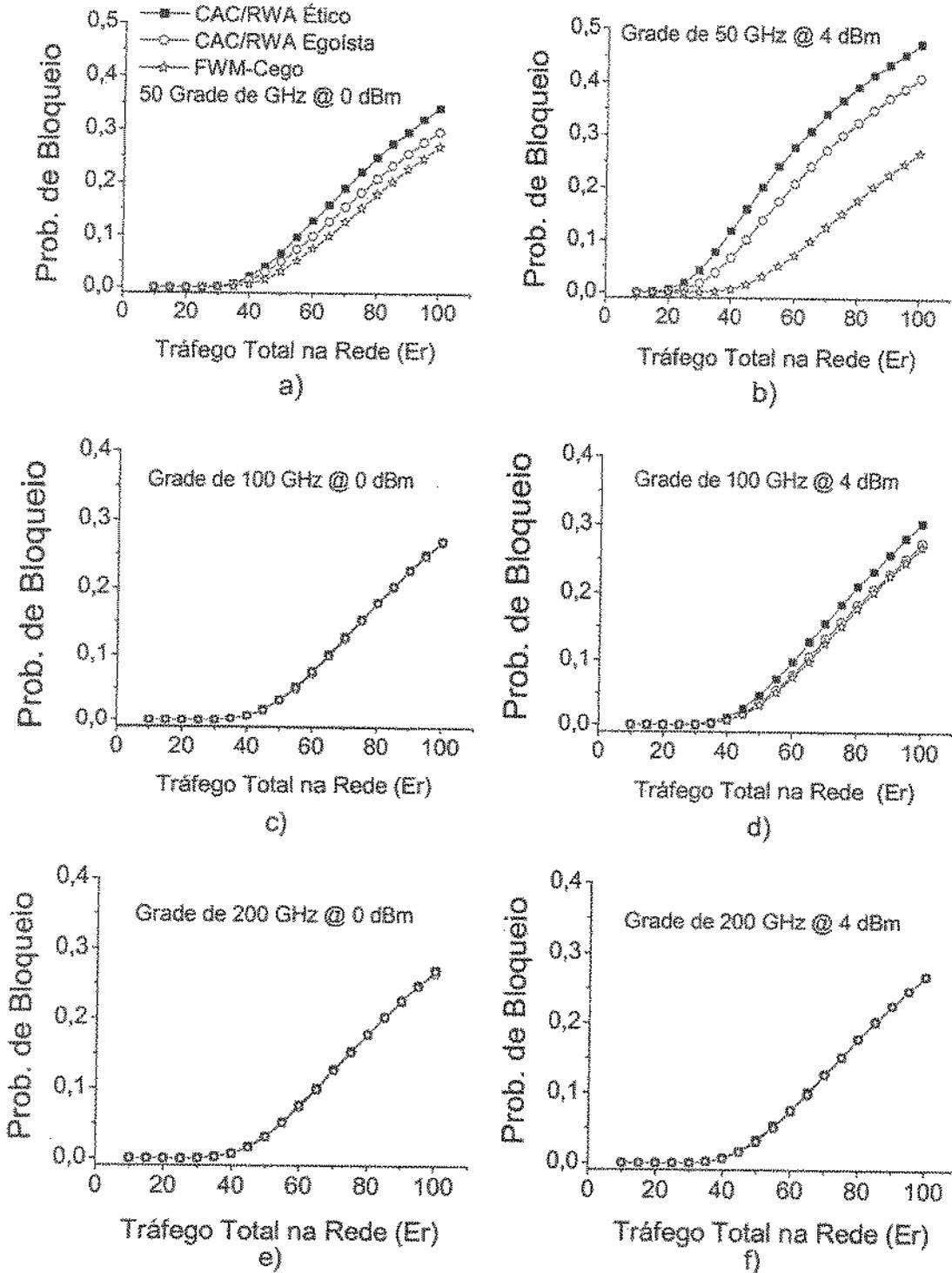


Fig. 3.15: Desempenho dos CAC/RWA Ético, Egoísta e FWM-Cego.

a) Probabilidade de Bloqueio

A Fig. 3.15 mostra a probabilidade de bloqueio da rede para as grades de 50, 100 e 200 GHz [127]. Perceba que para a grade de 50 GHz, devido à maior eficiência do efeito de FWM, o CAC/RWA Ético bloqueia mais requisições que o Egoísta, mesmo quando baixos valores de potência são utilizados. Como mostrado na Fig. 3.15a, para 0 dBm de potência e com a rede operando sob um tráfego de 80 Er, o CAC/RWA Ético apresenta probabilidade de bloqueio de aproximadamente 0,25, enquanto que o Egoísta MinFWM bloqueia cerca de 0,21 e o algoritmo FWM-Cego 0,18. Entretanto, esta situação muda à medida que grades com maior espaçamento entre os canais vão sendo utilizadas. Veja que já não existe diferença entre o desempenho dos algoritmos para grade de 100 GHz com caminhos ópticos usando 0 dBm de potência. Neste caso, somente quando o valor de potência é incrementado é que diferença de desempenho é observada.

As Figs. 3.15e e 3.15f mostram o bloqueio para a grade de 200 GHz, note que nenhuma diferença entre os algoritmos é vista, mesmo para valores altos de potência. Este fato pode ser explicado pela característica dos algoritmos de sempre buscar pela rota e comprimento de onda com menor impacto sobre a qualidade do sinal. Como consequência o bloqueio é minimizado. O mesmo acontece para 100 GHz com 0 dBm de potência em Fig. 3.15c. Estes resultados sugerem que quando a eficiência do efeito de FWM não é muito grande, o algoritmo Egoísta se mostra uma boa alternativa para se combater o ruído FWM na rede, já que conseguiu desempenho similar ao do Ético e do FWM-Cego.

b) Eqüidade (*fairness*)

A maior contribuição dada pelo estudo dos algoritmos Egoísta e Ético surge quando a Eqüidade (*fairness*) da rede é analisada. Nesse caso é analisada a probabilidade de bloqueio para requisições de tamanho 1, 2, 3 e 4 hops na rede quase regular de 9 nós mostrada na Fig. 3.4b. Para decidir-se se a rota é longa ou curta, utiliza-se o comprimento de interferência para uma rede de N nós com topologia em anel [128], o qual é dado por:

$L_{int} = \lfloor N/4 \rfloor$. Se o tamanho da rota for maior do que L_{int} a rota é dita longa, caso contrário a rota é dita curta.

Como pode ser visto na Fig. 3.16 e 3.17 para as grades de 50 e 100 GHz respectivamente, à medida que o tamanho da rota cresce os desempenhos dos algoritmos Ético e Egoísta se aproximam. Para conexões curtas (conexões com 1 e 2 hops, ver Figs. 3.16a, 3.16b, 3.17a e 3.17b) existe uma diferença considerável entre o desempenho dos algoritmos. Todavia, desempenhos semelhantes foram obtidos para conexões longas (conexões com 3 e 4 hops, ver Figs. 3.16c, 3.16d, 3.17c e 3.17d).

Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que o efeito cumulativo do FWM sobre uma requisição ser proporcional ao seu comprimento. Entretanto, o seu efeito sobre caminhos ópticos interferentes é proporcional ao comprimento de interferência [14], portanto requisições por rotas longas são mais prováveis de serem rejeitadas pelo CAC/RWA devido ao ruído FWM gerado por elas mesmas e não devido ao ruído gerado por outras conexões.

Esse resultado sugere que para requisições por rotas curtas deve-se considerar a influência sobre os caminhos ópticos interferentes e também a geração de ruído sobre a própria requisição, i.e., pode-se utilizar o CAC/RWA Ético. Entretanto, para requisições por rotas longas faz-se necessária somente a análise do ruído gerado sobre a requisição, i.e., o CAC/RWA Egoísta pode ser utilizado. Isto aponta para a implementação de um novo CAC/RWA mais simples do que o algoritmo Ético, o qual será apresentado no próximo capítulo e cuja complexidade se encontra entre a complexidade do Egoísta e do Ético.

Uma desvantagem dos CAC/RWA's Ético, Egoísta e FWM-Cego é que não existe equidade entre as probabilidades de bloqueio para conexões de tamanhos diferentes, i.e., a rede não possui bom *fairness*. Como visto nas Figs. 3.16 e 3.17, conexões mais curtas são privilegiadas por estes algoritmos em detrimento de conexões mais longas. Por exemplo, para a rede operando sob a grade de 50 GHz usando uma potência de 0 dBm por canal e carregada com um tráfego de 80 Er, o algoritmo Ético apresenta uma probabilidade de bloqueio em torno de 0,4 para conexões de tamanho 4 hops, enquanto que este número é aproximadamente 0,11 para conexões de tamanho 1 hop (ver Figs. 3.16g e 3.16a, respectivamente). Ou seja, conexões de tamanho 1 hop têm cerca de 4 vezes mais chances de serem atendidas pela rede do que conexões de tamanho 4 hops. O FWM-Cego apresenta

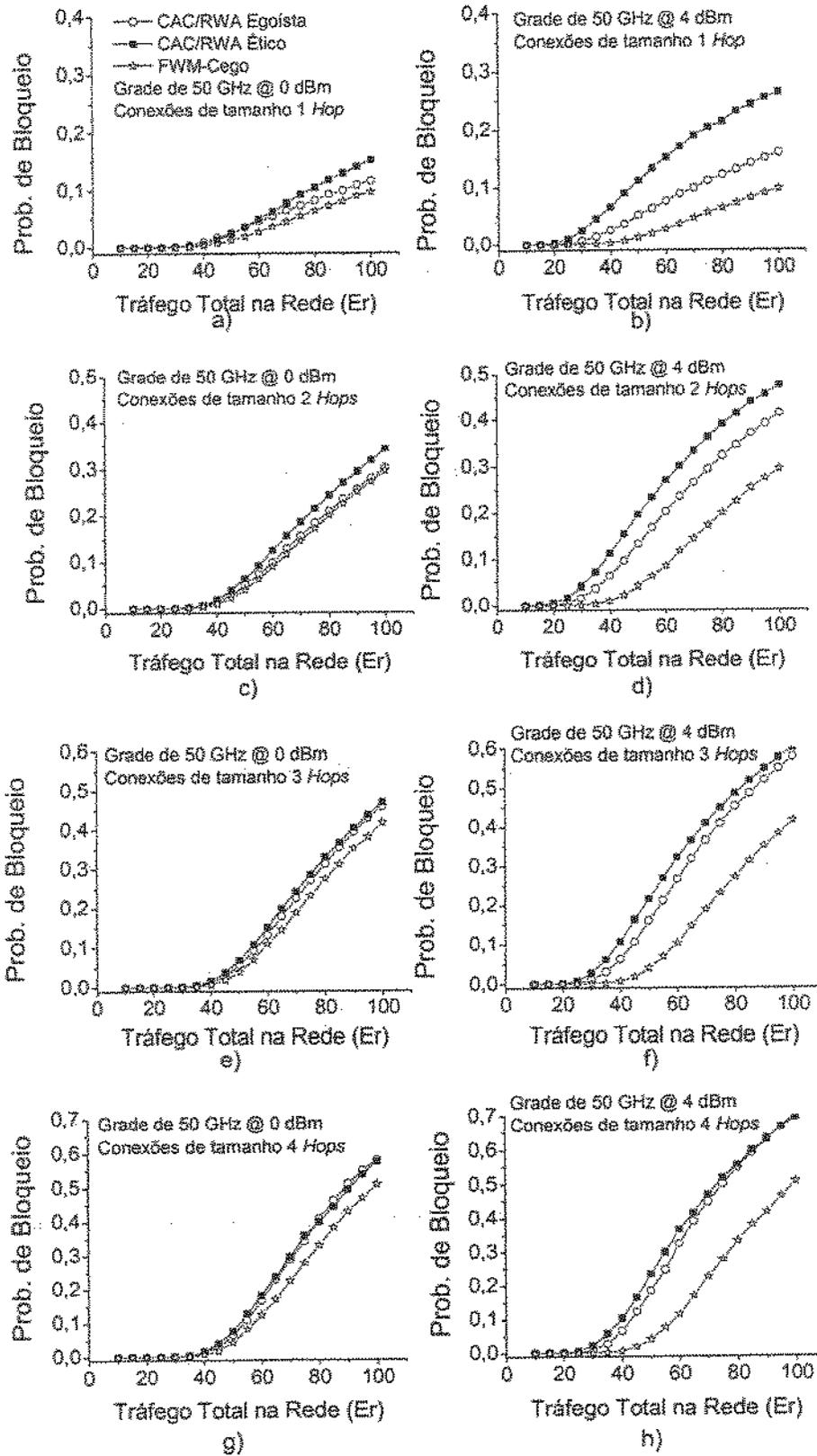


Fig. 3.16: Análise do *fairness* dos CAC/RWA's – Grade de 50 GHz.

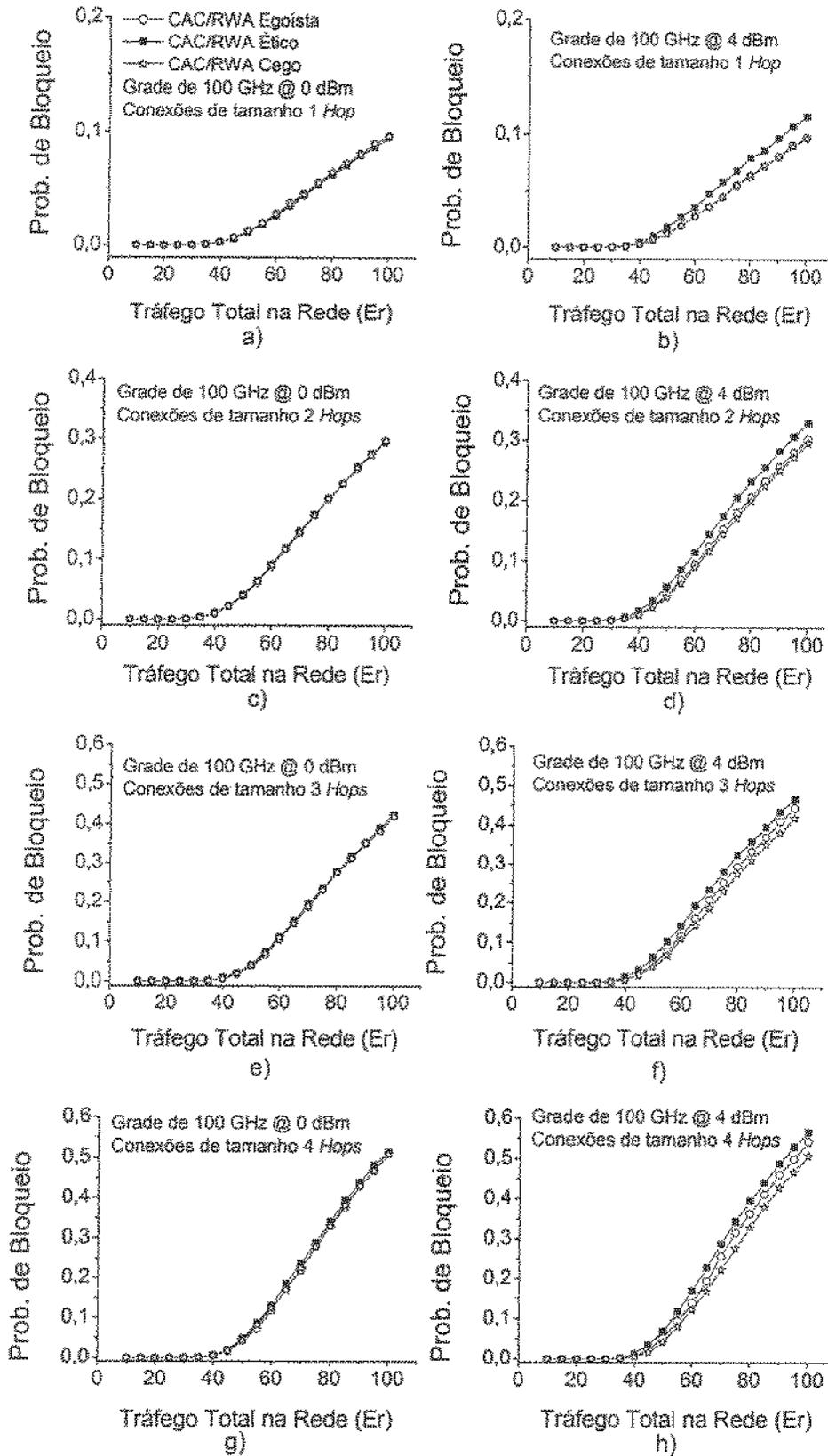


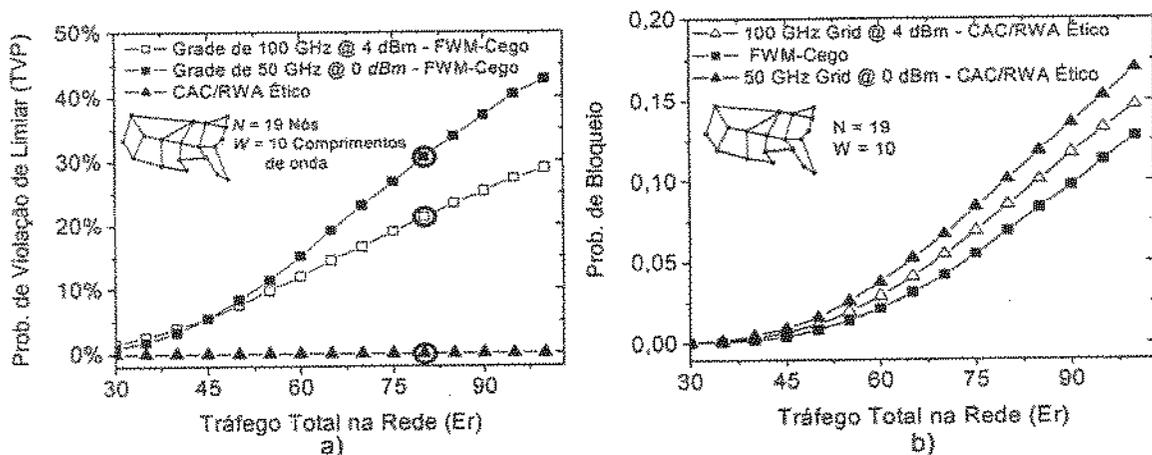
Fig. 3.17: Análise do *Fairness* dos CAC/RWA's – Grade de 100 GHz.

o mesmo comportamento já que valores de 0,07 de bloqueio para conexões de tamanho 1 hop e 0,32 para conexões de 4 hops são vistos nesta situação. No Capítulo 4 será visto um CAC/RWA que além de diminuir a complexidade do Ético melhora o *fairness* da rede.

c) Impacto do FWM sobre o Desempenho da Rede

Com o objetivo de determinar o impacto do FWM sobre o desempenho de uma rede óptica dinâmica, é feita agora uma comparação entre o CAC/RWA Ético e o algoritmo FWM-Cego. Como visto anteriormente, esses algoritmos estão em extremos opostos na escala de visibilidade física. Enquanto que o CAC/RWA Ético é inteiramente consciente do ruído FWM, apresentando TVP=0 e CVP=0, o FWM-Cego não tem qualquer visibilidade sobre o que acontece na camada física.

As Figs. 3.18 e 3.19 mostram a probabilidade de bloqueio e o TVP para os dois algoritmos. Como pode ser visto nas Figs. 3.18a e 3.19a e reiterando o que foi visto na Seção 3.2, o fato do algoritmo FWM-Cego não levar em conta o efeito de FWM pode levar à séria degradação do desempenho de QoS óptico global da rede. Quando carregada com 80 Er, a rede com 19 nós, operando na grade de 50 GHz e com 0 dBm de potência por canal, apresenta TVP acima de 30%. Para rede menor, este número figura em torno de 40%. Quando uma potência de 4 dBm é transmitida por canal em uma grade duas vezes maior do que a anterior, TVP fica por volta de 20% para a rede com 19 nós e 10 comprimentos de onda e excede 35% para a rede pequena com 8 comprimentos de onda.



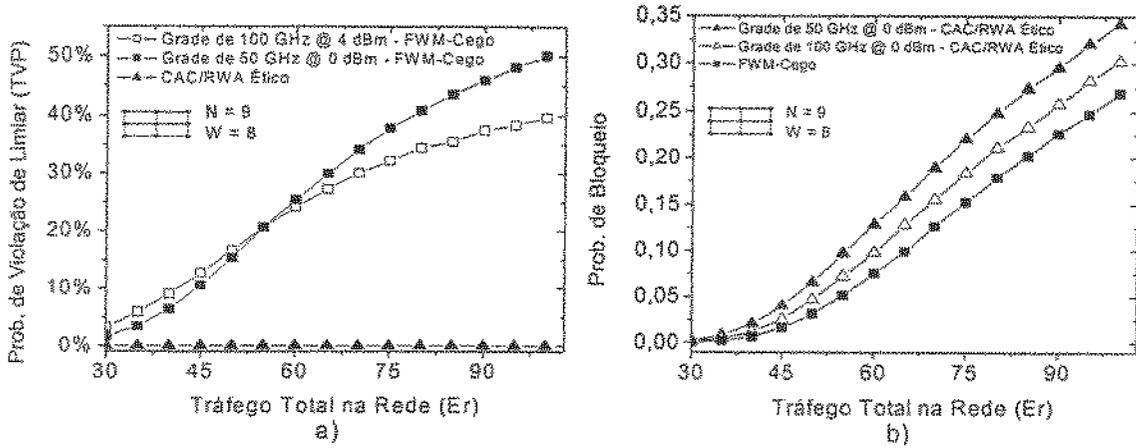


Fig. 3.19: a) TVP e b) Prob. de Bloqueio: FWM-Cego e Ético. Rede com 9 nós.

Uma consequência do provimento de QoS determinístico, i.e. $TVP=0$ (visto nas Figs. 3.18a e 3.19a), alcançado pelo CAC/RWA Ético é que algumas requisições sejam bloqueadas devido à contaminação por ruído FWM causada pelas conexões ativas na rede. Por outro lado, CAC/RWA FWM-Cego bloqueia requisições devido somente à restrição de continuidade de comprimento de onda. Como mostrado nas Figs. 3.18b e 3.19b, a degradação global devido ao ruído FWM é responsável pelo incremento na probabilidade de bloqueio em torno de 20% para ambas as redes quando carregadas com um tráfego maior do que 80 Er. Percebe-se que quando as redes operam com tráfego abaixo de 30 Er ambos algoritmos apresentam desempenhos semelhantes já que existem poucos caminhos ópticos ativos e, portanto, pouco ruído FWM está sendo gerado. Apesar disto, redes operando sob uma grade de comprimento de onda mais densa são mais sensíveis as degradações impostas pelo FWM à medida que o tráfego aumenta. Isto pode ser visto nas Figs. 3.18b e 3.19b através da curva de bloqueio para o CAC/RWA Ético.

3.4 SUMÁRIO

Neste capítulo apresentou-se um amplo estudo sobre alguns CAC/RWA's que possuem e um que não possui visibilidade física. Pode-se enumerar algumas conclusões importantes:

- Degradações globais do QoS óptico podem acontecer se um algoritmo FWM-Cego é utilizado no processo de admissão de conexões na rede. Como

conseqüência a utilização de CAC/RWA's que leve em conta efeitos da camada física é necessária;

- O CAC/RWA Egoísta se mostrou competente em situações em que a eficiência do efeito de FWM não é alta, mas ele é capaz de fornecer apenas QoS óptico estatístico;
- O CAC/RWA Ético fornece QoS óptico determinístico, mas sob o custo de alta complexidade, centralização do gerenciamento da rede e impacto negativo sobre a probabilidade de bloqueio, o que compromete o desempenho da rede. Portanto a busca de CAC/RWA's mais simples é uma necessidade;
- A análise comparativa entre os desempenhos dos CAC/RWA's Ético e Egoísta mostrou ser possível a implementação de um algoritmo intermediário que utilize Busca Completa e Busca Parcial dependendo de parâmetros das requisições, como tamanho e potência, e parâmetros sistêmicos, como grade de comprimentos de onda.

CAPÍTULO 4

PROPOSTAS PARA REDUÇÃO DE COMPLEXIDADE

Neste capítulo são apresentadas algumas metodologias simplificadas para o provimento de QoS óptico em redes ópticas transparentes dinâmicas. As estratégias estudadas buscam conciliar desempenho com redução da complexidade do processo de admissão de chamadas. Inicia-se mostrando um CAC/RWA que foi elaborado baseado nas conclusões retiradas do Capítulo 3 desta Tese e que consegue aliviar a complexidade do algoritmo Ético. Em seguida será apresentada a estratégia que parece mais promissora dentre as estudadas. Trata-se do uso de listas otimizadas de comprimento de onda no bem conhecido algoritmo *First-Fit*. Como será visto adiante, tal procedimento elimina a fase de busca *on-line* por interferência FWM do CAC/RWA e resolve os problemas de extensibilidade (*scalability*) e do gargalo de centralização do gerenciamento da rede, sem perdas para o provimento de QoS óptico para a rede, já que apresenta baixos valores de TVP e CVP.

4.1 CAC/RWA COM BUSCA RELAXADA

Na análise do *fairness* feita no capítulo anterior foi visto que o efeito cumulativo do FWM sobre um caminho óptico individual é diretamente proporcional ao seu comprimento. Entretanto, seu efeito sobre os caminhos ópticos interferentes é diretamente proporcional aos correspondentes comprimentos de interferência [14]. Portanto, requisições por caminhos longos são mais prováveis de serem rejeitadas (sob o CAC/RWA Ético) devido às contaminações geradas por eles mesmos do que por degradações que eles causam nas conexões já ativas na rede.

Esse fato motivou a idéia de relaxar o algoritmo Ético com o objetivo de aliviar o custo computacional do CAC/RWA. Todavia tal relaxamento precisa ter o compromisso de que o impacto sobre o TVP seja controlado de forma que não prejudique a capacidade de fornecimento de QoS óptico global da rede.

Como visto no capítulo anterior, sem grandes perdas para o desempenho da rede, o algoritmo Ético pode ser utilizado apenas se as seguintes situações acontecem simultaneamente:

- i) A requisição é considerada curta;
- ii) A grade utilizada é de 50 ou 100 GHz;
- iii) No caso da grade de 50 GHz é necessário também verificar se o valor de potência a ser transmitida pela requisição é baixo ou alto.

Baseado nessas constatações implementa-se um novo CAC/RWA denominado de CAC/RWA Relaxado que tenta utilizar Busca Parcial em vez de Busca Completa quando possível. Como está mostrado na Fig. 4.1c, a busca pelo ruído FWM que uma requisição pode causar sobre conexões ativas na rede é realizada baseada na grade de comprimento de onda em uso, no comprimento da requisição e na potência transmitida. Usa-se uma métrica conservadora para um caminho óptico ser considerado longo: quando o comprimento do caminho óptico excede o comprimento médio de interferência (L_{int}) para um anel de N nós, i.e., $L_{int} = \lfloor N/4 \rfloor$ [128], dizemos que é uma conexão longa. Perceba que esta métrica é injusta para uma rede que possui conectividade maior do que uma rede em anel, como é o caso das redes simuladas. O que abre espaço para a busca de um valor mais apropriado via simulação numérica.

Para se prover a rede de QoS óptico estatístico, no qual considera-se que TVP deve ser menor do que 10% para os cenários de rede investigados, de acordo com os resultados apresentados no Capítulo 3 (ver Figs. 3.15, 3.16 e 3.17) uma potência de 0 dBm ou menor é considerada baixa potência na Fig. 4.1c.

Como a potência do ruído FWM depende do espaçamento e da potência dos canais (ver Equação (2.20)), é esperado que uma grade de comprimento de onda com espaçamento entre canais maior e moderados níveis de potência produzam pouco ruído FWM. Isto sugere que o CAC Ético possa ser relaxado. Menos intuitivo é, entretanto, o fato que quanto maior a requisição, menos ruído FWM é gerado sobre os caminhos ópticos ativos na rede. Assim, a escolha de um comprimento de onda que minimize o ruído FWM sobre os caminhos ópticos ativos na rede pode ser feita baseada na estratégia de Busca Parcial. Portanto, a redução da complexidade do algoritmo Ético pode ser encontrada a partir do Relaxado.

O CAC/RWA Relaxado é implementado de acordo com a Fig. 4.1a. Da mesma forma que os algoritmos Ético e Egoísta, o Relaxado utiliza o algoritmo de menor caminho para escolher a rota. Os algoritmos distinguem no passo de Atribuição do Comprimento de onda, enquanto o Ético implementa Busca Completa e o Egoísta Busca Parcial, o CAC/RWA Relaxado representa um meio termo em que a decisão é tomada baseado no fluxograma da Fig. 4.1c. Suponha a rede com $N = 9$ nós da Fig. 3.9 opera na grade de 50 GHz com 0 dBm de potência por canal. O algoritmo de roteamento encontrará para uma requisição entre os nós 0 e 8 o seguinte conjunto de menores rotas: 0-1-2-5-8, 0-1-4-5-8, 0-1-4-7-8, 0-3-6-7-8, 0-3-4-7-8 e 0-3-4-5-8. Da mesma forma que os CAC/RWA's Egoísta e Ético, o Relaxado também irá selecionar desse conjunto de menores rotas aquela que apresentar o menor nível de ruído FWM. A diferença está no processo de atribuição do comprimento de onda. Como para essa rede $L_{int} = \lfloor N/4 \rfloor = 2$ e a requisição possui tamanho 4 hops, o CAC/RWA Relaxado entenderá que esta é uma rota longa. Se a rede estivesse operando sob a grade de 100 GHz, o algoritmo Relaxado já poderia tomar a sua decisão e utilizar Busca Parcial de ruído FWM no processo de admissão desta requisição, como visto na Fig. 4.1c. Entretanto, como a grade é de 50 GHz, o CAC/RWA Relaxado precisa verificar a potência utilizada por canal. Neste caso, como a potência é de 0 dBm, o algoritmo irá utilizar Busca Parcial para o cálculo do ruído FWM.

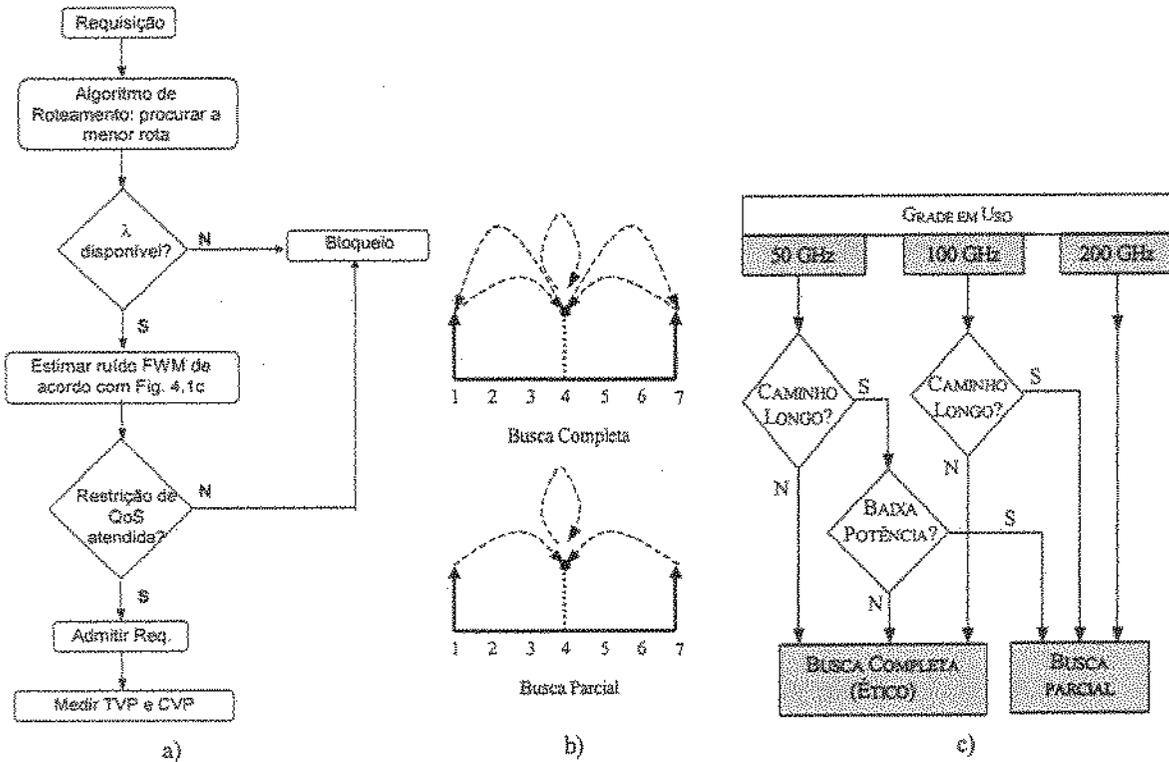


Fig. 4.1: CAC/RWA Relaxado.

4.1.1. Resultados Numéricos

As simulações apresentadas nesta subseção usam os mesmos parâmetros usados nas simulações mostradas na Subseção 3.1.2. A comparação entre os CAC/RWA's FWM-Cego usando o algoritmo Aleatório (*Random*) para a alocação de comprimento de onda, Ético e Relaxado de acordo com a probabilidade de bloqueio é mostrada na Fig. 4.2. Como pode ser visto na Fig. 4.2a, a degradação global devido ao FWM é responsável pelo incremento da ordem de 20% na probabilidade de bloqueio quando a rede opera com tráfego alto (> 80 Er).

A melhora no TVP introduzida pelo Relaxado pode ser vista comparando a Fig. 4.2b com a Fig. 3.5. A Fig. 4.2b mostra que quando o CAC/RWA Relaxado é utilizado uma nova conexão irá degradar, em média, menos que 8 dentre 100 conexões ativas na rede com $N=9$, mesmo se esta rede está carregada com um tráfego de 100 Er. Pode-se verificar nos resultados do capítulo anterior na Fig. 3.4 que, operando nas mesmas condições, cerca de 50 conexões dentre 100 ativas podem ser degradadas pelo algoritmo FWM-Cego.

Percebe-se que para a rede maior e mais conectada, o algoritmo Relaxado apresenta baixos níveis de TVP, i.e., menos de 1,3%, enquanto que FWM-Cego pode exceder o valor de 40%. Neste caso, a maior conectividade da rede favorece a diminuição do TVP a despeito do incremento na possibilidade de interferência intercanal ao longo de uma maior rota com H hops. Para essa rede, o algoritmo de roteamento usado pelo algoritmo Relaxado é capaz de encontrar um maior conjunto de menores rotas. Portanto, o tráfego pode ser mais distribuído ao longo das fibras, desfavorecendo a geração de ruído FWM. Além disso, o maior conjunto de comprimentos de onda utilizados, neste caso $W=10$, possibilita uma alocação de comprimento de onda mais desigualmente espaçada, a qual é benéfica para a minimização do efeito de FWM [110].

Contrariamente do esperado, o CAC/RWA Relaxado rejeita, em média, mais conexões do que o Ético, como pode ser visto na Fig. 4.2a. Para entender melhor essa pequena diferença de desempenho, traçou-se na Fig. 4.3 a probabilidade de bloqueio de acordo com o tamanho da conexão. Observa-se que o CAC/RWA Relaxado favorece a acomodação de conexões mais longas na rede, i.e. uma menor probabilidade de bloqueio é observada para conexões de tamanho $L_{int}+1$ hops (conexões longas). O algoritmo Relaxado usa um procedimento menos restritivo para admissão de conexões longas (Busca Parcial), como pode ser verificado na Fig. 4.1c, com isso espera-se que tais conexões tenham bloqueio devido às restrições de QoS menor do que as conexões curtas.

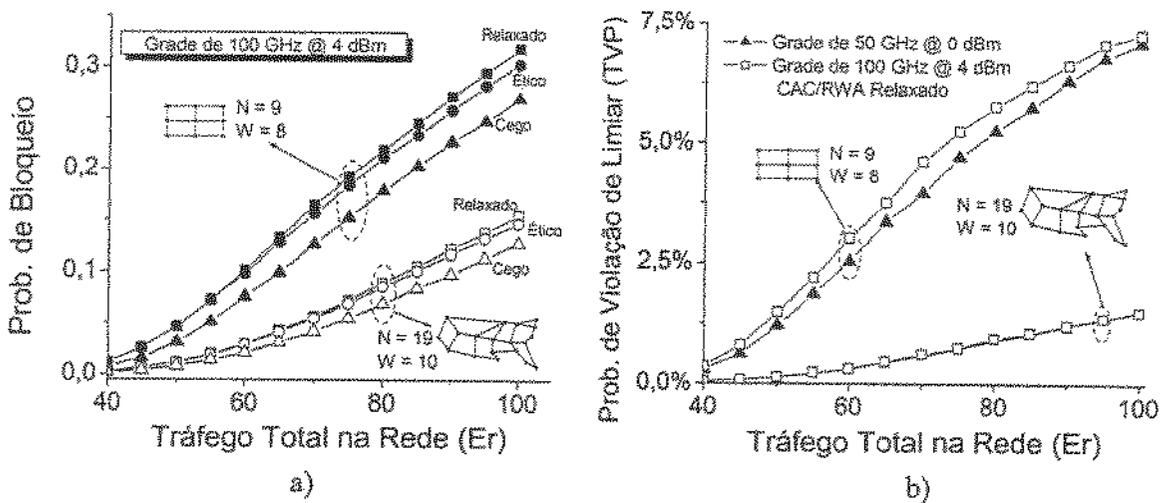


Fig. 4.2: Comparação de desempenho entre os CAC/RWA's.

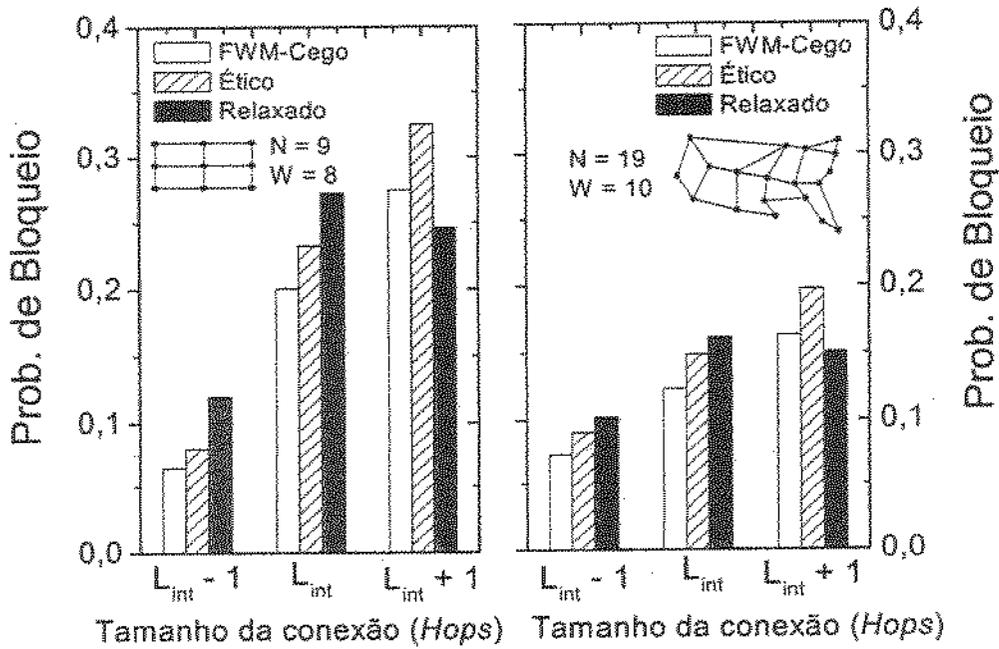


Fig. 4.3: Bloqueio de acordo com o tamanho da conexão: CAC/RWA Relaxado.

A maior probabilidade de bloqueio vista para conexões mais curtas se deve também ao fato de que conexões longas ocupam muitos enlaces na rede. Como um maior número de conexões longas está entrando na rede devido ao fato do CAC/RWA Relaxado empregar um menor bloqueio devido às restrições de QoS; tais conexões, usando os mesmos comprimentos de onda por muitos enlaces na rede, acabam diminuindo a disponibilidade de comprimentos de onda para conexões mais curtas. Com isso, a probabilidade média de bloqueio se torna um pouco maior para conexões curtas do que a apresentada pelo CAC/RWA Ético. Tal comportamento acaba proporcionando uma maior equidade na probabilidade de bloqueio de conexões longas e curtas. Esta é mais uma vantagem do algoritmo Relaxado, pois, além de diminuir o custo computacional, também melhora o *fairness* da rede ao contrário dos algoritmos Ético, Egoísta e FWM-Cego.

Para o CAC/RWA Relaxado quanto menor for o valor do comprimento de interferência, L_{int} , mais Busca Parcial é utilizada para se estabelecer novas conexões na rede e, portanto, mais próximo de $\sim O(RHW^3)$ ficará a complexidade do algoritmo. Por outro lado, o valor escolhido para L_{int} representa um parâmetro chave para o controle do provimento de QoS óptico global na rede, já que um valor não apropriado para L_{int} pode ocasionar alto TVP. Assumindo que $TVP < 10\%$ é um desempenho satisfatório para o QoS

óptico estatístico da rede, a Fig. 4.4 mostra o impacto que a variação do valor de L_{int} traz ao bloqueio e ao TVP. Percebe-se que $L_{int} = \lfloor N/4 \rfloor$ é a escolha correta para a rede pequena, $N=9$, já que $L_{int} < \lfloor N/4 \rfloor$ produz TVP maior do que 12%. Entretanto, L_{int} poderia ser menor do que $\lfloor N/4 \rfloor - 1$ para a rede irregular com $N=19$ sem no entanto violar a condição de $TVP < 10\%$. Perceba também que a probabilidade de bloqueio não apresenta grandes variações à medida que L_{int} varia. Além disso, como é esperado, para $L_{int} > \lfloor N/4 \rfloor$ observa-se uma diminuição acentuada no valor de TVP, a razão é que a Busca Completa vai sendo mais utilizada fazendo com que o algoritmo Relaxado se aproxime do algoritmo Ético (ver Fig. 4.1c).

A Fig. 4.5 mostra que o CAC/RWA Relaxado também apresenta melhoras na probabilidade de ocorrência de erros excessivos. Para grade de 50 GHz operando com potência de 0 dBm por canal, as duas redes apresentam CVP menor do que 0,01%, mesmo carregando alto tráfego (100 Er). Para a grade de 100 GHz, valores maiores do que 0,01% são observados para as duas redes, mas comparando com o algoritmo FWM-Cego (ver Fig. 3.7), vê-se que uma substancial redução foi alcançada pelo Relaxado. Por exemplo, para a rede com $N = 19$ carregada com 80 Er, o algoritmo FWM-Cego apresenta cerca de 1,8% de CVP enquanto que este número figura em torno de 0,05% para o Relaxado.

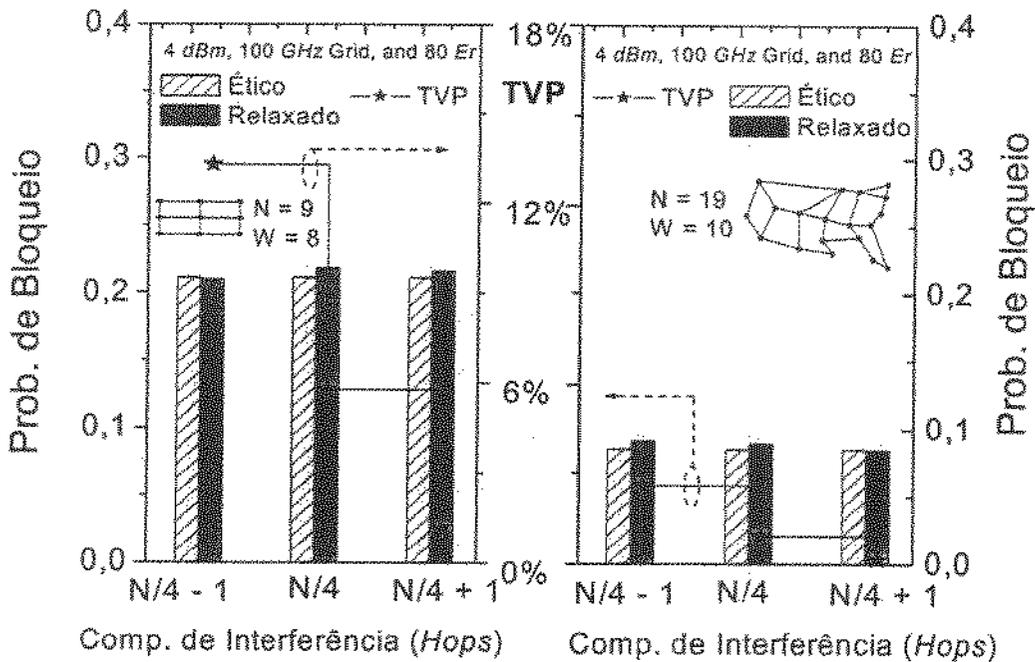


Fig. 4.4: Variação do Comprimento de Interferência. 100 GHz @ 4 dBm @ 80 Er.

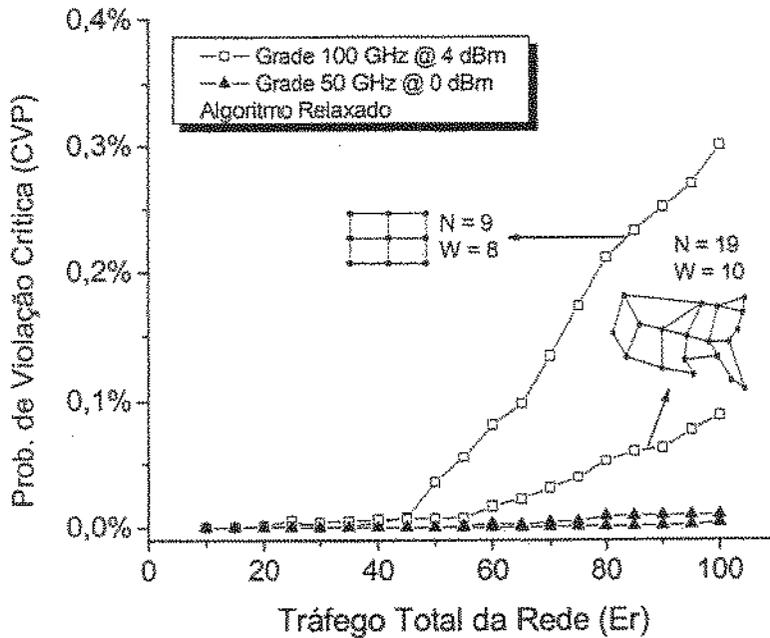


Fig. 4.5: Probabilidade de Violação Crítica (CVP) CAC/RWA Relaxado.

4.1.2. Análise de Complexidade e Perspectiva Prática

Metodologias para acessar e gerenciar QoS óptico global em redes ópticas dinâmicas foram discutidos até o momento. Três algoritmos CAC/RWA's com diferentes níveis de complexidade foram estudados e um exaustivo trabalho de simulações foi feito. A principal conclusão dessas simulações é que deve existir um compromisso entre o custo computacional do CAC/RWA e o nível de preservação do QoS desejado. Neste sentido, o CAC/RWA Relaxado parece ser a melhor opção, já que sua complexidade e níveis de TVP podem ser controlados com a escolha apropriada do comprimento médio de interferência (ver Fig. 4.4).

Uma valiosa contribuição é alcançada pelo Relaxado, pois consegue diminuir a complexidade de $\sim O(HRW^4)$ para valores que tendem a $\sim O(HRW^3)$. Entretanto, CAC/RWA Relaxado ainda possui duas desvantagens: centralização do gerenciamento e baixa extensibilidade (*scalability*). É bem provável que sua utilização seja limitada a redes pequenas e com número reduzido de comprimentos de onda. Em redes DWDM, em que se espera o uso de um grande número de comprimentos de onda, uma outra solução deve ser buscada.

É apresentada a seguir uma metodologia, que recebeu apoio do estudo realizado até o momento, que traz o custo computacional do CAC/RWA a praticamente zero no que

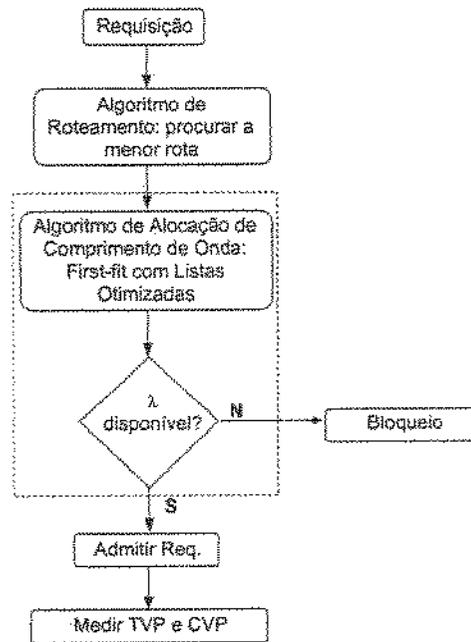
tange ao cálculo dos efeitos não-lineares. Nesta nova abordagem, estratégias estáticas para geração de *listas otimizadas* ou *listas de prioridades* de comprimentos de onda são apresentadas. Uma vez determinadas *off-line*, tais listas otimizadas são aplicadas *on-line* ao bem conhecido algoritmo *First-Fit* para se fazer o processo de admissão de chamadas na rede. Tal procedimento demanda custo computacional zero para ser executada *on-line*, pois o processo de geração da listas otimizadas é todo feito *off-line*. Como consequência, elas admitem que a atribuição de comprimento de onda possa ser gerenciada pelos próprios nós da rota sob análise, em outras palavras, gerenciamento distribuído pode ser implementado.

Encontrar boas listas de prioridade, i.e. aquelas com pouco impacto sobre o QoS óptico global da rede, é de grande interesse porque: i) elas podem diminuir significativamente o custo computacional da atribuição dinâmica de comprimento de onda; e ii) sua existência pode fornecer um avanço na discussão sobre gerenciamento centralizado versus distribuído favorecendo, como consequência, a extensibilidade (*scalability*) e capacidade de sobrevivência das futuras redes ópticas.

A seguir são apresentadas algumas estratégias para geração de listas otimizadas de comprimentos de onda.

4.2 GERAÇÃO DE LISTAS OTIMIZADAS PARA O ALGORITMO FWM-CEGO

O CAC/RWA com Listas Otimizadas é implementado de acordo com a Fig. 4.6. Da mesma forma que o algoritmo FWM-Cego, *First-Fit* utiliza o algoritmo de menor caminho para escolher a rota, entretanto, na etapa de atribuição do comprimento de onda nenhum cálculo de ruído FWM é realizado. Enquanto o CAC/RWA Ético sempre implementa Busca Completa e o Relaxado investiga o ruído FWM baseado no egoísta sempre que possível demandando ainda elevado custo computacional, *First-Fit* não faz cálculo *on-line* de ruído FWM. Outra consequência deste fato, como pode ser visto na Fig. 4.6, é que só existe bloqueio devido à continuidade de comprimento. Nenhum bloqueio devido à restrição de QoS óptico é aplicado pelo *First-Fit*, o que, como será visto mais tarde, contribui para a diminuição da probabilidade de bloqueio da rede.

Fig. 4.6: CAC/RWA *First-Fit* com Listas Otimizadas.

Algoritmos RWA's tradicionais fazem uso de listas de comprimentos de onda muito simples para decidir qual comprimento de onda será atribuído para a requisição de conexão. Por exemplo, as listas de comprimentos de onda utilizadas pelos algoritmos Aleatório (*Random*) e *First-Fit*. Dado um conjunto de comprimentos de onda disponíveis que satisfaz a condição de continuidade, *Random* seleciona um aleatoriamente enquanto que *First-Fit* escolhe um comprimento de onda baseado em uma simples lista de prioridade tal como $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots\}$, que é arranjada de forma numérica crescente. *First-Fit* promove melhor reuso de comprimento de onda na rede quando comparado com *Random* [31]. A continuidade de comprimento de onda é portanto aliviada para novas requisições que chegam na rede e, como consequência, a probabilidade de bloqueio sob *First-Fit* é melhor do que sob o algoritmo *Random*. Todavia, quando limitações da camada física são relevantes, como mostrado na Seção 4.1 que poderia existir impacto não somente sobre a conexão corrente, mas também sobre outros caminhos ópticos na rede. Portanto, além de avaliar a probabilidade de bloqueio, TVP é também uma importante métrica para ser quantificada [15]. Um ponto crucial aqui é descobrir se existem listas de comprimentos de onda especiais que contribuam para diminuir significativamente o impacto dos efeitos da camada física na rede. Isto permitiria que a atribuição de comprimento de onda fosse executada

com complexidade reduzida quando comparada com o algoritmo Ético ou mesmo o egoísta. O grande problema está no fato de que existem $W(W-1)(W-2)\dots = W!$ listas de comprimentos de onda para serem estudadas. Esta seção propõe duas diferentes classes de heurísticas objetivando encontrar boas listas de comprimentos de onda para serem utilizadas pelo algoritmo *First-Fit*. O diagrama da Fig. 1.2 pode auxiliar no entendimento do processo de geração das Listas Otimizadas descrito a seguir, pois estabelece a relação entre os algoritmos utilizados.

4.2.1. Listas Baseadas em Análise de Enlace

a) WAUS (WAVELENGTH ASSIGNMENT UNDER UNEQUAL SPACING)

É bem conhecido que a eficiência do FWM diminui quando os comprimentos de onda são alocados o mais longe possível do comprimento de onda de dispersão nula da fibra (λ_0) [106]. Além disso, alocação desigualmente espaçada produz interferência mínima de FWM sobre os canais ativos [110] como visto no Capítulo 2. Baseado nestes dois fatos, a lista WAUS (*Wavelength Assignment under Unequal Spacing*) é elaborada. As primeiras posições de WAUS são compostas pelos comprimentos de onda que, quando alocados, produzem uma alocação desigualmente espaçada e simultaneamente mais distantes de λ_0 . Quando tal atribuição não é mais possível, o restante da lista é completado com os comprimentos de onda mais distantes do λ_0 . Por exemplo, para uma grade com $W=8$ comprimentos de onda (centrados no comprimento de onda de dispersão nula, i.e., λ_0), a lista WAUS pode ser implementada da seguinte forma: $\{\lambda_1, \lambda_8, \lambda_2, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_3, \lambda_5, \lambda_4\}$. Note que os comprimentos de onda que, quando alocados proporcionam uma grade com espaçamento desigualmente espaçado, são $\lambda_1, \lambda_8, \lambda_2$ e λ_6 . A partir daí o critério de maior distância com relação ao comprimento de onda de dispersão nula é empregado para completar as posições da lista WAUS.

b) LILA (LEAST IMPAIRED UNDER LINK ANALYSIS)

A lista LILA é elaborada a partir do cálculo de pior caso do ruído FWM em um enlace. Para isso considera-se que todos os W canais estão ativos e então se calcula, de acordo com (2.20), a potência do ruído FWM sobre cada um deles. A lista é então montada

a partir do comprimento de onda com menor intensidade de ruído até o mais degradado. A Fig. 4.7 traz um exemplo de geração da lista LILA para um enlace com 8 comprimentos de onda operando na grade de 100 GHz com 4 dBm por canal, como no caso da WAUS e também das listas que serão vistas adiante são sempre centradas no comprimento de onda de dispersão nula, mas obedecendo à grade do ITU [50]. Percebe-se que a maior parte da potência gerada cai sobre os comprimentos de onda mais próximos do comprimento de onda de dispersão nula. Ordenando de forma crescente os comprimentos de onda de acordo com a potência do ruído FWM, a lista LILA resultante neste caso é: $\{\lambda_1, \lambda_8, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_7, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\}$.

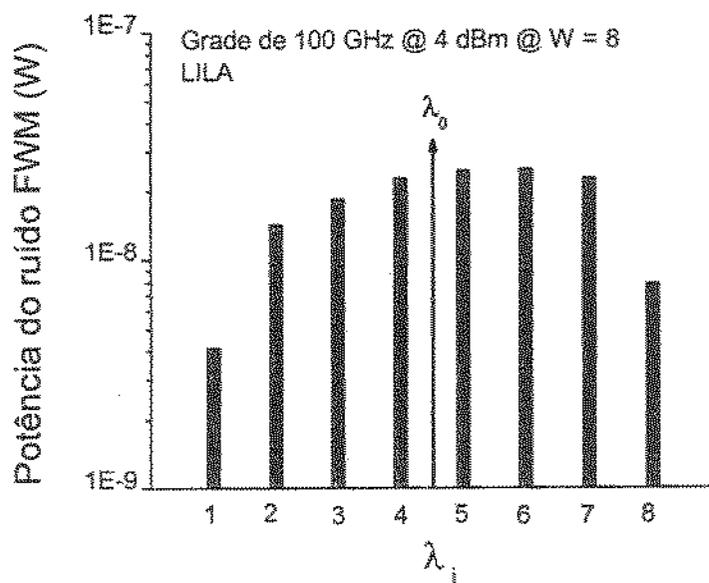


Fig. 4.7: Exemplo da geração da lista LILA para grade de 100 GHz @ 4 dBm @ $W = 8$.

4.2.2. Listas Baseadas em Simulação de Rede (cálculo *off-line*)

Simulações numéricas podem ser úteis na geração das listas de prioridades. Neste caso, as redes são utilizadas como ferramentas *off-line* para se examinar a contribuição de cada comprimento de onda para a degradação do desempenho da rede devido ao ruído FWM. A lista de prioridades poderia então ser montada a partir dos comprimentos de onda que, uma vez utilizados, promovam, em média, o menor impacto do FWM sobre a rede. Duas estratégias bem diferentes são estudadas. Uma delas originada da simulação da rede sob o CAC/RWA Ético e a outra operando a rede sob o algoritmo FWM-Cego. Note que,

por se tratar de simulação de rede, as listas geradas por esse procedimento dependem de parâmetros físicos e de operação da rede como: topologia, tráfego carregado, grade de comprimento de onda e potência dos canais.

a) MUSA (MOST USED UNDER STRICT ASSIGNMENT)

Esta estratégia inicialmente simula a rede operando sob o CAC/RWA Ético. A lista de prioridade é obtida pelo cálculo da frequência de uso de cada comprimento de onda, i.e., o número de vezes que um dado comprimento de onda é alocado para servir uma conexão na rede dividido pelo número total de conexões que foram aceitas na rede. Quanto mais o comprimento de onda é utilizado, mais perto da primeira posição da lista de prioridade ele estará. Espera-se que os comprimentos de onda que forem repetidamente alocados sobre um CAC/RWA que prover a rede de QoS determinístico, como o CAC/RWA Ético, podem também ser aqueles que irão ajudar a preservar o QoS óptico global da rede quando o algoritmo *First-Fit* sob a lista MUSA é usado em um sistema que emprega o FWM-Cego. Deve-se manter em mente que, o algoritmo *First-Fit*, que recebe a lista MUSA, não faz nenhum cálculo do ruído FWM.

b) LIRA (LEAST IMPAIRED UNDER RANDOM ASSIGNMENT)

Esta estratégia utiliza um procedimento liberal objetivando encontrar boas listas de prioridade. A rede é simulada operando sob o algoritmo FWM-Cego usando o algoritmo de atribuição de comprimento de onda Aleatório (*Random*). O TVP do comprimento de onda escolhido $\lambda = \lambda_i$, $i = 1, 2, \dots, W$, em que $p_\lambda(\lambda = \lambda_i) = W^{-1}$, é subseqüentemente verificado. No final da simulação, a lista LIRA é montada colocando-se na primeira posição o comprimento de onda λ_i que possui o menor valor de TVP, i.e. $TVP_\lambda = [1 - P_x(x=0 | \lambda = \lambda_i)]$. $P_x(x | \lambda_i)$ significa a probabilidade de se ter x conexões degradadas dado que o comprimento de onda λ_i foi alocado pelo algoritmo FWM-Cego.

A motivação por trás da elaboração da lista LIRA é que simulando, de forma *off-line*, a rede operando sob um algoritmo FWM-Cego e depois avaliando o impacto do TVP sobre cada comprimento de onda, espera-se obter a resposta em termos de geração de ruído FWM que o procedimento de alocação cega tem sobre a rede. A idéia é então utilizar

primeiro, com o algoritmo *First-Fit*, aqueles comprimentos de onda que possuem o menor impacto sobre o QoS óptico da rede.

4.2.3. Desempenho das Listas Otimizadas

a) TVP, CVP E PROBABILIDADE DE BLOQUEIO

As simulações apresentadas nesta subseção utilizam os parâmetros simulados na Subseção 3.1.2. As redes com $N=19$ e $N=9$ nós com 10, 16 e 24 comprimentos de onda por enlace foram investigadas. As heurísticas para a determinação das listas são essenciais já que existem mais que de $3 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^{13}$ e $6 \cdot 10^{23}$, respectivamente para esses números de comprimentos de onda, listas possíveis de comprimentos de onda para serem testadas. Para servir como critério de comparação com o desempenho do algoritmo *First-Fit* com Listas Otimizadas, simulou-se também a rede operando sobre o CAC/RWA Relaxado e sobre outros dois algoritmos FWM-Cego: o algoritmo *First-Fit* usando uma Lista Não-Otimizada e o algoritmo *Random*. O primeiro usa uma lista trivial de comprimentos de onda, ou seja, $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_W\}$, em que $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \dots < \lambda_W$, ou seja, os comprimentos de onda são ordenados de acordo com a ordem sugerida na grade do ITU [50]. Por exemplo, para uma grade com $W=5$ comprimentos de onda, o *First-Fit* Não-Otimizado utiliza a seguinte lista para fazer a atribuição de comprimento de onda: $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5\}$. O TVP e CVP para os algoritmos FWM-Cego, i.e. *Random* e *First-Fit*, são mostrados nas Fig. 4.8 (0 dBm, 50 GHz e 80 Er) e Fig. 4.9 (4 dBm, 100 GHz e 80 Er) e Fig. 4.10 (0 dBm, 50 GHz e 80 Er); em que a ausência de barras significa que nenhuma violação de limiar foi encontrada nos caminhos ópticos ao final de 10^6 requisições.

Note que o TVP e CVP para o *Random* e o *First-Fit* Não-Otimizado se mostram insensíveis ao incremento do número de comprimentos de onda em todos os cenários investigados. Isto mostra que somente a abundância de comprimentos de onda não é suficiente para combater o efeito de FWM em redes ópticas dinâmicas transparentes [14].

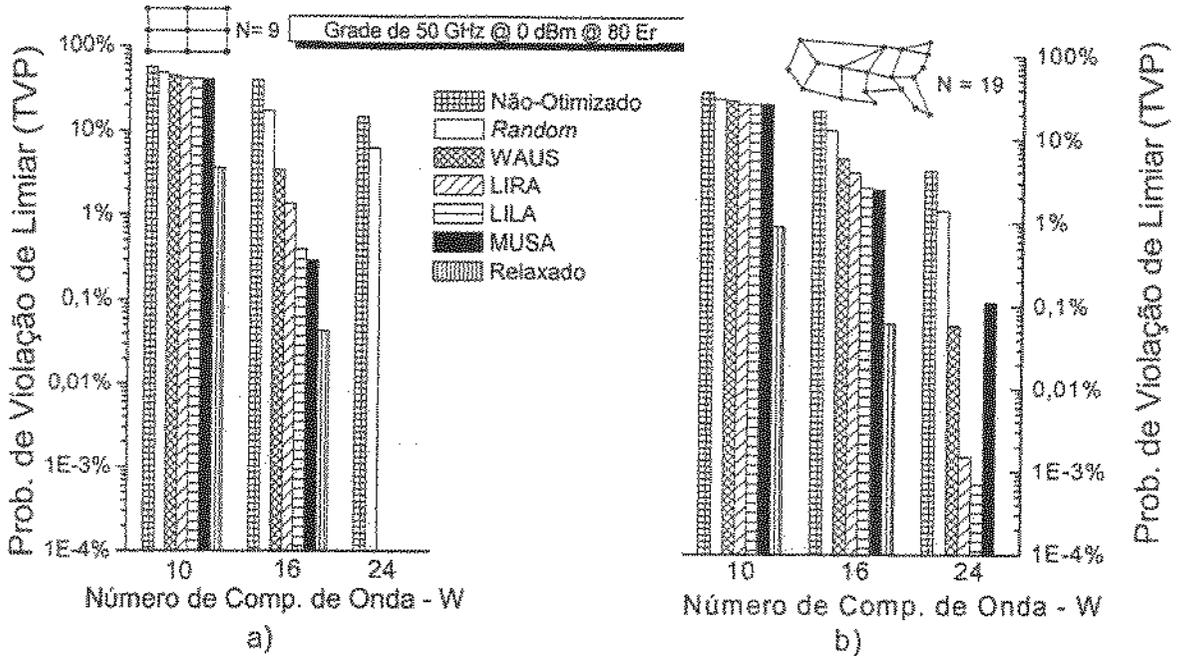


Fig. 4.8: Probabilidade de Violação de Limiar. Grade de 50 GHz @ 0 dBm @ 80 Er.

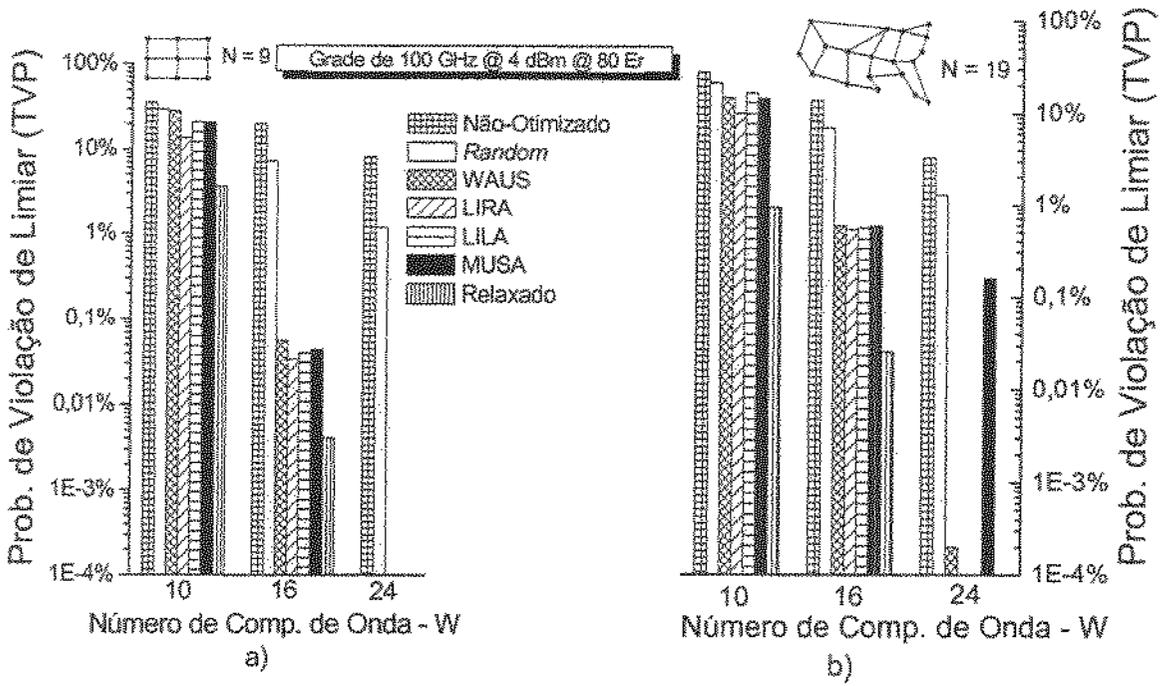


Fig. 4.9: Probabilidade de Violação de Limiar. Grade de 100 GHz @ 4 dBm @ 80 Er.

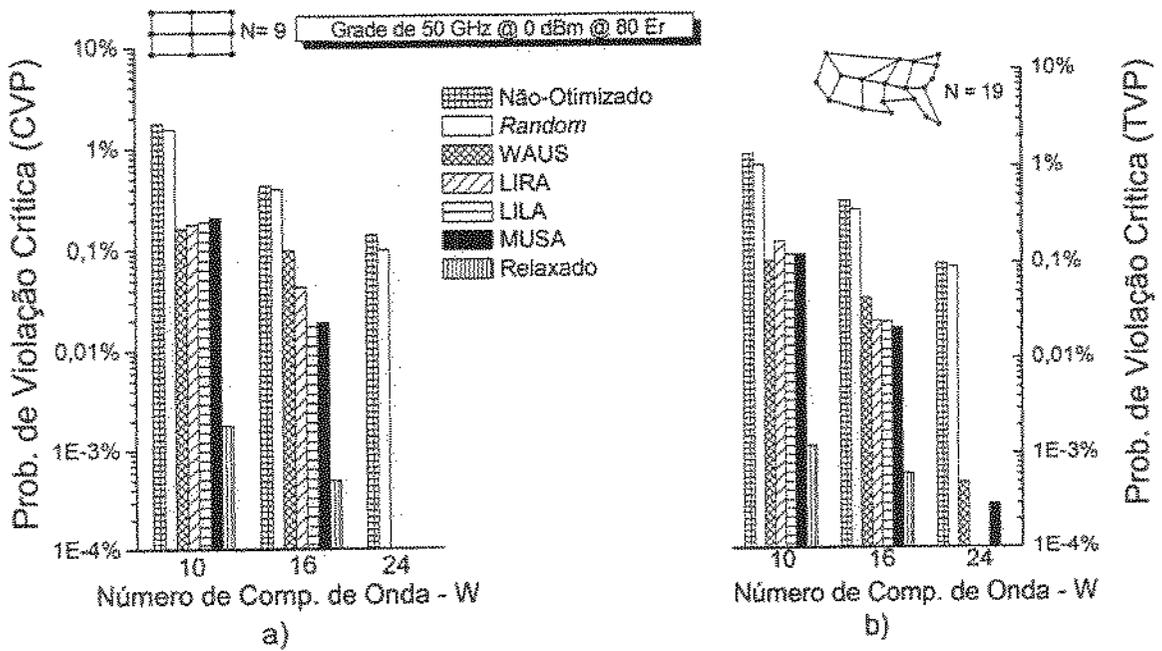


Fig. 4.10: Probabilidade de Violação Crítica. Grade de 50 GHz @ 0 dBm @ 80 Er.

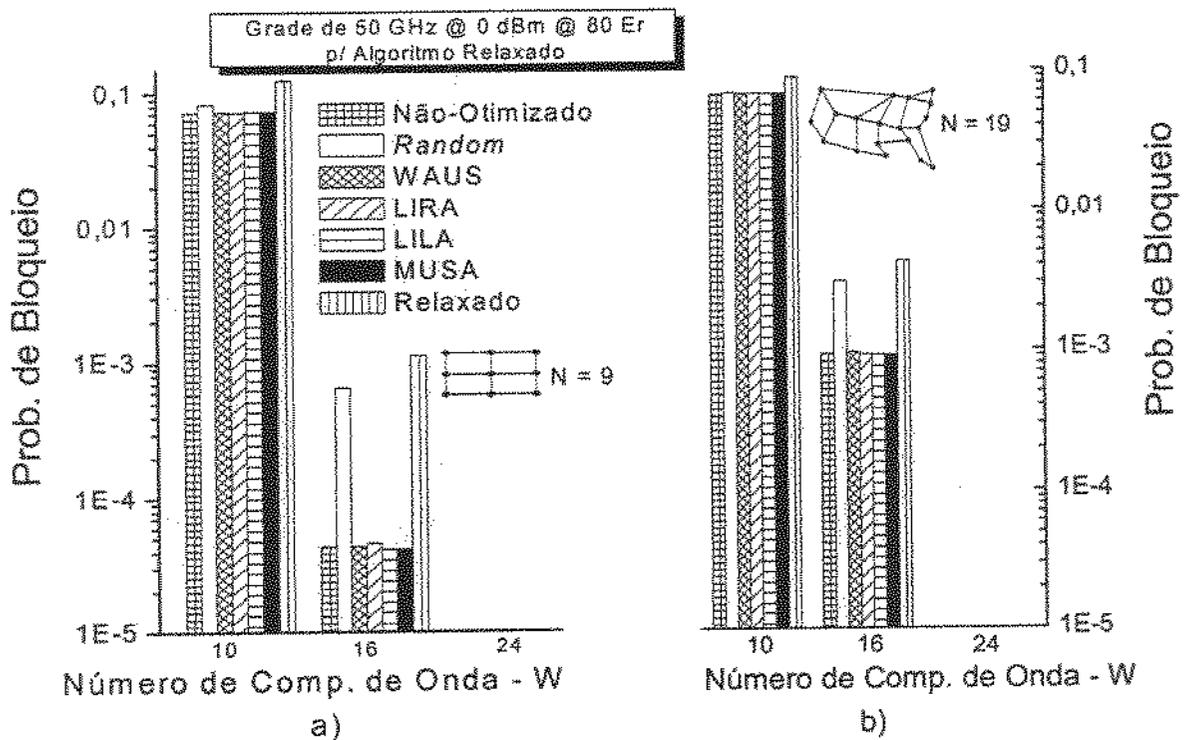


Fig. 4.11: Probabilidade de Bloqueio. Grade de 50 GHz @ 0 dBm @ 80 Er.

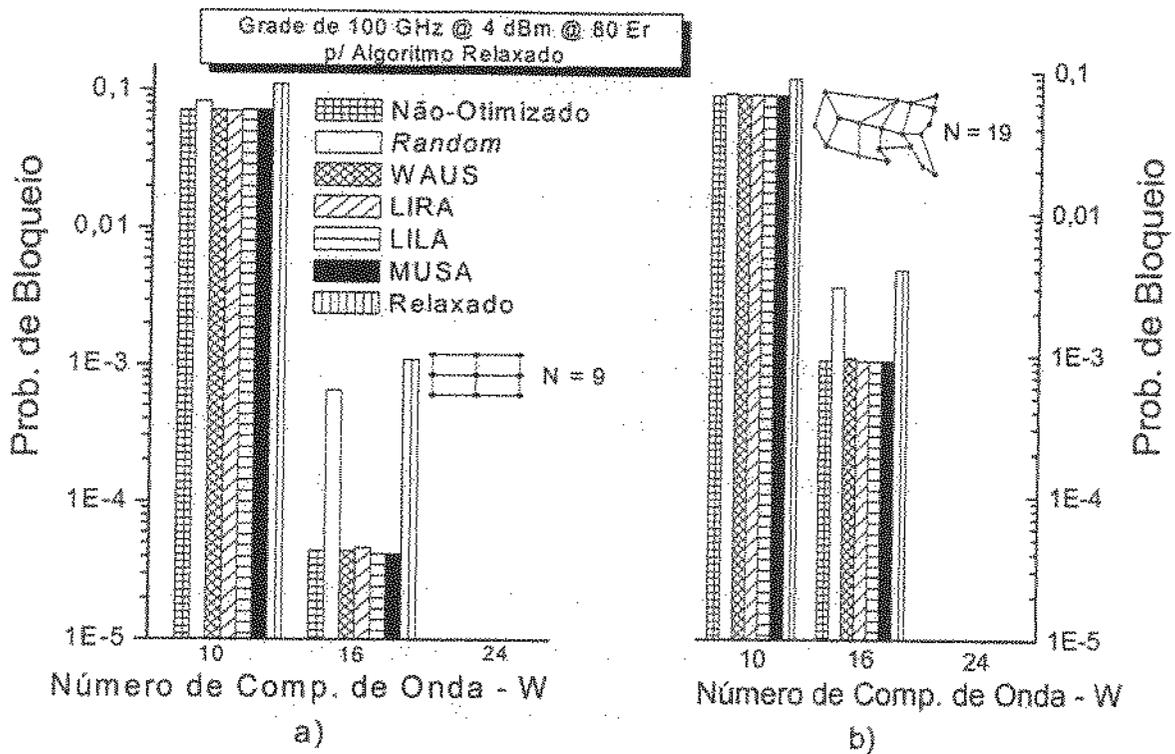


Fig. 4.12: Probabilidade de Bloqueio. Grade de 100 GHz @ 4 dBm @ 80 Er.

É também evidente que é significativa a probabilidade de se ter conexões degradadas para $W=10$ em Fig. 4.8, chegando a 50% para os CAC/RWA's FWM-Cego. Nesse caso, somente o CAC que leva em conta o FWM *on-line* tal como o algoritmo Relaxado é capaz de reduzir o TVP para valores abaixo de 10%, mas, como visto no início deste capítulo, a custo de maior complexidade e probabilidade de bloqueio, como também pode ser verificado nas Fig. 4.11 (0 dBm, 50 GHz e 80 Er) e Fig. 4.12 (4 dBm, 100 GHz e 80 Er). Comportamento similar é observado quando se analisa a Probabilidade de Violação Crítica, valores em torno de 2% são observados para o CVP para os algoritmos FWM-Cego na Fig. 4.10, ao passo que as Listas Otimizadas conseguem reduzir em uma ordem de grandeza o CVP e o Relaxado em quase três ordens de grandeza.

Todavia quando o número de comprimentos de onda aumenta a situação muda. As heurísticas propostas apresentam melhor desempenho com relação ao *Random* no tocante a probabilidade de bloqueio, TVP e CVP. Quanto maior o número de comprimentos de onda disponíveis na rede, melhor é o desempenho do *First-Fit* com Listas Otimizadas. Comparando os resultados das redes sob o algoritmo *Random* com o LILA, existe uma substancial redução nos níveis de TVP e uma moderada redução nos níveis de CVP, por

exemplo, duas ou três ordens de grandeza para o TVP para $W=16$ na Fig. 4.6a e $W=24$ na Fig. 4.8b, respectivamente. Além disso, uma redução de cerca de uma ordem de magnitude na probabilidade de bloqueio para $W=16$ nas Figs. 4.11 e 4.12 em relação ao *Random* é encontrada. Mais importante, entretanto, é a proximidade do TVP e CVP apresentado pelo CAC/RWA Relaxado e as Listas Otimizadas quando o número de comprimentos de onda é incrementado e a melhora obtida com relação à probabilidade de bloqueio em Figs. 4.11 e 4.12. Para um aumento moderado no número de comprimentos de onda por enlace, o TVP e CVP rapidamente tendem a zero. Por exemplo, valores abaixo de 0,0001% são observados para o TVP e CVP, da mesma forma que o CAC *on-line* Relaxado (ver Fig. 4.8 e Fig. 4.10 para $W = 24$).

O fato que o *First-Fit* apresenta menor probabilidade de bloqueio que o *Random* também significa que uma lista apropriada de comprimentos de onda pode aliviar significativamente a interação entre os caminhos ópticos, pois admite, em média, mais caminhos ópticos simultaneamente ativos na rede. Ou seja, como a probabilidade de bloqueio é menor, mais tráfego é transportado na rede e, conseqüentemente, mais ruído FWM poderia ser gerado com a interação entre os caminhos ópticos. *First-Fit* com Listas Otimizadas, no entanto, alivia tal interação apresentando valores de TVP e CVP mais baixos do que os apresentados pelo algoritmo *Random*. Adicionalmente, a probabilidade de bloqueio para o *First-Fit* nas Figs. 4.11 e 4.12 para $W = 16$ muito abaixo do bloqueio apresentado pelo Relaxado nos faz concluir que uma lista de prioridades apropriada pode casar o melhor uso dos recursos da rede, com maior capacidade de provimento de QoS óptico e com menor complexidade em redes ópticas DWDM transparentes com visibilidade da camada física.

b) ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O DESEMPENHO DAS LISTAS

Nas Figs. 4.8 e 4.9 é mostrado que MUSA não reflete diretamente alguns aspectos da visibilidade física do algoritmo Ético, pois listas baseadas em análise de enlace, tal como WAUS, podem apresentar desempenho superior com relação a este processo de geração de lista baseado em simulação de rede [129]. A Fig. 4.13 traz a frequência de alocação relativa para um dado comprimento de onda alocado durante a simulação da rede com $N=19$ e operando sob o algoritmo Ético. A lista MUSA obtida neste caso é: $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4, \lambda_3, \lambda_5, \dots\}$,

$\lambda_{21}, \lambda_{16}, \lambda_{19}, \lambda_{17}, \lambda_{18}$ para a grade de 100 GHz e 4 dBm de potência por canal. A lista MUSA obtida possui, na parte inicial, certa semelhança com a lista Trivial (Não-Otimizada). Vale a pena lembrar que, a alocação igualmente espaçada, promovida pela lista trivial, favorece geração de ruído FWM sobre os caminhos ópticos ativos na rede.

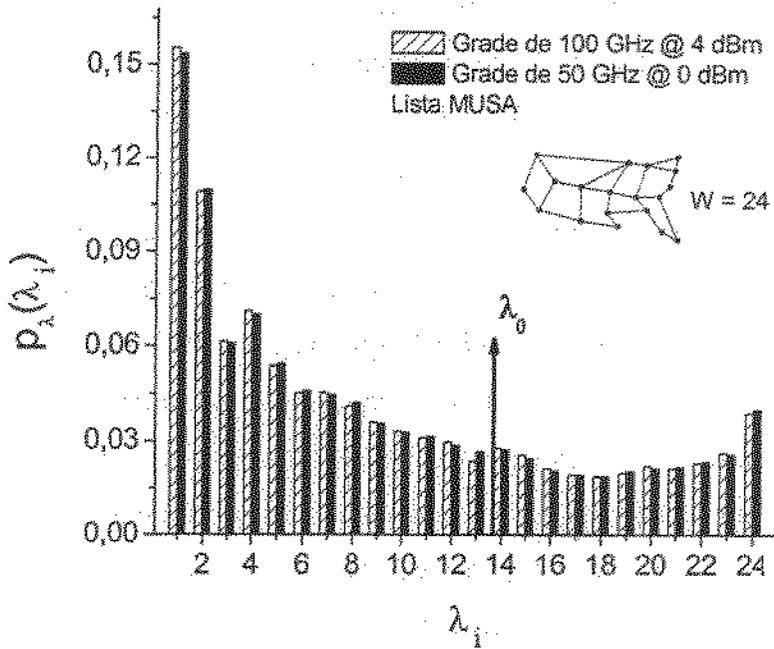


Fig. 4.13: Frequência de alocação de cada comprimento de onda: $p_\lambda(\lambda=\lambda_i)$ para MUSA.

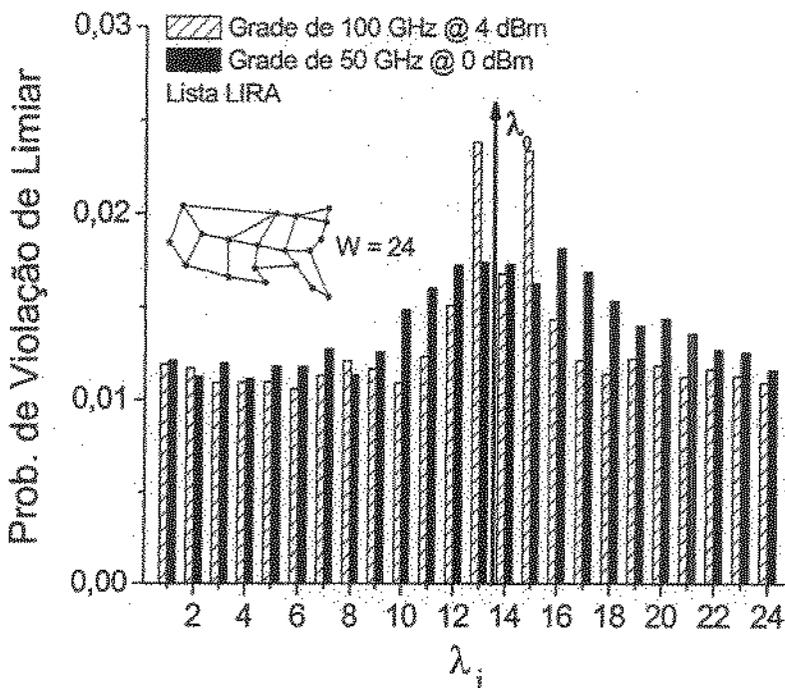


Fig. 4.14: TVP por comprimento de onda para a lista LIRA: TVP_{λ_i} para LIRA.

Contrariamente à intuição, a estratégia LIRA proporciona melhor desempenho do que a MUSA em diferentes cenários (ver Fig. 4.8 e 4.9). Como previamente discutido, LIRA que é obtida a partir de um algoritmo FWM-Cego (*Random*), i.e. nenhuma prevenção (exceto continuidade de comprimento de onda), é empregada ao admitir-se uma nova conexão. Os comprimentos de onda disponíveis são então alocados aleatoriamente para as conexões. A seguir, o impacto de cada comprimento de onda sobre o QoS óptico é estimado com o TVP, como mostrado na Fig. 4.14. A lista de Prioridades obtida a partir da Fig. 4.14 é {5, 9, 2, 23, 3, ... , 15, 11, 13, 14, 12}, para a grade de 100 GHz e 4 dBm de potência por canal, e claramente produz uma atribuição mais irregular do que a obtida por MUSA. Os resultados obtidos sugerem que LIRA é capaz de obter uma resposta não distorcida da rede com relação ao ruído FWM que surge no MUSA em virtude do processo de admissão de conexões. Parece razoável conjecturar que a atribuição aleatória trabalha como um sinal banda larga alimentando um sistema para se obter a sua resposta em frequência. Uma vez obtida algo equivalente à “resposta em frequência da rede”, a lista de prioridades poderia desempenhar o papel de equalização, i.e. colocar o comprimento de onda menos sensível na primeira posição e o mais sensível na última posição da lista de prioridades. O melhor desempenho global de LIRA é possivelmente uma consequência desta equalização. Portanto, o problema com MUSA parece ser a distorção da “resposta da rede” causada pelo exigente CAC aplicado pelo algoritmo Ético.

De uma maneira global, a lista LILA se mostrou a melhor opção dentre as estudadas. Do ponto de vista de desempenho, apresentou os melhores níveis de TVP na maioria dos cenários simulados e mesma probabilidade de bloqueio que as outras listas. Do ponto de vista de simplicidade de geração, LILA não consegue superar WAUS, que pode ser gerada manualmente e não tem dependência com parâmetros sistêmicos e da rede, exceto o número de comprimentos de onda. Mas, LILA tem a vantagem de ser gerada baseada em análise de enlace e não por simulação de rede. Com isso, possui independência com relação aos parâmetros inerentes às redes, como por exemplo, topologia e tráfego carregado, ao contrário de LIRA e MUSA. Devido a essas características, LILA é a opção mais indicada para ser utilizada nos algoritmos propostos no próximo capítulo.

4.3 SUMÁRIO

Neste capítulo foram apresentadas algumas heurísticas para a simplificação dos CAC/RWA's que visam fornecer QoS óptico face a efeitos não-lineares em redes ópticas transparentes dinâmicas. *First-Fit* com Listas Otimizadas pode ser uma alternativa interessante para resolver a complexidade e o gargalo de centralização do CAC/RWA. As listas otimizadas propostas são capazes de significativamente diminuir a inter-relação, criada pelo ruído FWM, entre o desempenho dos caminhos ópticos em uma rede transparente. Todavia, quando o número de comprimentos de onda é reduzido, o desempenho das listas não é satisfatório. Nestas situações, um bom candidato para CAC/RWA é o algoritmo Relaxado, já que CAC/RWA Relaxado também se mostrou competente no provimento de QoS estatístico para a rede óptica.

Em suma, fornecer QoS óptico em uma rede óptica transparente dinâmica sob a influência de um efeito não-linear de FWM pode ser alcançado com as estratégias apresentadas neste capítulo. Sobretudo por meio do *First-Fit* com Listas Otimizadas. Contudo, a análise feita pressupõe um cenário no qual inexiste diferenciação óptica de classes de serviço. Portanto, resta ainda uma lacuna a ser preenchida, na medida em que a rede óptica é uma rede multicliente e dessa forma CAC/RWA's que provam diferenciação óptica de serviço se tornam essenciais.

No próximo capítulo são apresentadas algumas alternativas visando preencher tal lacuna. Da mesma forma que o estudo realizado até aqui, inicia-se por um procedimento mais conservador até se chegar a uma proposta mais simples.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DIFERENCIAÇÃO ÓPTICA DE SERVIÇO

Neste capítulo é investigada a aplicabilidade de Listas Otimizadas de comprimento de onda em um cenário de diferenciação de serviços ópticos. A estratégia adotada é o relaxamento gradual da complexidade dos algoritmos de diferenciação propostos. Na análise dos resultados, inicialmente é medido o desempenho da rede do ponto de vista do cliente e do ponto de vista do operador da rede separadamente. Finalmente propõe-se uma figura de mérito para a análise integrada do desempenho da rede, a qual permite: i) determinação da relação de custo entre o tráfego Classe 1 e Classe 2 para que a receita da rede seja preservada; ii) determinação de pontos ótimos de operação face a cenários de tarifação do tráfego das classes de serviço oferecidas às redes clientes.

5.1 TRABALHOS PRÉVIOS

Enquanto um significativo esforço tem sido feito para garantir diferenciação de serviços em redes IP, diferenciação óptica de serviços em redes ópticas tem sido pouco considerada e ainda continua um tema em aberto [7]. O conceito de QoS em redes ópticas pode ser visto de três formas: i) qualidade do sinal óptico, que é relacionada aos efeitos da camada física descritos no Capítulo 2; ii) requisitos funcionais, os quais podem ser relacionados às falhas na rede como cortes na fibra; iii) diferenciação de QoS.

No primeiro caso, em uma frente de trabalhos, os efeitos limitantes da camada física têm sido considerados pelos algoritmos RWA's, os quais escolhem rotas ou comprimentos de onda específicos que resultam em uma melhor OSNR para o caminho óptico analisado [34] – [39]. No caso (ii), o ponto chave é o desenvolvimento de algoritmos RWA que implementam mecanismos de proteção e restauração contra cortes nas fibras [40] – [42], mas considerando apenas a existência de uma classe de serviço. A exceção é [46], em que um algoritmo RWA é implementado visando fornecer diferenciação de QoS junto com mecanismos de proteção e restauração. Diferenciação de QoS em redes ópticas tem sido considerada na maioria das vezes no contexto de maximização do atendimento da classe de serviço com maior prioridade [43] – [45]. Alguns desses artigos propõem algoritmos RWA que admitem dinamicamente atribuir um conjunto de comprimentos de onda para a classe com mais alta prioridade com o objetivo de maximizar o seu atendimento.

O ponto chave é que os casos (i) e (iii) raramente foram considerados em conjunto na literatura ou, quando considerados, foram tratados de forma simplista. Por exemplo, em [47] são propostos algoritmos para se implementar diferenciação de QoS levando-se em conta efeitos da camada física. Todavia, o critério para a inclusão de tais efeitos é limitar o tamanho das rotas a um dado número de saltos (*hops*), em vez do uso de um modelo analítico que faça uma estimativa da degradação da OSNR dos caminhos ópticos imposta por um ou mais efeitos da camada física. Assim, quando chega uma requisição na rede que possui comprimento maior do que um valor de limiar, o mecanismo de admissão de chamadas entende que esta requisição não atende às exigências de QoS. Já em [43], do conjunto dos W comprimentos de onda presentes na rede óptica, é adotado que um subconjunto destes comprimentos de onda são capazes de fornecer imunidade frente aos

efeitos da camada física. Assim, tal subconjunto é estrategicamente reservado para uso exclusivo da classe com mais alta prioridade.

Existe, portanto, a necessidade de se estudar estratégias que considerem concomitantemente diferenciação de QoS óptico e efeitos da camada física.

5.2 MECANISMOS PARA DIFERENCIAÇÃO DE QoS ÓPTICO

Os resultados obtidos nos capítulos anteriores apontam para a existência de uma relação de compromisso entre três grandezas: nível de QoS experimentado pelas redes clientes, volume total de tráfego atendido pela rede e complexidade dos algoritmos de provisionamento de QoS. Um bom nível de qualidade do sinal óptico, i.e. baixos níveis de TVP e CVP, pode ser conflitante com os interesses do operador da rede, o qual visa maximizar o uso da infraestrutura instalada. O algoritmo Ético apresentado no Capítulo 3 garante níveis determinísticos de TVP e CVP, mas às custas de alta rejeição de tráfego (probabilidade de bloqueio) e complexidade de implementação. Qualquer tentativa de redução de complexidade leva a deterioração da qualidade do sinal óptico, além de poder aumentar também a probabilidade média de bloqueio da rede (como por exemplo, o algoritmo Relaxado visto no Capítulo 4). Todavia, a alternativa que se mostrou capaz de conciliar as três grandezas mencionadas anteriormente foi o uso do algoritmo *First-Fit* com Listas Otimizadas de comprimento de onda.

Em um cenário com múltiplas classes de serviço o provisionamento de QoS oferece uma dificuldade adicional, já que o CAC consciente de FWM deve também gerenciar a interferência entre as classes de serviço existentes na rede antes de admitir ou rejeitar um pedido de conexão [33]. Adota-se que a rede óptica irá fornecer duas Classes de Equivalência de Serviço Óptico (OFEC – *Optical Forward Equivalence Class*) às redes clientes. Classe_1 (Cl_1), que tem um OSLA exigindo uma $BER_{TH} < 10^{-12}$, para suportar serviço *premium* vindo, por exemplo, das interfaces das redes clientes responsáveis por este tipo de tráfego; enquanto Classe_2 tem um OSLA menos exigente para avaliar o QoS óptico dos caminhos ópticos por meio da rede, i.e. $BER_{TH} < 10^{-9}$. Caminhos ópticos servindo tráfego Classe_1 devem ter baixo valor de TVP (abaixo de 10%) enquanto Cl_2 suporta TVP elástico, i.e. não possui nenhuma restrição com relação ao TVP. Caminhos

ópticos Cl_2 são, portanto, apropriados para servir tráfego do tipo *melhor esforço* (*best-effort*). A disponibilidade de recursos para cada classe é refletida pela probabilidade de bloqueio, a qual deverá ser um termo do OSLA. Entende-se que os CAC/RWA's deveriam fornecer níveis de probabilidade de bloqueio para a Classe_1 menor do que para Classe_2 para garantir uma maior facilidade de acesso a recursos aos clientes que demandam caminhos ópticos com melhor qualidade, os quais certamente serão associados a tarifas maiores. Nota-se que essa convenção exige que seja imposta na rede uma política de admissão contrária ao comportamento esperado da rede; em que conexões mais exigentes naturalmente teriam maior probabilidade de encontrar condições desfavoráveis para o estabelecimento de caminhos ópticos do que requisições com um padrão de qualidade mais relaxado.

O principal objetivo deste capítulo é propor CAC's de baixa complexidade capazes de admitir diferenciação óptica de serviços. A investigação inicia com uma proposta mais conservadora mostrada na Fig. 5.1a e baseada no algoritmo Ético (apresentado no Capítulo 3), que produz Isolamento Total de Classes (FCI – *Full Class Isolation*), pois não admite nenhuma violação do BER_{TH} (setas na Fig. 5.1) para ambas as classes de serviço quando uma nova requisição é estabelecida na rede. Em outras palavras, $TVP_{CI1} = TVP_{CI2} = 0$ para o CAC FCI.

Nota-se que o conceito de isolamento entre classes, como classicamente usado em redes de comutação de pacotes, sugere que a variação de tráfego de uma dada classe não deve diminuir a disponibilidade de recursos (banda) para as classes que lhe são superiores [8]. Entretanto, no caso de diferenciação de QoS óptico que é investigado, recursos podem ser indisponibilizados para a classe de alta prioridade não só pelo uso dos comprimentos de onda por conexões de baixa prioridade, mas também pela interferência que estas causam ao longo da rede em virtude do FWM. O termo isolamento entre classes é inicialmente utilizado para analisar o problema de interferência devido ao FWM no processo de controle de admissão das conexões na rede.

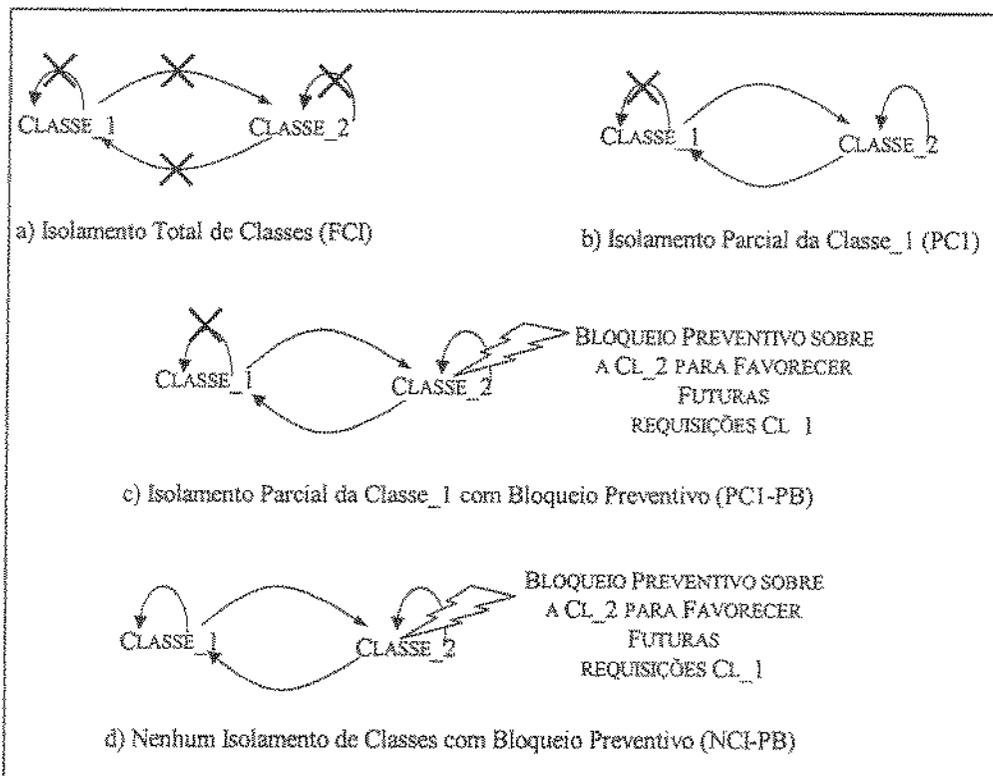


Fig. 5.1: CAC's com diferenciação óptica de serviços: TVP mútuo.

Com o objetivo de investigar qual o impacto que cada simplificação acrescentada terá sobre o desempenho das classes de serviço, o CAC Isolamento Parcial da Classe_1 (PC1 – *Partial Class_1 Isolation*) somente previne conexões classe_1 de degradações originadas de requisições Classe_1, como visto na Fig. 5.1b. Requisições pertencentes à Classe_2 são admitidas na rede usando o algoritmo *First-Fit* com Listas Otimizadas.

Em todos os CAC's apresentados até o momento, é esperado que as conexões pertencentes a Classe_1 experimentem maior probabilidade de bloqueio do que as pertencentes a Classe_2. Para atender um dos objetivos iniciais de permitir menor probabilidade de bloqueio à classe de alta prioridade, uma política de Bloqueio Preventivo, na Fig. 5.1c, é imposta sobre conexões Classe_2 por meio do mecanismo de controle de congestionamento com relação ao comprimento de onda. Com isso, há uma reserva de recursos da rede (à medida que sua utilização cresce), a qual será destinada para conexões com mais alta prioridade.

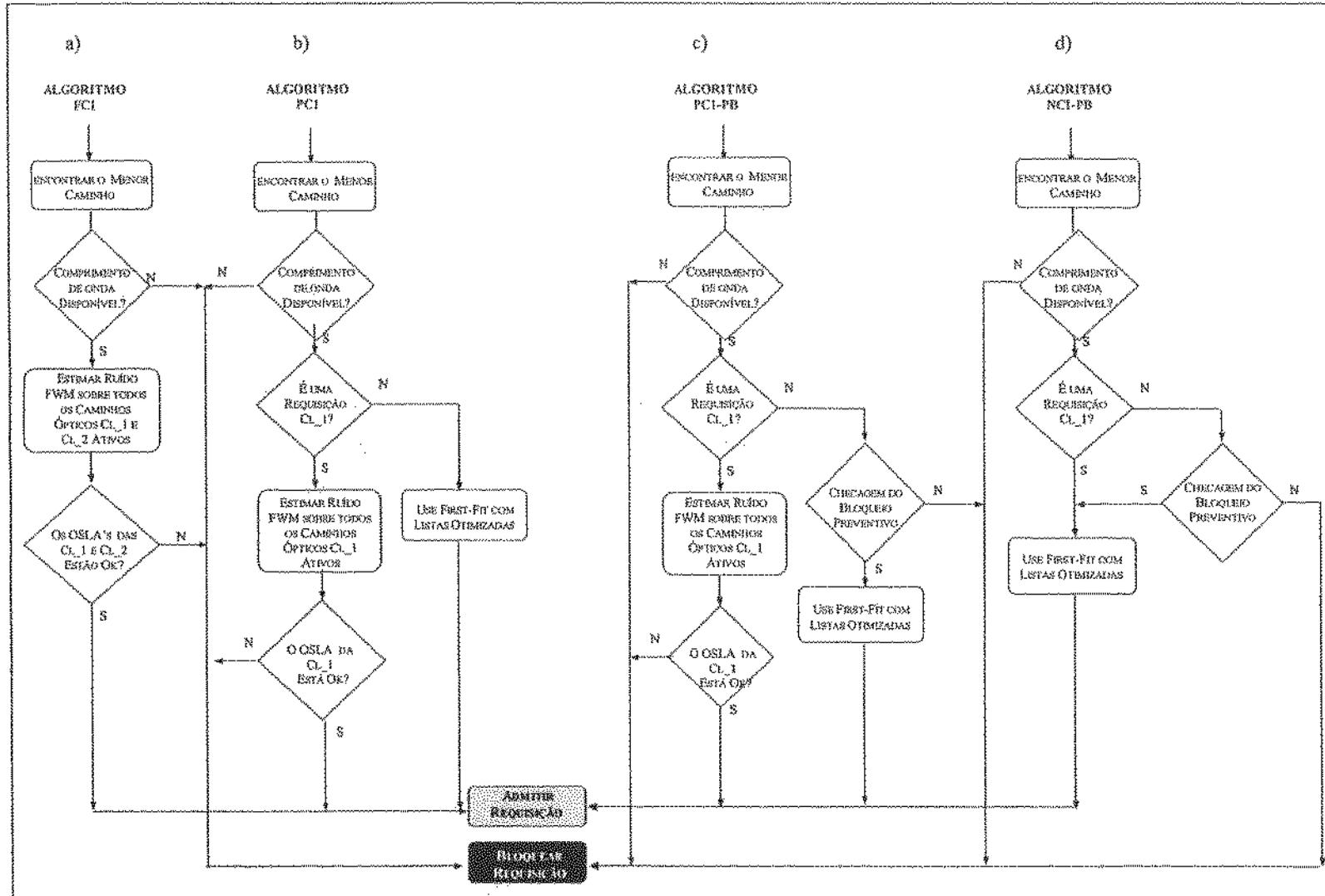


Fig. 5.2: CAC/RWA's para diferenciação óptica de serviços.

Finalmente, o último CAC, mostrado na Fig. 5.1d, utiliza o *First-Fit* com Listas Otimizadas para ambas as classes de serviço resultando em Nenhum Isolamento de Classes com Bloqueio Preventivo (NCI-PB – *No Class Isolation with Preventive Blocking*) e, portanto, em um CAC/RWA muito simples. Novamente, bloqueio preventivo é empregado visando proteger conexões Classe_1. Note que os algoritmos com bloqueio preventivo sobre a classe de baixa prioridade utilizam o artifício de criar isolamento de ruído via política que promove isolamento de tráfego das classes. Existe a necessidade de integrar a análise do conceito de isolamento de classes num ambiente complexo, no qual a utilização de recursos e degradação das condições de uso da rede devido à geração de ruído FWM (sobre as conexões ativas CI_1 e CI_2 e sobre a própria requisição) estão interligados. Neste trabalho é proposto o uso de uma figura de mérito da rede na Seção 5.4 na qual regiões de viabilidade de OSLA para as classes são determinadas. Este procedimento progressivo de análise ajuda a entender melhor as implicações de relaxar a complexidade do provimento de QoS óptico diferenciado e seu impacto sobre o isolamento de classes. A seguir é dada uma descrição mais detalhada de cada algoritmo com o auxílio da Fig. 5.2.

5.2.1. Isolamento Total de Classes (FCI – Full Class Isolation)

O algoritmo FCI está mostrado na Fig. 5.2a. Ele garante que violações do BER_{TH} para ambas as classes não são admitidas, i.e. como ilustrado no diagrama da Fig. 1.2, o algoritmo Ético é utilizado para ambas as classes. Se pelo menos uma conexão ativa na rede tiver a sua BER acima de 10^{-12} no caso de conexões Classe_1 ou 10^{-9} no caso de conexões Classe_2 quando uma nova requisição vai ser ativada na rede, tal requisição deve ser bloqueada. Note que este é o mais complexo CAC/RWA, já que uma busca completa do ruído FWM é realizada para requisições de ambas as classes como mostrado na Fig. 5.2a. Tal algoritmo será importante para servir como referência de qualidade e complexidade.

5.2.2. Isolamento Parcial da Classe_1 (PC1 – Partial Class_1 Isolation)

Na tentativa de relaxar a complexidade em direção ao uso das Listas Otimizadas vistas no Capítulo 4, CAC/RWA PC1 assegura que o cálculo do ruído FWM realizado somente sobre conexões pertencentes à Classe_1, enquanto conexões Classe_2 usam Listas Otimizadas de comprimentos de onda. Isso significa que requisições CI_1 para serem

admitidas na rede enfrentam um procedimento mais exigente como visto na Fig. 5.2b. Como consequência do uso das listas e verificação parcial do ruído FWM implementada somente para a Cl_1, TVP para ambas as classes poderá ser diferente de zero. Em outras palavras, requisições Cl_2 podem violar conexões Cl_1 e Cl_2 ativas, enquanto requisições Cl_1 só podem violar caminhos ópticos Cl_2 ativos, como ilustrado na Fig. 5.1b. Espera-se, portanto, que a probabilidade de bloqueio para a Classe_1 seja maior do que para a Classe_2 em virtude do seu processo mais restritivo de admissão de conexões.

5.2.3. Isolamento Parcial da Classe_1 com Bloqueio Preventivo (PC1-PB – *Partial Class_1 Isolation with Preventive Blocking*)

Com o objetivo de melhorar a probabilidade de bloqueio para a Cl_1, CAC/RWA PC1-PB em Fig. 5.2c implementa uma modificação no algoritmo PCI aplicando uma estratégia de controle de congestionamento inicialmente proposta para diferenciação de serviços (DiffServ) em redes de pacotes no processo de compartilhamento do *buffer* [8]. Propõe-se sua aplicação num contexto de redes de circuitos em que os recursos a serem compartilhados são os comprimentos de onda em uma dada rota da rede óptica. A Fig. 5.3 ilustra o processo de descarte prévio (*early-discarding*) de pacotes adaptado para realização de bloqueio preventivo de conexões.

Quando o número de comprimentos de onda em uso em uma menor rota (escolhida pelo algoritmo de roteamento), denotado aqui por W_A , está abaixo de um limiar de congestionamento mínimo $\lfloor W/2 \rfloor$, o bloqueio preventivo de requisições do CAC começa a agir sobre as conexões Cl_2. O bloqueio preventivo cresce linearmente à medida que o número de comprimentos de onda em uso aumenta, de acordo com $\lfloor W_{ativos}/W \rfloor$, até este número atingir o limiar de congestionamento máximo $\lfloor 0,9W \rfloor$; em que W_{ativos} significa o número de comprimentos de onda ativos ao longo da rota escolhida pelo algoritmo de roteamento. Acima desse limiar máximo, todas as requisições Classe_2 são bloqueadas pelo CAC e, portanto 10% dos comprimentos de onda na rota em análise são reservados para requisições Classe_1. Com isso espera-se que a probabilidade de bloqueio para a

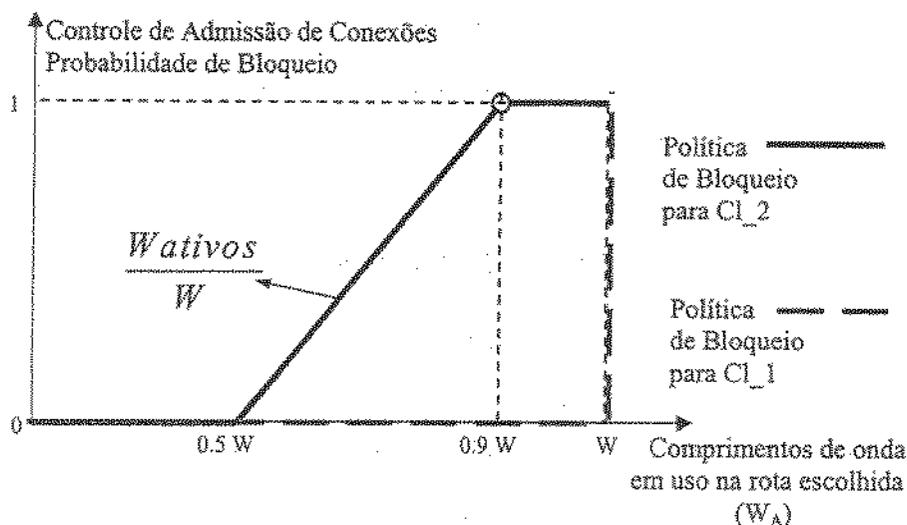


Fig. 5.3: Mecanismo de controle de congestionamento por meio de bloqueio preventivo.

Classe_1 diminua quando comparada com as estratégias que não aplicam bloqueio preventivo.

Note que o conceito de isolamento de classes discutido no algoritmo FCI é em relação à contaminação por ruído FWM. O bloqueio preventivo, como proposto neste trabalho, substitui tal isolamento por um isolamento de classes com relação à reserva de recursos da rede. Embora a intenção seja preservar recursos para a Classe_1, tal procedimento também tem reflexo sobre o montante de ruído gerado na rede, já que limitando o tráfego Cl_2 diminui-se também o número total de conexões ativas na rede. E como visto na Fig. 3.5, o TVP é fortemente dependente do tráfego total da rede.

5.2.4. Nenhum Isolamento de Classes com Bloqueio Preventivo (NCI-PB – *No Class Isolation with Preventive Blocking*)

Como apresentado na Fig. 5.2d, este é um CAC/RWA com mais baixa complexidade já que nenhum cálculo de ruído FWM é realizado como mostrado no diagrama da Fig. 1.2, o CAC/RWA NCI-PB usa o First-fit com Listas Otimizadas e, para favorecer requisições Cl_1, Bloqueio Preventivo sobre a Cl_2. NCI-PB implementa somente isolamento de classes em função dos recursos, mas presume que algum isolamento de classes (ou dentre conexões da mesma classe) com relação a ruído será realizado pelas Listas Otimizadas em função da sua eficiência apresentada na diminuição do TVP.

Entretanto, nenhum isolamento determinístico é implementado em relação ao ruído FWM, como ilustrado na Fig. 5.1d, em contraste com o algoritmo PC1-PB, em que novas conexões Cl_1 nunca violam as conexões Cl_1 já presentes na rede.

5.3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Como de praxe, as simulações apresentadas nesta seção utilizam os mesmos cenários simulados na Subseção 3.1.2. Os resultados desta seção são tomados baseados nos pontos de vista do cliente e do operador da rede separadamente para classificarmos os melhores algoritmos que: i) conduzem à melhoria da qualidade do sinal óptico fornecido aos clientes; ii) elevam o atendimento às demandas de tráfego (vazão da rede).

5.3.1. Ponto de Vista do Cliente

A probabilidade de bloqueio por classe (Pb_Cl1 e Pb_Cl2) para as redes com $N=19$ e com $N=9$ nós operando sob os CAC/RWA FCI e sob a grade de 100 GHz com 4 dBm de potência por canal e sob a grade de 50 GHz com potência de 0dBm é mostrada na Fig. 5.4 [130]. Como esperado, o desempenho obtido para a Classe_1 é próximo do desempenho obtido para a Classe_2, mesmo sob forte tráfego e para diferentes proporções de conexões Classe_1 ($p = 0,3$ na Fig. 5.4a-c e $p = 0,7$ na Fig. 5.4b-d). CAC/RWA FCI se mostra insensível à composição de tráfego já que ele fornece OSLA's semelhantes para as duas classes.

Para entender melhor este resultado, a Fig. 5.5 traz a probabilidade de bloqueio por classe obtida para os demais CAC/RWA's para ambas as redes na Grade de 50 GHz a 0 dBm e carregadas com 80 Er de tráfego. Em contraste com os resultados da Fig. 5.4, quando a rede opera com o CAC/RWA PC1 um significativo aumento na probabilidade de bloqueio da Cl_1 é percebido quando comparado com o montante de requisições Cl_1 rejeitadas pelo CAC/RWA FCI. Isto é causado pela disputa desigual pelos recursos da rede entre as duas classes, com impacto negativo sobre a probabilidade de bloqueio vista pela Cl_1 (como foi antecipado).

Além disso, os níveis de TVP para Cl_1 apresentados pelo CAC/RWA PC1 atingem valores bem maiores do que 10% para $W=10$ e $W=16$ nas Figs. 5.6a e 5.6b para ambas as redes. Tendências similares são vistas para o TVP para a Cl_2 na Fig. 5.6c e 5.6d. Todavia,

nesse caso a menor probabilidade de bloqueio para conexões Cl_2 (veja Figs. 5.5c e 5.5d), significa que existe um número maior de caminhos ópticos Cl_2 na rede, aumentando, portanto, as chances de pelo menos uma delas ser degradada quando uma nova conexão ingressa na rede. Outro efeito negativo do PC1 são seus altos níveis de CVP. Como visto na Fig. 5.7, o algoritmo PC1 apresenta, para $W = 10$ em ambas as redes, probabilidade maior de 10% de se ter pelo menos uma conexão com degradação excessiva, i.e. $BER > 10^{-3}$, quando um novo caminho óptico é admitido na rede. Degradações excessivas podem ter como consequência a ativação dos mecanismos de proteção e restauração da rede [12]. Por exemplo, o $CVP = 16,5\%$ apresentado pelo algoritmo PC1 para a rede com $N = 9$ e $W = 10$ significa que existe uma alta probabilidade dos mecanismos de proteção e restauração serem acionados, já que se adota que o CVP deve ser menor de que 0,01% para evitar o freqüente acionamento de tais mecanismos. Conseqüentemente, o desempenho da rede pode ser prejudicado pelo freqüente acionamento de tais mecanismos na medida que novas rotas e/ou comprimentos de onda têm que ser alocados para as conexões com degradação excessiva. Sem contar o aumento significativo do fluxo de informações no plano de controle da rede.

Neste ponto, é importante lembrar que TVP e CVP para o CAC/RWA FCI são mantidos em zero para as duas classes. Sendo assim nenhuma barra é vista nas Figs. 5.6 e 5.7 para esse algoritmo.

Introduzindo Bloqueio Preventivo para requisições de conexões pertencentes a clientes Classe_2, o algoritmo PC1-PB consegue reduzir a probabilidade de bloqueio para requisições da classe *premium* quando comparado com o algoritmo PC1 (veja Figs. 5.5a e 5.5b). Note que TVP para a Cl_1 também é reduzido na Fig. 5.6a e 5.6b quando comparado com o desempenho de PC1. Embora, como visto nas Figs. 5.5c e 5.5d, isto leve a uma alta probabilidade de bloqueio para o tráfego de *melhor esforço*, i.e. o tráfego Cl_2 , causado pelo mecanismo de controle de congestionamento. Veja também que o bloqueio para Cl_1 (Figs. 5.5a e 5.5b) é ainda pior do que aquele encontrado para o CAC/RWA FCI. Além disso, a probabilidade de se ter uma conexão degradada excessivamente permanece alta mesmo sob PC1-PB (acima de 0,01% para $W = 10$ e $W = 16$) como visto na Fig. 5.7.

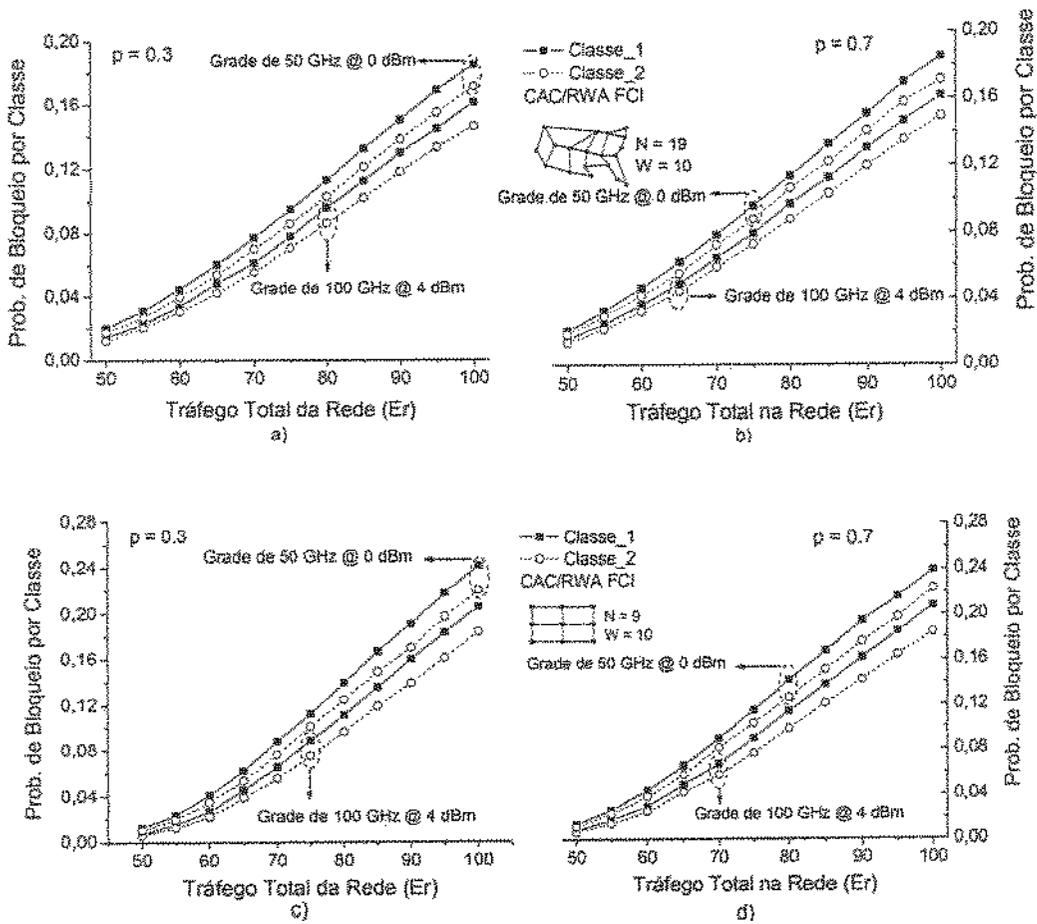


Fig. 5.4: Probabilidade de bloqueio por Classe para o CAC/RWA FCI.

Embora simples e com alta extensibilidade (*scalability*), CAC/RWA NCI-PB apresenta a melhor probabilidade de bloqueio para Cl_1 dentre os algoritmos da Fig. 5.5. Existem duas razões principais para esse bom desempenho: i) NCI-PB rejeita conexões Cl_1 devido somente à restrição de continuidade de comprimento de onda, portanto ele deve ser superior aos outros algoritmos que também bloqueiam requisições Cl_1 devido à contaminação por ruído FWM; ii) a política de controle de congestionamento beneficia conexões Cl_1.

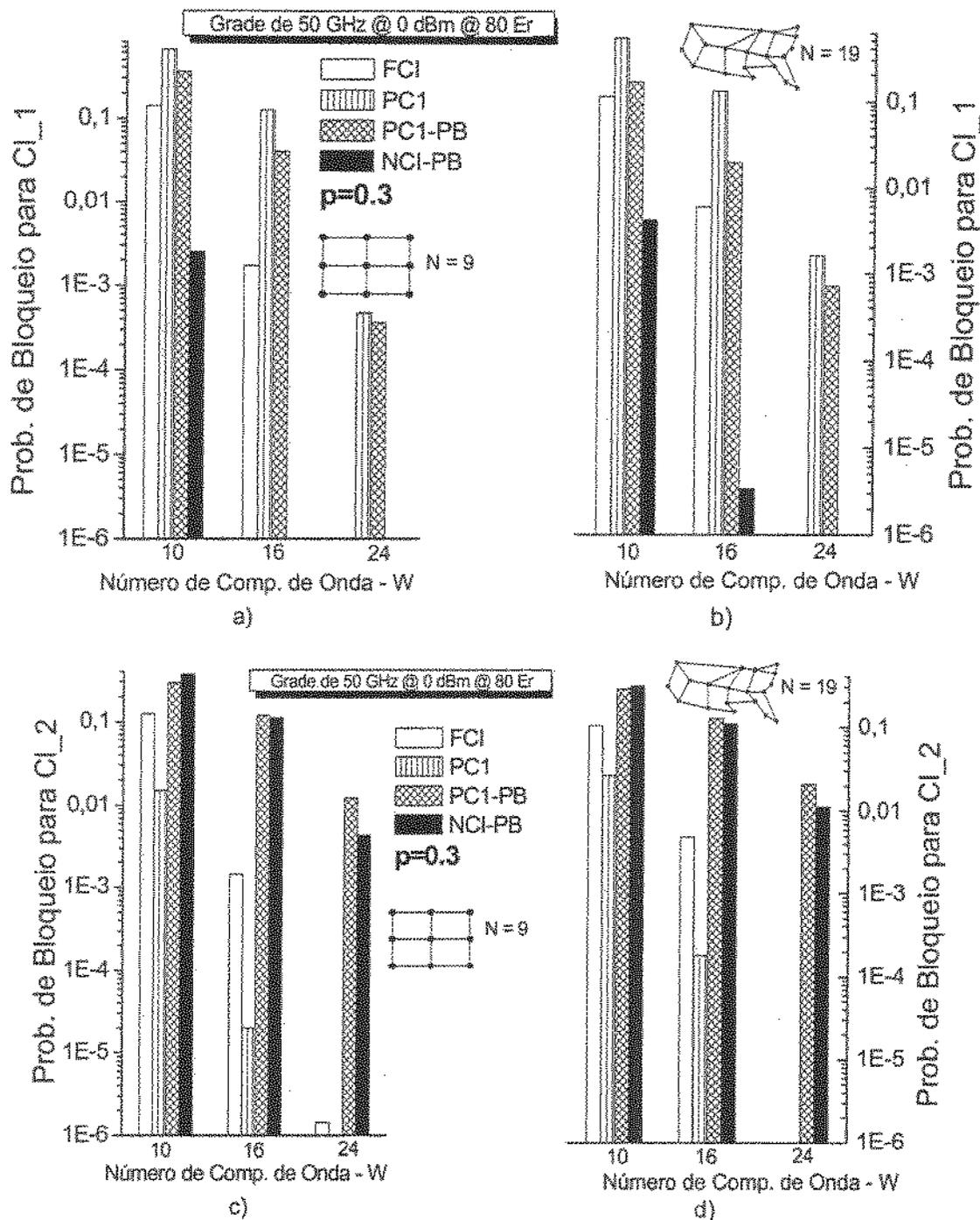


Fig. 5.5: Probabilidade de bloqueio por Classe. a) e b) Pb_{CI1} ; c) e d) Pb_{CI2} . Escala Logarítmica.

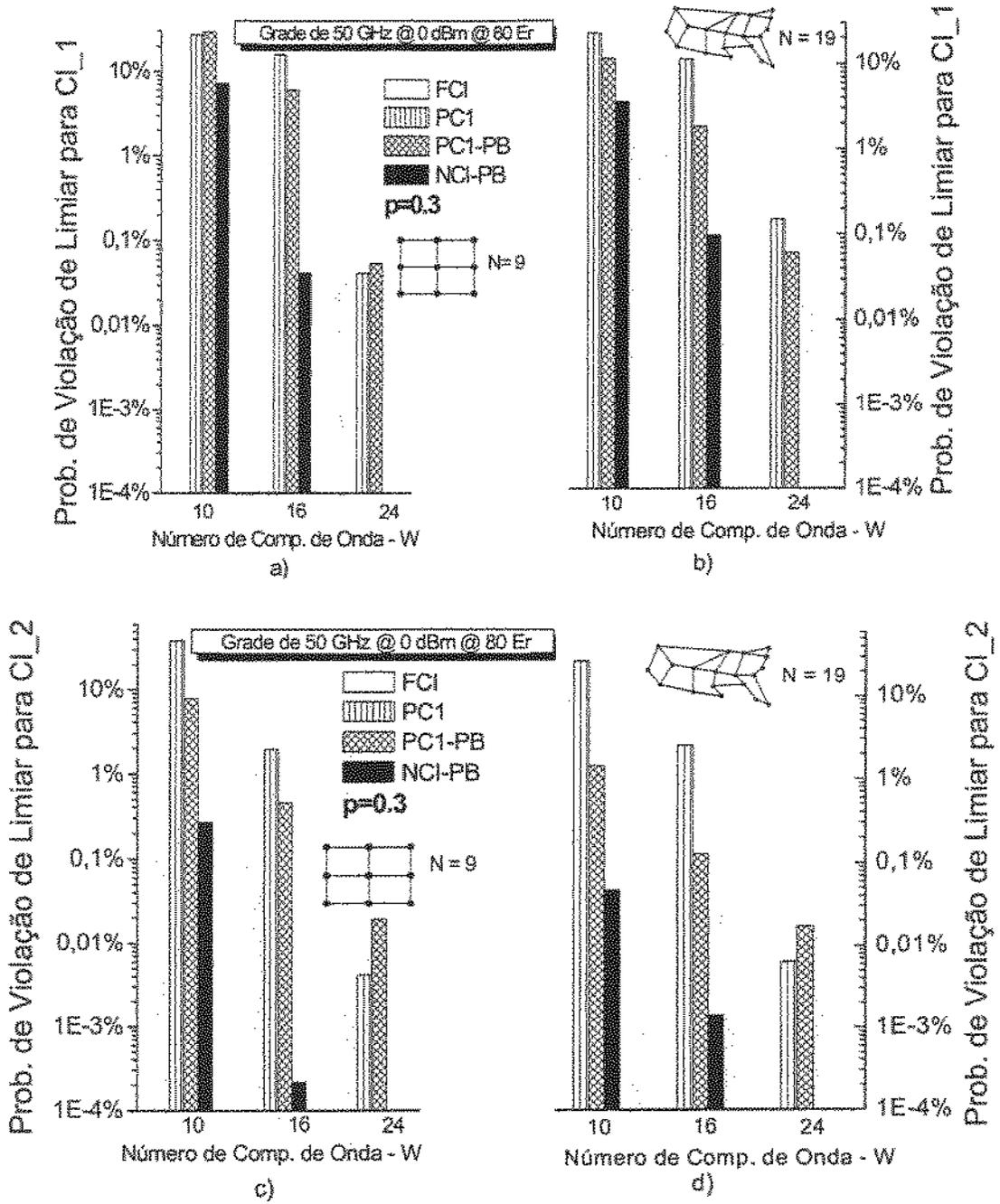


Fig. 5.6: Probabilidade de Violação de Limiar. Escala Logarítmica.

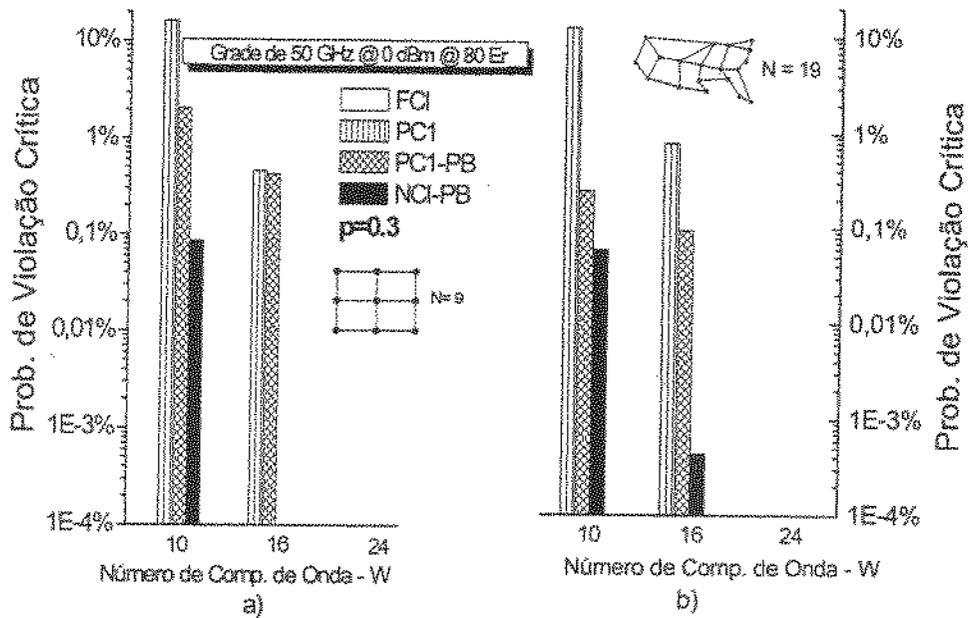


Fig. 5.7: Probabilidade de Violação Crítica. Escala Logarítmica.

Adicionalmente, NCI-PB também apresenta os melhores níveis de TVP para ambas as classes conseguindo TVP < 10% para todos os cenários de rede investigados na Fig. 5.6. Comparando com o desempenho do PC1-PB, existe uma redução de duas ou três ordens de grandeza na probabilidade de se ter a BER, de uma dada conexão CI₁, maior de 10^{-12} quando $W = 16$ em Fig. 5.6a e infringir o OSLA da CI₂ em Fig. 5.6c, respectivamente. No capítulo anterior, foi visto que o *First-Fit* com Listas Otimizadas apresenta melhoras similares de desempenho em um cenário com tráfego com uma única classe de serviço [15]. CVP é drasticamente reduzido para um moderado incremento no número de comprimentos de onda por enlace na rede. Embora a probabilidade de se encontrar degradação crítica de caminhos ópticos permaneça em torno de 0,1% para $W = 10$, CVP figurando abaixo de 0,0001% para $W = 16$ e $W = 24$ são observados na Fig. 5.7 para NCI-PB. É importante destacar que a drástica redução na complexidade do CAC/RWA alcançada pelo NCI-PB, especialmente em redes com muitos comprimentos de onda, é aliada ao fato que TVP e CVP para o NCI-PB poderia, dentre de limites práticos, se igualar ao desempenho do FCI. Nota-se também que além do desempenho superior obtido por NCI-PB com relação ao bloqueio para Classe₁ na Fig. 5.5, vê-se que o FCI é incapaz de favorecer as conexões de alta prioridade conduzindo a probabilidades de bloqueio mais elevadas para a classe *premium* comparada com a *melhor esforço*. Isto faz NCI-PB um forte candidato a se tornar

um eficiente método para simultaneamente implementar um certo grau de isolamento de classes e fornecimento de diferenciação de QoS em redes ópticas transparentes dinâmicas sob a influência de um efeito não-linear. No entanto, a introdução de políticas diferenciadas para a admissão de conexões não deve somente ser analisada do ponto de vista do cliente, mas também do ponto de vista do operador da rede, o qual busca sempre maximizar a capacidade de atendimento de tráfego da infraestrutura instalada.

5.3.2 Ponto de Vista da Vazão da Rede

É esperado que uma redução da vazão total na rede seja observada quando classes de tráfego com e sem privilégios são suportados pela mesma estrutura de rede. Como consequência, as políticas de tarifação devem levar isto em conta cobrando de forma diferenciada os clientes das classes de serviços oferecidas.

Nesta seção é analisada a vazão da rede (T – *Throughput*) da seguinte forma

$$T = 1 - [(Pb_CI1)p + (Pb_CI2)(1-p)] \quad (5.1)$$

em que, p é a proporção de tráfego CI_1 na rede (fixado em $p = 0,3$); Pb_CI1 é a probabilidade de bloqueio para conexões CI_1 e Pb_CI2 é a probabilidade de bloqueio para a classe 2.

Como esperado, os algoritmos que não são baseados em políticas de bloqueio preventivo, i.e. FCI e PC1, apresentam a melhor vazão nas Figs. 5.8 e 5.9. Por exemplo, na Fig. 5.8a FCI admite cerca de 70% dos 120 Er de tráfego para ser servido enquanto pouco mais de 50% da demanda oferecida poderia ser aceita quando a rede opera sob o CAC/RWA PC1-PB. Entretanto, é clara novamente a superioridade do NCI-PB quando comparado com PC1-PB para todos os cenários nas Figs. 5.8 e 5.9. O mesmo aplica-se quando FCI é comparado com PC1. Isto nos leva a concluir que, quando interação não-linear entre os caminhos ópticos é considerada, Isolamento Parcial de Classes não é uma boa estratégia para reduzir a complexidade do CAC/RWA também do ponto de vista do operador da rede.

Deve-se estar atento ao fato que análise de vazão deve estar acompanhada dos resultados de TVP e CVP nas Fig. 5.6 e 5.7, respectivamente. Se métricas mais elaboradas

forem utilizadas para medir o desempenho da rede, algo como o que é chamado de *goodput*, i.e. se não apenas o montante de tráfego aceito (*throughput*) é considerado, mas também a quantidade de violação de QoS; pode-se ter o NCI-PB, e não o PC1, com o segundo melhor desempenho de acordo com o ponto de vista da vazão da rede. Por exemplo, para o algoritmo FCI a vazão e o *goodput* seriam iguais já que nenhuma violação de QoS é admitida pelo CAC, i.e. $TVP = 0$. Mas devido à pobre atuação de PC1 quando o TVP é considerado, parte dos caminhos ópticos estabelecidos poderia ser desativada devido à BER estar acima do acordado pelo OSLA. Fig. 5.6a mostra para $W=10$ aproximadamente 30% de chances de encontrar na rede uma conexão CI_1 com seu OSLA violado enquanto para CI_2, na Fig. 5.6c, este valor é cerca de 40%. Em contraste, NCI-PB sobre as mesmas condições apresenta apenas 7% para CI_1 e 0.3% para CI_2.

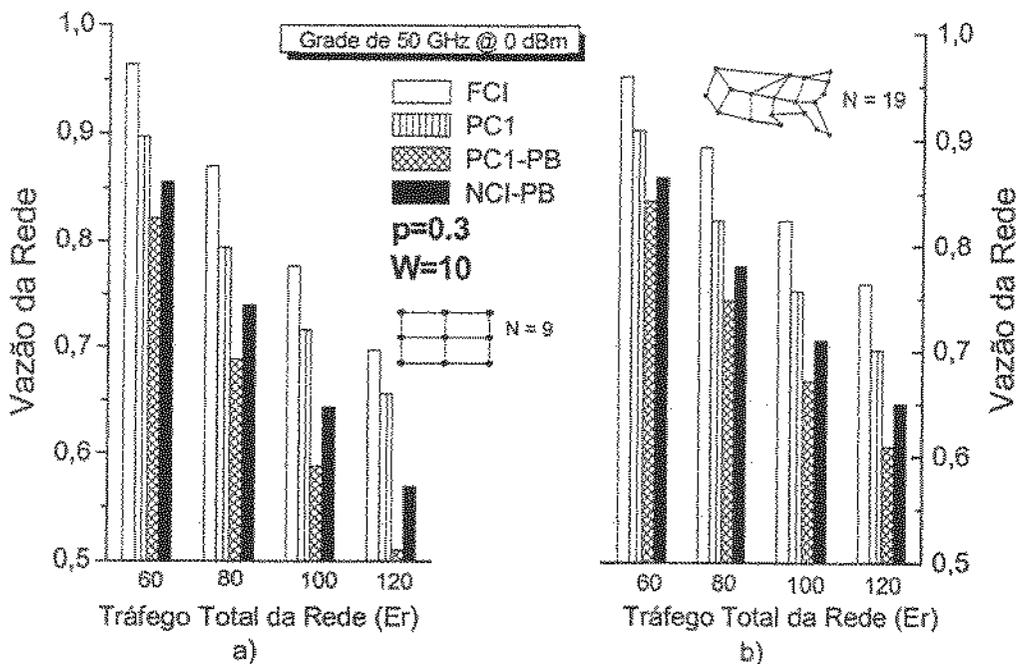
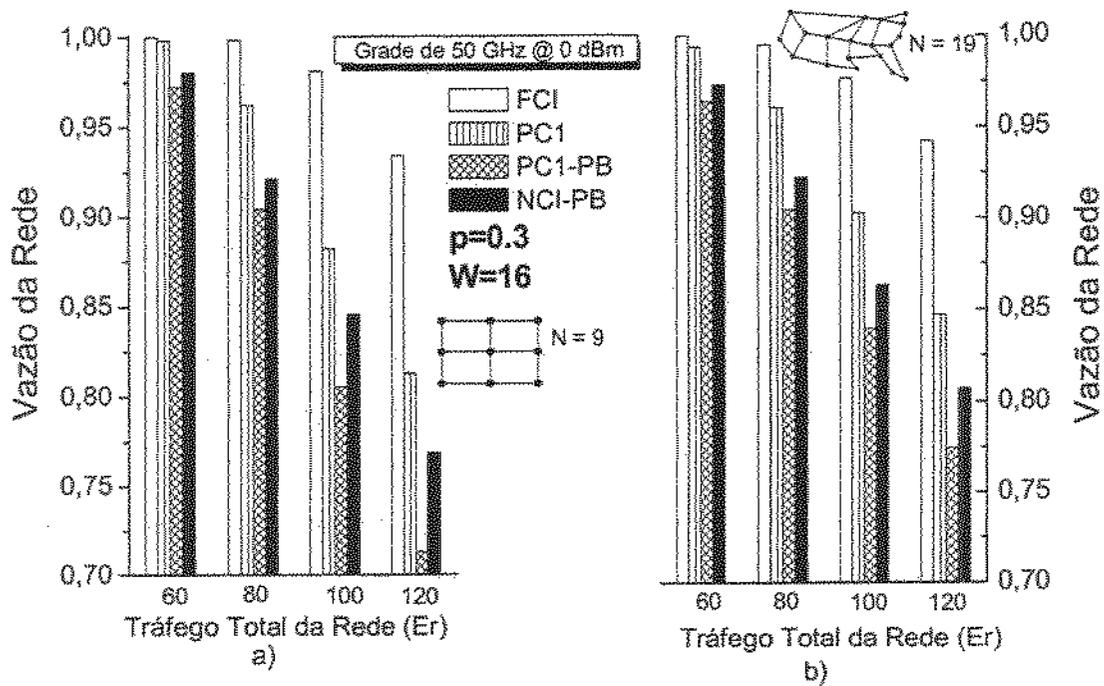


Fig. 5.8: Vazão da Rede @ $W=10$. Escala Linear.

Fig. 5.9: Vazão da Rede @ $W=16$. Escala Linear.

Além disso, note que CVP na Fig. 5.7 com $W=10$ está acima de 10% para o PC1, mas abaixo de 0.1% para o NCI-PB. Para $W=16$ e $W=24$ as tendências são ainda mais favoráveis para o NCI-PB na medida que TVP tende para valores negligenciáveis bem mais rápido do que quando CAC/RWA PC1 é utilizado.

As observações feitas da relação de vazão com TVP e CVP dá apenas uma idéia qualitativa da perda de desempenho por causa da violação de OSLA's. Com o objetivo de avaliar melhor o comportamento dos CAC/RWA's frente às necessidades do projeto de engenharia da rede, é definida na próxima seção uma nova métrica, chamada de Figura de Mérito da Rede.

5.4 FIGURA DE MÉRITO DA REDE: REGIÕES DE VIABILIDADE DE OSLA'S

Nas simulações apresentadas até o momento sempre se utilizou a estratégia de, a partir de uma dada demanda de tráfego na rede, medir o desempenho dos CAC/RWA's de acordo com as diversas métricas, probabilidade de bloqueio por classe, vazão da rede, TVP e CVP. Tal procedimento é indispensável, já que fornece informações importantes sobre o

desempenho de cada algoritmo. Entretanto, isso ainda é insuficiente para determinar qual a melhor estratégia do ponto de vista do operador da rede. Por exemplo, o detalhamento das métricas é fundamental para um diagnóstico mais preciso do funcionamento e comportamento de cada CAC/RWA estudado, bem como para a determinação da relação custo benefício de técnicas específicas empregadas, como o bloqueio preventivo.

Define-se o OSLA de cada classe por meio da fixação dos parâmetros TVP e probabilidade de bloqueio por classe. Em seguida, é medido como variável de saída o máximo tráfego que cada classe pode suportar para que o seu respectivo OSLA não seja desrespeitado. Assim, variando a proporção de tráfego das classes pode-se traçar regiões de viabilidade dos OSLA's. Tais regiões de viabilidade também serão úteis para o operador da rede para determinar os perfis de tarifação de cada classe de serviço.

A Fig. 5.10 traz ilustrações de curvas de figura de mérito da rede, que são determinadas a partir da união de pontos (τ_1, τ_2) , com τ_1 sendo o máximo tráfego Cl_1 em Erlang e obtido de tal forma que os termos do OSLA da Cl_1 ainda sejam preservados. τ_2 representa a mesma quantidade só que aplicada à Classe_2. Os pontos (τ_1, τ_2) de tráfego Cl_1 e Cl_2 que se encontram sobre a curva de figura de mérito ou abaixo dela são os pontos que constituem a região de viabilidade dos OSLA's Cl_1 e Cl_2. Ou seja, são os valores de tráfego para os quais a rede consegue atender ao contrato de serviço firmado com os seus clientes. A demanda máxima que pode ser atendida pela rede quando apenas uma das classes está presente na rede é τ_{2MAX} , τ_{1MAX} , respectivamente, quando $\tau_1 \rightarrow 0$, $\tau_2 \rightarrow 0$. É intuitivo esperar que a região de viabilidade dos OSLA's apresente características distintas em função da capacidade de diferenciação e isolamento de tráfego entre as classes em função do algoritmo de CAC/RWA utilizado. Para fins de comparação, considere o caso em que há duas classes na rede, porém não há diferenciação de requisitos entre elas e, portanto, nenhuma política de isolamento é implementada. Qualquer variação de tráfego Cl_2 implica em variação da capacidade de atendimento de tráfego Cl_1 de igual valor, mas de sinal contrário. Tal comportamento apareceria na figura de mérito da rede mostrada na Fig. 5.10 como uma reta (A) com inclinação de 45° , i.e. $\tau_{2MAX} = \tau_{1MAX}$ e, portanto, $d\tau_1/d\tau_2 = -1$, e serve de referência para a análise de desempenho dos algoritmos propostos neste capítulo.

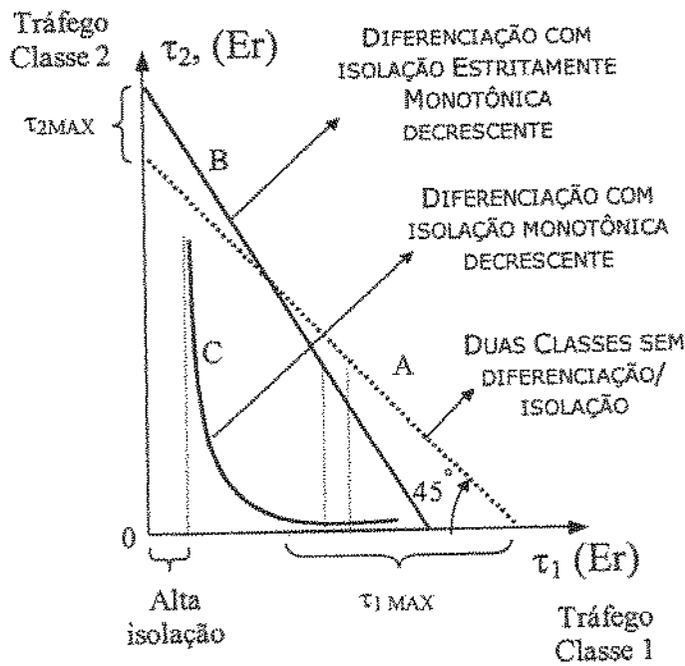


Fig. 5.10: Ilustração para a Figura de Mérito.

Com a implementação de diferenciação das classes, os valores de τ_{2MAX} e τ_{1MAX} serão alterados na proporção inversa ao nível de exigência de uma classe. A figura de mérito da rede será basicamente uma curva interligando τ_{2MAX} e τ_{1MAX} delimitando a região de viabilidade no atendimento às demandas das redes clientes. A isolação ideal entre classes ocorre se a classe com maior prioridade não for atingida pelas demandas por recursos das outras classes que lhe são inferiores em nível de prioridade, i.e. no caso estudado quando $d\tau_1/d\tau_2 \rightarrow 0$. Uma isolação relativa, e mais realista do ponto de vista de implementação, é atingida à medida que a taxa de influência da Classe_2 sobre a Classe_1 é reduzida. Note na Fig. 5.10 que $-1 < d\tau_1/d\tau_2 < 0$ para a curva B (em que as duas classe têm exigências diferentes), resultando num dado nível isolação tão melhor quanto mais próximo de zero for $d\tau_1/d\tau_2$.

Todavia, caso a função de isolação ($\tau_2=f(\tau_1)$) seja monotônica e estritamente decrescente, como a reta B na qual se $\tau_{1a} < \tau_{1b} \Rightarrow f(\tau_{1a}) > f(\tau_{1b})$, o nível máximo de atendimento de redes clientes Classe_1 ($\tau_{1MAX}=f^{-1}(\tau_2=0)$) pode ser bastante reduzido caso um alto nível de isolação seja necessário. Uma saída para conjugar um alto nível de isolação, pelo menos para um dado volume de tráfego CI_1, seria uma figura de mérito com uma característica monotônica decrescente, como a curva C na qual se $\tau_{1a} < \tau_{1b} \Rightarrow f(\tau_{1a}) \geq$

(τ_{1b}). Note ainda que com a figura de mérito como a curva C tem-se ainda um atendimento mínimo à Classe_2 garantido mesmo sob alta demanda da classe prioritária. Deve ser lembrado o fato que no caso estudado nesta Tese a Classe_2 pode afetar a Classe_1 em termos de disponibilidade de recursos e em ruído. Portanto dificilmente esta preservação de atendimento mínimo será mantida ao tráfego de baixa prioridade.

A figura de mérito da rede permite ainda estipular a relação de valores entre as tarifas cobradas para transporte de tráfegos Cl_1 e Cl_2 em função do uso de recursos da rede. Por exemplo, para a curva B poder-se-ia usar $(\tau_{2MAX}/\tau_{1MAX} - 1) \times 100\%$ como o cálculo do percentual que deve ser cobrado a mais dos clientes *premium* via um critério técnico de uso da rede. É importante destacar que a tarifação leva em consideração muitos outros aspectos como: estratégia da empresa para a conquista de clientes, *marketing*, situação de ocupação da infraestrutura e finalmente oferta e procura, todavia um critério técnico é um balizador indispensável para qualquer outra política que seja adotada.

5.4.1. Resultados Numéricos

As simulações apresentadas nesta subseção foram feitas para as redes com $N = 19$ e $N = 9$ nós operando com $W = 10, 16$ e 24 comprimentos de onda sob a grade do ITU de 50 GHz com 0 dBm de potência por canal.

Considera-se que os OSLA's de cada classe de serviço são:

- i) OSLA_C11
 - BER_C11 = 10^{-12} ;
 - TVP_C11 = 1%;
 - Pb_C11 = 0,01.
- ii) OSLA_C12
 - BER_C12 = 10^{-9} ;
 - TVP_C12 = 5%;
 - Pb_C12 = 0,1.

A Fig. 5.11 mostra as curvas de figura de mérito da rede. Da mesma forma que na Seção 5.2, CAC/RWA FCI apresenta em geral o melhor desempenho dentre os algoritmos. Além disso, como foi apontado de forma qualitativa, CAC/RWA NCI-PB aparece como a

segunda melhor opção para todos os cenários investigados; enquanto que PC1 se mostra pouco eficiente para atender aos OSLA's dos clientes Cl_1 e Cl_2. Isto reafirma a conclusão retirada da Seção 5.2 de que isolamento parcial entre as classes de serviço não é uma boa estratégia para diferenciação de QoS óptico em redes limitadas por um efeito não-linear de FWM.

Percebe-se também nas curvas da Fig. 5.11 que o benefício do isolamento de classe proporcionado pelo algoritmo FCI é ainda mais evidente quando o montante de tráfego Cl_1 na rede é pequeno. Nesta região da curva, FCI apresenta comportamento de diferenciação com isolamento monotônica e estritamente decrescente como o mostrado na Fig. 5.10, mas com $d\tau_1/d\tau_2 \rightarrow 0$. Isto significa que fortes variações de tráfego da Cl_2 não são sentidas pela Cl_1 quando a rede está operando com baixo tráfego Cl_1. Por exemplo, na Fig. 5.11d, quando o tráfego Cl_2 passa de 80 para 120 Er, significando um aumento de 40 Er, o tráfego Cl_1 tem uma diminuição de apenas 5 Er, passando de 10 para 5 Er o seu tráfego na rede.

Por outro lado, nas regiões das curvas em que o tráfego Cl_1 é comparável com o da Cl_2, tanto FCI quanto os algoritmos PC1, PC1-PB e NCI-PB apresentam um perfil de diferenciação com isolamento monotônica estritamente decrescente. Isso significa que $-1 < d\tau_1/d\tau_2 < 0$ e, em outras palavras, variações de tráfego da Cl_2 são refletidas em variações menores na Classe 1, mas com sinais trocados. Entretanto, os valores absolutos das variações de tráfego Cl_2 e Cl_1 não são tão diferentes quanto os valores explicados no parágrafo anterior. Por exemplo, analisando novamente o algoritmo FCI na Fig. 5.11d, quando o tráfego Cl_2 passa de 40 para 80 Er – implicando em um aumento de 40 Er – o reflexo sobre a Cl_1 será uma diminuição de cerca de 35 Er. Isto representa variações próximas, mas ainda não iguais em valores absolutos, o que significa que a inclinação da figura de mérito para o FCI nessa região é diferente de 45°. O mesmo acontece nos outros cenários investigados e apresentados na Fig. 5.11. Nessa região das curvas de figura de mérito, o CAC/RWA NCI-PB apresenta comportamento similar ao FCI, pois quando o tráfego Cl_2 sofre o mesmo aumento de 40 Er, o reflexo na Cl_1 é uma diminuição de cerca de 35 Er.

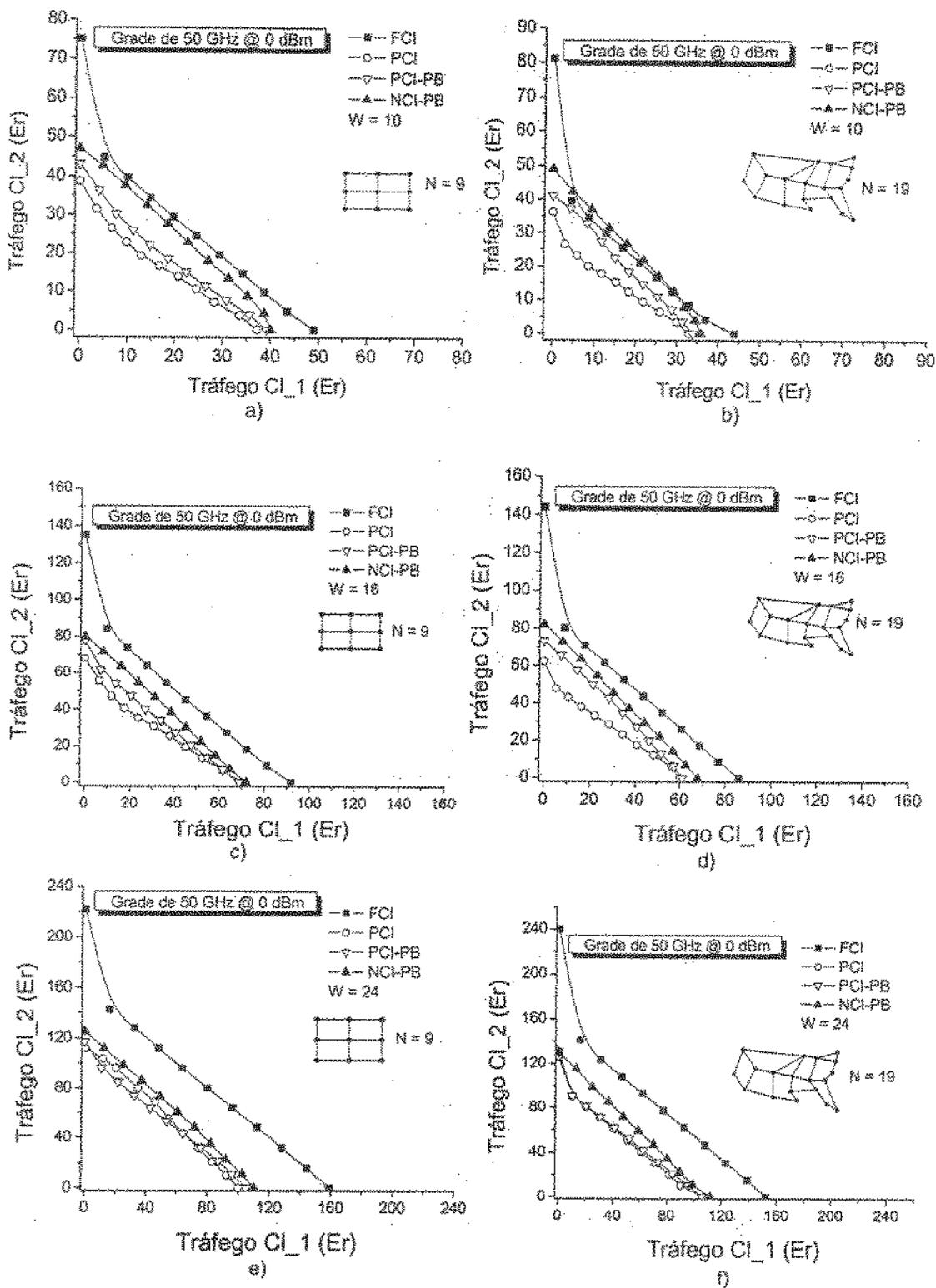


Fig 5.11: Figura de Mérito. Escala Linear.

Uma discussão interessante surge se é analisado o desempenho dos CAC/RWA's de acordo com a demanda máxima que pode ser atendida pela rede quando apenas uma das classes está presente na rede. Por exemplo, para o mesmo caso analisado anteriormente, i.e. a rede de 19 nós operando com 16 comprimentos de onda sob a grade de 50 GHz a 0 dBm de potência (Fig. 5.11d); para o NCI-PB, quando $\tau_1 \rightarrow 0$, o valor de τ_{2MAX} é aproximadamente 82 Er, enquanto que o valor de τ_{1MAX} , obtido quando $\tau_2 \rightarrow 0$, é cerca de 68 Er. Para o FCI a figura de mérito é aproximada por duas retas e é feita a análise em duas regiões: uma com alta isolamento de tráfego e outra com baixa isolamento; como mostrada na Fig. 5.12, a qual é a mesma figura de mérito da Fig. 5.11d. Na região com alta isolamento, se a reta ligando os pontos que delimitam esta região é prolongada até tocar o eixo x, encontra-se que $\tau_{2MAX} \approx 144$ e $\tau_{1MAX} \approx 24$ Er. Já na região com baixa isolamento de tráfego, prolongando a reta até tocar o eixo y obtemos $\tau_{2MAX} \approx 98$ e $\tau_{1MAX} \approx 86$ Er. Como esperado, tanto para o NCI-PB quanto para o FCI, o valor de τ_{2MAX} é maior do que τ_{1MAX} já que o OSLA da CI_1 é bem mais exigente que o da CI_2.

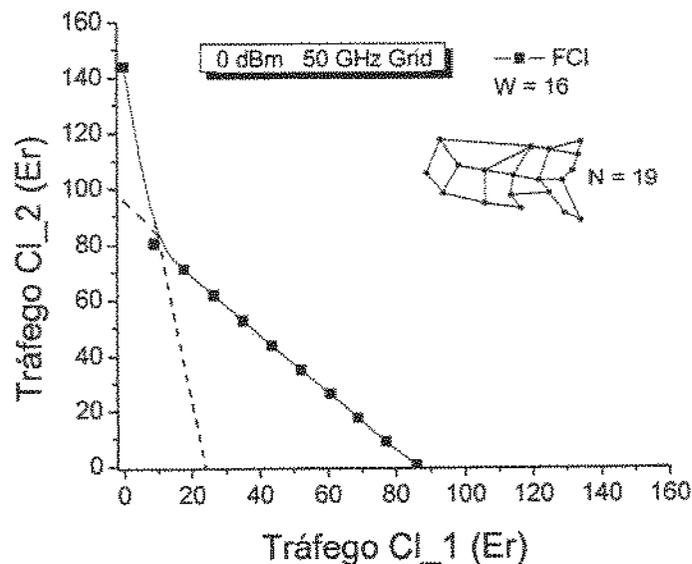


Fig 5.12: Figura de Mérito CAC/RWA FCI: análise da relação de custo entre Er de cada classe de serviço.

Contudo, tal diferença de tráfego máximo pode ser refletida no preço cobrado por Er de cada classe de serviço, se o critério técnico $(\tau_{2MAX}/\tau_{1MAX} - 1) \times 100\%$ for utilizado para estimar o quanto o tráfego em Er da Classe_1 deve ser mais caro do que o da

Classe_2. No exemplo que estamos analisando, para o NCI-PB o valor de $(\tau_{2MAX}/\tau_{1MAX} - 1) \times 100\%$ é cerca de 21%. Para o FCI, na região com alta isolação de tráfego, o fator de relação entre custos das classes é da ordem de 500%, enquanto que este número figura em torno de 14% para a região de baixa isolação de tráfego. Note que tanto para o algoritmo FCI quanto para o NCI-PB, trabalhar na região com baixa isolação de tráfego implica que, se o critério técnico proposto for empregado para estimar uma relação entre as tarifas, o Er para a Cl_1 fica apenas em torno de 20% mais caro do que o Er da Cl_2 (para o cenário de rede da Fig. 5.11d). Entretanto, a implementação de alta isolação de tráfego sugere que o preço cobrado por Er Cl_1 deve ser bem maior do que o cobrado por Er Cl_2 . No exemplo sob análise, o Er Cl_1 deve ser 5 vezes mais caro do que o Er Cl_2 .

Neste ponto é conveniente destacar que o CAC/RWA FCI apresenta os melhores resultados quando comparado com os outros CAC/RWA's. Entretanto é importante lembrar que o nível de complexidade do processo de admissão de conexões empregado pelo FCI é maior do que o dos demais algoritmos. Como FCI utiliza Busca Completa de ruído para as duas classes, sua complexidade é $\sim O(HRW^4)$ no tocante à etapa de cálculo do ruído FWM, o que pode inviabilizar o seu uso quando o número de comprimentos de onda cresce. O extremo oposto é o algoritmo NCI-PB que, por utilizar as Listas Otimizadas de comprimento de onda, leva à complexidade da etapa de cálculo de ruído FWM para zero.

5.5 SUMÁRIO

CAC/RWA's com garantia de QoS Óptico para duas classes de serviço em uma rede óptica dinâmica transparente limitada por FWM foram analisados neste capítulo. As estratégias que operam sob Isolamento Parcial de Classes se mostraram ineficientes tanto do ponto de vista dos clientes quanto do operador da rede. Por outro lado, os CAC/RWA's FCI e NCI-PB apresentaram os melhores resultados. Embora a análise da figura de mérito da rede também tenha apontado o FCI com melhor desempenho, a sua alta complexidade é um limitante para sua extensibilidade (*scalability*). Além disso, percebe-se que o FCI não respeita a recomendação de providenciar bloqueio menor para a classe *premium*. Portanto, NCI-PB parece ser a melhor opção como uma alternativa realista, não somente por oferece baixa complexidade, mas também por favorecer a descentralização do gerenciamento da rede.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 SUMÁRIO DA TESE

Esta Tese apresentou um estudo para provimento de QoS óptico em redes ópticas. Trabalhou-se em um cenário de rede com gerenciamento centralizado de conexões, com tráfego dinâmico com geração de chamadas poissoniana e duração exponencial. O algoritmo de roteamento usa sempre um dos menores caminhos para estabelecer cada caminho óptico. Considerou-se também um cenário de rede transparente sem conversão de comprimento de onda, na qual o principal interesse foi o desenvolvimento de mecanismos para provisionamento e diferenciação de QoS óptico em face ao efeito não-linear de FWM. Para isso, foi necessário criar novas métricas e desenvolver vários procedimentos de admissão de conexões na rede para inclusão de tal efeito de forma integrada com o algoritmo RWA. Com isso, pela primeira vez na literatura, o impacto do FWM sobre o desempenho de uma rede óptica dinâmica – utilizando tanto mecanismos de Busca Parcial quanto de Busca Completa e algumas variantes e num cenário com e sem diferenciação de serviço – foi avaliado.

No cenário com uma única classe de serviço, a análise de procedimentos que aplicam Busca Parcial e Busca Completa de ruído FWM na rede, além de algoritmos cegos para FWM, possibilitou concluir que:

- Degradações globais do QoS óptico podem acontecer se um algoritmo FWM-Cego é utilizado no processo de admissão de conexões na rede. Como consequência a utilização de CAC/RWA's que levem em conta efeitos da camada física é necessária;
- O CAC/RWA Egoísta se mostrou competente em situações onde a eficiência do efeito de FWM não é alta, mas ele é capaz de fornecer apenas QoS óptico estatístico;
- O CAC/RWA Ético fornece QoS óptico determinístico, mas sob o custo de alta complexidade, centralização do gerenciamento da rede e impacto negativo sobre a probabilidade de bloqueio, o que compromete o desempenho da rede. Portanto a busca de CAC/RWA's mais simples é uma necessidade;
- A análise comparativa entre os desempenhos dos CAC/RWA's Ético e Egoísta mostrou ser possível a implementação de um algoritmo intermediário, chamado de CAC/RWA Relaxado, qual utilize Busca Completa e Busca Parcial dependendo de parâmetros das requisições, como tamanho e potência, e parâmetros sistêmicos, como grade de comprimentos de onda;
- A análise de desempenho do algoritmo Relaxado mostrou que deve existir um compromisso entre o custo computacional do CAC/RWA e o nível de preservação do QoS desejado. Relaxado ainda possui complexidade relativamente alta, figurando entre $\sim O(HRW^4)$ e $\sim O(HRW^3)$;
- Neste sentido, CAC/RWA Relaxado parece ser a melhor opção para redes pequenas e com número reduzido de comprimentos de onda. Já que, embora mais simples do que o Ético e mais eficiente em prover a rede de QoS óptico do que o Egoísta, o algoritmo Relaxado ainda possui baixa extensibilidade (*scalability*) e implementa gerenciamento de rede centralizado;
- O uso de Listas Otimizadas de comprimentos de onda para alimentar o algoritmo *First-Fit* mostrou-se ser a opção mais eficiente, pois possui vantagens como: baixa complexidade, possibilita o uso de gerenciamento distribuído na rede, extensibilidade (*scalability*) e apresentou bons níveis de probabilidade de bloqueio, TVP e CVP quando comparadas com algoritmos que implementam cálculo *on-line* de ruído FWM;

- Portanto, *First-Fit* com Listas Otimizadas pode ser uma alternativa interessante para resolver a complexidade e o gargalo de centralização do CAC/RWA, sem, no entanto, implicar em perdas com relação ao QoS óptico da rede e são as candidatas mais indicadas para serem aplicadas no cenário com diferenciação de QoS.

No cenário com diferenciação de QoS foram implementados quatro algoritmos que diferem principalmente com relação ao nível de isolamento entre as classes de serviço. A análise de desempenho destes algoritmos – desde a versão mais liberal até a versão em que é aplicado isolamento total entre as classes, passando por versões intermediárias – mostrou que:

- As estratégias que operam sob Isolamento Parcial de Classes se mostraram ineficientes tanto do ponto de vista dos clientes quanto do operador da rede. Por outro lado, os CAC/RWA's FCI e NCI-PB apresentaram os melhores resultados. Isto sugere que, num cenário com diferenciação de QoS, algum tipo de isolamento entre classes deve ser empregado;
- As listas otimizadas de comprimento de onda também se mostraram eficientes no cenário com diferenciação de QoS, pois possibilitou a implementação de um algoritmo com baixa complexidade e que apresentou um bom desempenho;
- A figura de mérito proposta nesta Tese se mostrou uma importante ferramenta de análise de desempenho da rede, pois permite sintetizar o comportamento da rede ao integrar os conceitos de interferência entre as classes (do ponto de vista de variação de tráfego e geração de ruído de uma classe de serviço sobre a outra). Além disso, pode servir como critério técnico para a determinação da relação entre as tarifas das classes de serviço;
- Os resultados obtidos com as simulações numéricas das figuras de mérito da rede confirmaram as Listas Otimizadas, através do CAC/RWA NCI-PB, como uma boa opção para também ser utilizada em um cenário com diferenciação de QoS.

Finalmente, de um modo geral, os resultados obtidos destacam a interdependência de três grandezas: nível de QoS experimentado pelas redes clientes, volume total de tráfego atendido pela rede óptica e complexidade dos algoritmos; para que os objetivos do operador da rede óptica e o atendimento às necessidades das redes clientes sejam alcançados simultaneamente.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aponta-se os seguintes itens como prováveis trabalhos futuros:

- A partir da experiência adquirida com o desenvolvimento desta Tese, iniciar a busca por novos CAC/RWA's para provisionamento de QoS que levem em conta múltiplos efeitos da camada física concomitantemente. Este estudo pode iniciar tratando outros efeitos não-lineares, como o XPM (em conjunto com o SPM), que tenham forte dependência com o comprimento de onda, ou seja, que influam diretamente no algoritmo de alocação de comprimento de onda;
- Abordagem dos efeitos inerentes à escolha de uma rota na rede, como acúmulo de ASE, saturação dos amplificadores e PMD;
- A ineficiência das estratégias que operam sob Isolamento Parcial de Classes para o provimento de diferenciação de QoS aponta para a investigação de um cenário onde ocorra a segregação física total entre as classes de serviço. Isto sugere o estudo de algoritmos que implementem diferenciação de QoS óptico em uma rede óptica dinâmica multifibra. Tal estudo pode também contemplar a análise de múltiplos efeitos da camada física em uma etapa posterior;
- Introduzir o conceito de análise econômica nas figuras de mérito da rede, por meio do estudo de perfis de tarifação por Er para as classes de serviço objetivando a determinação de pontos de máxima receita e, conseqüentemente, pontos ótimos de operação da rede segundo o ponto de vista econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, *Optical Networks: A practical Perspective*, 2nd Edition, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, California, U.S.A., 2002.
- [2] H. M. Foisel, "Optical Internetworking Forum: World Interoperability Tests and Demonstrations", in *Proc. IEEE ECOC'04*, Sept 2004.
- [3] F. Cugini, N. Andriolli, L. Valcarenghi, and P. Castoldi, "A Novel Signaling Approach to Encompass Physical Impairments in GMPLS Networks", in *Proc. IEEE Globecom'04*, Dec 2004.
- [4] R. Braden et al., "Integrated Services in the Internet Architecture: An Overview", *RFC 1633*, Jun 1994.
- [5] S. Blake et al., "An Architecture for differentiated Services", *RFC 2475*, Dec 1998.
- [6] C. B. Ahmed, N. Boudriga, and M. S. Obaidat, "Supporting Adaptive QoS for Multiple Classes of Service in DWDM Networks", in *Proc. IEEE Int. Conf. On Parallel Processing Workshops 2001*, Sept 2001.
- [7] A. Kaheel, T. Khattab, A. Mohamed, and H. Alnuweiri, "Quality-of-Service Mechanisms in IP-over-WDM Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, pp. 38-43, Dec 2002.
- [8] N. Giroux, S. Ganti, "Quality of Service in ATM networks: state-of-the-art traffic management", New Jersey, Prentice-Hall, 1999.
- [9] P.P. Mitra and J. B. Stark, "Nonlinear Limits to the Information Capacity of Optical Fiber Communication", *Nature*, Vol. 411, pp. 1027-1030, Jun 28, 2001.
- [10] J. M. Kahn and K.-P. Ho, "A Bottleneck for Optical Fiber", *Nature*, Vol. 411, pp. 1007-1010, Jun 28, 2001.
- [11] J. M. Kahn and K.-P. Ho, "Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for WDM Systems", *IEEE Trans. of Selec. Top. in Quantum Electronics*, Vol. 10, pp. 259-272, Mar/Apr 2004.
- [12] A. Fredette and J. P. Lang, "Link Management Protocol (LMP) for Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) Optical Line Systems", *Internet draft (work in progress)*, draft-ietf-ccamp-lmp-wdm-03.txt, Dec 2003.
- [13] ITU-T Rec. G.806, "Characteristics of Transport Equipment - Description Methodology and Generic Functionality", Oct 2000.
- [14] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr., and H. Waldman, "Preserving Global Optical QoS in FWM Impaired Dynamic Networks", *IEE Electronics Letters*, Vol. 40, pp. 191-192, Feb 2004.
- [15] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr., and H. Waldman, "Meeting Optical QoS in Dynamic Networks with Reduced Complexity", in *Proc. IEEE ECOC'04*, Sept 2004.
- [16] D. C. Kilper, R. Bach, D. J. Blumenthal, D. Einstein, T. Landolsi, L. Ostar, M. Preiss, and A. E. Willner, "Optical Performance Monitoring", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 22, pp. 294-304, Jan 2004.

- [17] J. Strand and A. Chiu, "Impairments and other Constraints on Optical Layer Routing", *internet draft (work in progress)*, draft-ietf-ipoimpairments-05.txt, May 2003.
- [18] Y. Mei, C. Qiao, "Distributed Control Schemes for Dynamic Lightpath Establishment in WDM Optical Networks", in *Proc. Optical Network Workshop*, Richardson, Tx, Jan 1999.
- [19] Y. Mei, C. Qiao, "Efficient distributed control protocols for WDM optical networks", in *Proc. Int'l Conference on computer Communication and Networks*, Sept 1997.
- [20] Lu Shen, B. Ramamurthy, "Centralized vs. distributed connection management schemes under different traffic patterns in wavelength-convertible optical networks", in *Proc. IEEE ICC 2002*, Jun 2002.
- [21] I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, "Lightpath communication: na approach to high bandwidth optical WAN's", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 40, 1992.
- [22] R. Ramaswami, K.N Sivarajan, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, Oct 1995.
- [23] N. Nagatsu, Y. Hamazumi, K. Sato, "Optical path accommodation designs applicable to large scale networks", *IEEE/ACM Transactions on Communications*, Vol. E78-B, 1995.
- [24] S. Baroni and P. Bayvel, "Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 15, 1997.
- [25] Optical Internetworking Forum, www.oiforum.com
- [26] S. Subramaniam, M. Azizoglu, A. K. Somani, "All-optical networks with sparse wavalength conversion", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 4, 1996.
- [27] I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, "Lightpath communication: na approach to high bandwidth optical WAN's", *IEEE/ACM Transactions on Communications*, Vol. 40, 1992.
- [28] M. Kovacevic, A. Acampora, "Benefits of wavelength division optical networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications/J. Lightwave Technology*, Vol. 14, 1996.
- [29] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive wavelength routing in all-optical networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 6, 1998.
- [30] S. Subramaniam, R. Barry, "Wavelength assigment in fixed routing WDM networks", in *Proc. IEEE ICC'97*, 1997.
- [31] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks", *SPIE Optical Network Magazine*, Vol. 1, pp. 47-60, Dec 2000.
- [32] R.K. Ahuja, T.L. Magnanti, and J.B. Orlin. *Network Flows - Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice-Hall, 1993.
- [33] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, and H. Walman, "Differentiated Optical QoS under a Low Complexity FWM-aware Wavelength Assignment Algorithm", in *Proc. IEEE ONDM'05*, Feb 2005.
- [34] D. Levandovsky, "Wavelength routing based on physical impairments", in *Proc. IEEE OFC'01*, Mar 2001.

- [35] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J. P. Heritage, and B. Mukherjee, "Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 17, pp.1713-1723, Oct 1999.
- [36] M. Ali, L. Tancevski, "Impact of Polarization-Mode Dispersion on the Design of Wavelength-Routed Networks", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, pp. 720-722, May 2002.
- [37] M.A.C. Lima, A.F.R. Araújo, A.C César, "Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes Ópticas WDM Utilizando Algoritmo Genético", in *Proc. MOMAG'04*, Aug 2004.
- [38] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, E. A. J. Arantes, S. C. Oliveira, L. D. Coelho, J. P. G. Oliveira, R. G. Dante, E. Fontana, F. D. Nunes, "Novel Routing Algorithm for Transparent Optical Networks Based on Noise Figure and Amplifier", in *Proc. IEEE IMOC2003*, Sept 2003.
- [39] T. Deng, S. Subramaniam, "Source Power Management in Transparent Wavelength-Routed Mesh Networks", in *Proc. IEEE ICC'04*, Jun 2004.
- [40] O. O. Gerstel, R. Ramaswami, "Optical Layer Survivability – An Implementation Perspective", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, pp: 1885 – 1899, Oct 2000.
- [41] K. I. Sato, S. Okamoto, H. Hadama, "Network performance and integrity enhancement with optical path layer technologies", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 12, pp: 159 – 170, Jan 2004.
- [42] J. Zhang and B. Murkherjee, "A Review of Fault Management in WDM Mesh Networks: Basic Concepts and Research Challenges", *IEEE Network*, Vol. , pp: 41 – 48, Mar/Apr 2004.
- [43] A. Jukan and H. R. Van As, "Service-Specific Wavelength Allocation in QoS-Routed Optical Networks", in *Proc. GlobeCom '98*, Nov.1998.
- [44] N. Golmie, T. D. Ndousse, and D. H. Su, "A Differentiated Optical Services Model for WDM Networks", *IEEE Comm. Magazine*, vol. , pp: 68 – 73, Feb 2000.
- [45] C. B. Ahmed, N. Boudriga, and M. S. Obaidat, "Supporting Adaptive QoS for Multiple Classes of Service in DWDM Networks", in *Proc. IEEE Int. Conf. On Parallel Processing Workshops*, Sept 2001.
- [46] C.V. Saradhi, M. Gurusamy, and Luying Zhou, "Differentiated QoS for Survivable WDM Optical Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 42, pp. S8-S14, May 2004.
- [47] E. Salvadori and R. Battiti, "Quality of Service in IP over WDM: Considering both Service Differentiation and Transmission Quality", in *Proc. IEEE ICC'04*, Jun 2004.
- [48] M. Ali, V. Leboucher, and D. Penninckx, "Intelligent lightpath selection scheme," in *Proc. ECOC'02*, Sept 2002.
- [49] S. Herbst, H. Lücken, C. Fürst, S. Merialdo, J. Elbers, C. Glingener, "Routing Criterion for XPM-Limited Transmission in Transparent Optical Networks", in *Proc. ECOC'03*, Sept 2003.
- [50] ITU-T-Rec. G.694.1, "Spectral Grids for WDM Application: DWDM Frequency Grid", Jun 2002.
- [51] S. Song, C. Allen, K. Demarest, L. Pelz, X. Fang, and Y. Pua, "Experimental Study of Four-Wave Mixing in Non-zero Dispersion Fiber", in *Proc. LEOS '97*, 1997.

- [52] B. Xu and M. Brandt-Pearce, "Comparison of FWM- and XPM-induced crosstalk using the Volterra series transfer function method", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 21, pp. 40-53, Jan 2003.
- [53] H. G. Perros and K. M. Elsayed, "Call Admission Control Schemes: a Review", *IEEE Communications Magazine*, vol. , pp. 82 – 91, Nov 1996.
- [54] E. J. Aloia, "Sistematização Crítica das Tendências de Padronização de Arquiteturas e Protocolos em Redes Ópticas", *Dissertação de Mestrado*, USP/São Carlos, 2003.
- [55] R. C. Almeida Jr., "Alocação de Rota e Comprimento de Onda em Anéis WDM", *Dissertação de Mestrado*, FEEC/UNICAMP, 2001.
- [56] T. Deng, S. Subramaniam and J. Xu, "Crosstalk-Aware Wavelength Assignment in Dynamic Wavelength-Routed Optical Networks", in *Proc. IEEE BroadNets'04*, 2004.
- [57] F. A. Flood, "L-band Erbium-doped Fiber Amplifiers", in *Proc. OFC'00*, Mar 2000.
- [58] L. Helczynski, A. Berntson, "Comparison of EDFA and Bidirectionally Pumped Raman Amplifier in a 40-Gb/s RZ Transmission System", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13, pp. 669 – 671, Jul 2001.
- [59] Y. Zhu, C. R. S. Fludger, W. S. Lee, P. Lobb, T. Schilhabel, A. Hadjifotiou, "Experimental Comparison of all-Raman and Raman/EDFA Hybrid Amplifications using 40 Gbit/s-based Transmissions over 400 km TW-RS Fibre", *IEE Electronics Letters*, Vol. 38, pp. 893 – 895, Aug 2002.
- [60] A. Carena, V. Curri, R. Gaudino, P. Poggiolini, and S. Benedetto, "System Impact of Fiber Parametric Gain in Long-haul Optical Links", in *Proc. IEEE ICC'98*, 1998.
- [61] E. Desurvire, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers", John Wiley Professio, 2002.
- [62] R. Olshansky, "Noise figure for erbium-doped optical fibre amplifiers", *IEE Electronics Letters*, Vol. 24, pp. 1363 – 1365, Oct 1988.
- [63] R. I. Laming, D. N. Payne, "Noise characteristics of erbium-doped fiber amplifier pumped at 980 nm", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 2, pp. 418 – 421, Jun 1990.
- [64] S. Kulkarni, J. Medberry, K.L. Lear, "Evaluation of Nonuniform WDM Source Spacing for EDFA Gain Characterization", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, pp. 783 – 785, Oct. 2002.
- [65] M. Razavi, J. A. Salehi, "Performance of Optical Bit Rate Limiters with pre- or post-Optical Amplification", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 20, pp. 1797 – 1804, May 1995.
- [66] T. Deng, S. Subramaniam, "Virtual Loops Effects in DWDM Networks with Dynamic Power Equalization", in *Proc. IEEE ONDM'05*, Feb 2005.
- [67] ITU-T Rec. G.652, "Characteristics of Single-Mode Optical Fiber Cable", Oct 2000.
- [68] ITU-T Rec. G.653, "Characteristics of Dispersion Shifted-Fiber Single-Mode Optical Cable", Oct 2000.
- [69] ITU-T Rec. G. 655, "Characteristics of a Non-Zero Dispersion-Shifted Single-Mode Optical Fibre and Cable", Mar 2003.
- [70] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optic", 3rd ed. Academic Press, 2001.
- [71] M. L. F. Abbade, "Contribuição para o Estudo de Efeitos Não-Lineares em Fibras Ópticas Monomodo", Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, 2002.
- [72] W.F. Giozza, E. Conforti e H.Waldman, "Fibras Ópticas Tecnologia e Projeto de Sistemas", Makron Books e McGraw-Hill, 1991.

- [73] I. E. Fonseca, "Contribuições ao Estudo de Efeitos Não-Lineares em Fibras Ópticas Monomodo Utilizando Técnicas Numéricas"; *Dissertação de Mestrado*, FEEC/UNICAMP, 2001.
- [74] M. Shtaif, M. Eiselt, "Analysis of Intensity Interference Caused by Cross-Phase Modulation in Dispersive Optical Fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, pp. 979-981, Jul 1998.
- [75] S. Bigo, G. Bellotti, M.W. Chbat, "Investigation of Cross-Phase Modulation Limitation over Various Types of Fiber Infrastructures", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, pp. 605-607, May 1999.
- [76] V. Mikhailov, R.I. Killey, J. Prat, P. Bayvel, "Limitation to WDM Transmission Distance due to Cross-Phase Modulation Induced Spectral Broadening in Dispersion Compensated Standar Fiber Systems", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, pp. 994-996, Aug 1999.
- [77] L.E. Nelson, R.M. Jopson, A.H. Gnauck, A.R. Chraplyvy, "Resonances in Cross-Phase Modulation Impairment in Wavelength-Division-Multiplexed Lightwave Transmission", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, pp. 907-909, Jul 1999.
- [78] R.A. Saunders, A. Robinson, D. Garthe, R. Hui, M. O'Sullivan, "Compensation of Cross-Phase Modulation in 10-Gbit/S WDM Systems by Interfering Channel Prechirp", *OFC '98*, Mar 1998.
- [79] M. Shtaif, M. Eiselt, "Analysis of Intensity Interference Caused by Cross-Phase Modulation in Dispersive Optical Fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, pp. 979-981, Jul 1998.
- [80] M. Shtaif, M. Eiselt, R.W. Tkach, R.H. Stolen, A.H. Gnauck, "Crosstalk in WDM Systems Caused by Cross-Phase Modulation in Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, pp. 1796-1798, Dec 1998.
- [81] M. Shtaif, M. Eiselt, L.D. Garret, "Cross-Phase Modulation Measurements in Multispan WDM Systems", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 12, pp. 88-90, Aug 1999.
- [82] G. P. Agrawal, "Modulation Instability Induced by Cross-Phase Modulation", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 59, pp. 880-883, Aug 1987.
- [83] R.Y. Chiao, C. H. Townes, B. P. Stoicheff, "Stimulated Brillouin Scattering and Coherent Generation of Intense Hypersonic Waves", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 12, pp. 592-595, 1964.
- [84] C.L. Tang, "Saturation and Spectral Characteristics of Stokes Emission in the Stimulated Brillouin Process", *J. Appl. Phys.*, Vol. 37, pp. 2945-2955, Jul 1966.
- [85] R.W. Tkach, A.R. Chraplyvy, R.M. Derosier, "Spontaneous Brillouin Scattering for Single-Mode Optical-Fibre Characterisation", *Electron. Lett.*, Vol. 22, pp. 1011-1013, Sep 1986.
- [86] C.V. Raman, "A new radiation", *Indian J. Phys.*, Vol. 2, pp. 387, 1928.
- [87] R.W. Hellwarth, "Theory of stimulated Raman scattering", *Phys. Rev.*, Vol. 130, pp. 1850-1852, Jun 1963.
- [88] J. L. Bowie, J. C. Garrison, R. Y. Chiao, "Stimulated Raman Gain in a Lambda-type atomic system with doubly excited transitions", *Phys. Rev. A*, Vol. 61, 2000.
- [89] F. DeMartini, C.H. Townes, T.K. Gustafson and P.L. Kelley, "Self-Steepening of Light Pulses", *Phys. Rev.*, Vol 164, 312-323, 1967.

- [90] M. Trippenbach, Y.B. Band, "Effects of Self-Steepening and Self-Frequency Shifting on Short-Pulse Splitting in Dispersive Nonlinear Media," *Phys. Rev. A* 57, 6, 4791-4803, 1998.
- [91] J.P. Gordon, "Theory of the Soliton Self-Frequency Shift", *Opt. Lett.*, Vol. 11, pp. 662-664, Oct. 1986.
- [92] E.A. Golovchenko, A.N. Pilipetskii, "Unified Analysis of Four-Photon Mixing, Modulational Instability, and Stimulated Raman Scattering under Various Polarization Conditions in Fibers," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 11, pp. 92-101, Jan 1994.
- [93] A. Hasegawa, W.F. Brinkman, "Tunable Coherent Ir and Fir Sources Utilizing Modulational Instability", *IEEE J. of Quantum Electron.*, Vol. QE-16, pp. 694-697, Jul 1980.
- [94] E. Moschim, M.L.F. Abbade, I.E. Fonseca, "Competition Between FWM Dynamics and Modulational Instability in Dispersion Shifted Fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol 14, pp. 36-38, Jan 2002.
- [95] F. Matera, M. Settembre, M. Tamburrini, M. Zitelli, S. Turitsyn, "Reduction of the four wave mixing in optically amplified links by reducing pulse overlapping", *Optics Communications*, Vol. 181, pp. 407-411, Jul 2000.
- [96] E.A. Golovchenko, V.J. Mazurczyk, D.G. Duff, S.M. Abbot, "Four-Wave Mixing Penalties In Long-Haul WDM Transmission Links," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, pp. 821-826, Jul 1999.
- [97] M. Jinno, M. Fukui, T. Sakamoto, S. Aisawa, J-I. Kani, "WDM Transmission Technologies For Dispersion-Shifted Fibers", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E81-C, pp. 1264-1275, Aug 1998.
- [98] R.W. Tkach, A.R. Chrpilvy, F. Forghieri, A.H. Gnauck, R.M. Derosier, "Four-Photon Mixing And High-Speed WDM Systems", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 13, pp. 841-849, May 1995.
- [99] M.L.F. Abbade, I.E. Fonseca, and E. Moschim, "Influence of FWM dynamics on Modulational Instability in Dispersion Shifted Fibers", in *Proc. IEEE IMOC 2001*, Aug 2001.
- [100] I.E. Fonseca, M.L.F. Abbade e E. Moschim, "Instabilidade Modulacional em Fibras de Dispersão Deslocada: Influência da Dinâmica da FWM e da Compensação de Dispersão", in *Proc. SBRT 2001*, Sept 2001.
- [101] K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki and R. I. MacDonald, "CW Three-Wave Mixing in Single-Mode Optical Fibers", *J. Appl. Phys.*, Vol. 49, pp. 5098-5106, Oct 1978.
- [102] R.H. Hardin, F.D. Tappert, "Application of the Split-Step Fourier Method to the Numerical Solution of Nonlinear and Variable Coefficient Wave Equation", *SIAM*, Vol. 15, pp. 423, 1973.
- [103] R.A. Fisher, W.K. Bischel, "Numerical Studies of the Interplay between Self-Phase Modulation and Dispersion for Intense Plane-Wave Laser Pulses", *J. Appl. Phys.*, Vol. 46, pp. 4921-4934, Nov 1975.
- [104] H.E.H. Figueroa, "Improved Split-Step Schemes for Nonlinear-Optical Propagation", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 11, pp. 798-803, May 1994.
- [105] N. Shibata, R. P. Braun, and R. G. Waarts, "Phase-Mismatch Dependence of Efficiency of Wave Generation Through Four-Wave Mixing in a Single-Mode Optical Fiber", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-23, pp. 1205-1210, Jul 1987.

- [106] S. Song, C. T. Allen, K. R. Demarest, R. Hui, "Intensity-Dependent Phase-Matching Effects on Four-Wave Mixing in Optical Fibers", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, vol. 17, pp. 2285-2290, Nov 1999.
- [107] A. Bogris and D. Syvridis, "Regenerative Properties of a Pump-Modulated Four-Wave Mixing Scheme in Dispersion-Shifted Fibers", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, vol. 21, pp. 1892-1902, Sept 2003.
- [108] S. Kumar, "Analysis of degenerate four-wave-mixing noise in return-to-zero optical transmission systems including walk-off", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, vol. 23, pp. 310 - 320, Jan 2005.
- [109] T. Yamamoto and M. Nakazawa, "Highly Efficient Four-Wave Mixing in an Optical Fiber with Intensity Dependent Phase Matching", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 9, pp. 327-329, Mar 1997.
- [110] F. Forghieri, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, and D. Marcuse, "Reduction of Four-Wave Mixing Crosstalk in WDM systems Using Unequally Spaced Channels", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 6, pp. 754-756, Jun 1994.
- [111] W. C. Kwong, Guu-C. Yang, "An Algebraic Approach to the Unequal-Spaced Channel-Allocation Problem in WDM Lighthwave Systems", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 45, pp. 352-359, Mar 1997.
- [112] F. Forghieri, R. W. Tkach, and A. R. Chraplyvy, "WDM Systems with Unequally Spaced Channels", *Journal of Lighthwave Tecnology*, Vol. 13, pp. 889-897, May 1995.
- [113] Keng-Duan Chang, Guu-Chang Yang, and W. C. Kwong, "Determination of FWM Products in Unequal-Spaced-Channel WDM Lightwave Systems", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 18, pp. 2113 - 2122, Dec 2000.
- [114] Takahiro Numai and Ouichi Kubota, "Analysis of Repeated Unequally Spaced Channels for FDM Lightwave Systems", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 18, pp. 656 - 664, May 2000.
- [115] C. Kurtzke and K. Petermann, in *Proc. OFC'93*, Mar 1993.
- [116] T. Matsuda, M. Murakami, T. Imai, "Dispersion Management Scheme for Suppressing FWM in DWDM Transmission", in *Proc. LEOS '98*, 1998.
- [117] T. A. Birks, D. Mogilevtsev, J. C. Knigth, and P.St. J. Russel, "Dispersion Compensation using single-material fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, pp. 674 - 676, Nov 1999.
- [118] I. Kaminow, T. Li, "Optical Fiber Communications: Systems and Impairments", vol. IV B, Academic Press, 2002.
- [119] ITU-T Rec. G.691, "Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers", Dec 2003.
- [120] K. Inoue, "A simple expression for optical FDM network scale considering fiber four-wave mixing and optical amplifier noise", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, Vol. 13, pp. 856 - 861, May 1995.
- [121] T. Deng and S. Subramaniam, "Amplifier Placement and Source Power Management in Transparent DWDM Networks", in *Proc. IFIP ONDM'04*, Feb. 2004.
- [122] R. Ramaswami, K.N Sivarajan, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, Oct 1995.
- [123] N. Nagatsu, Y. Hamazumi, K. Sato, "Optical Path Accommodation Designs Applicable to Large Scale Networks", *IEEE/ACM Transactions on Communications*, Vol. E78-B, 1995.

- [124] R. M. Krishnaswamy, K.N Sivarajan, "Algorithms for Routing and Wavelength Assignment Based on Solutions of LP-relaxations", *IEEE Communications Letters*, Vol. 5, Oct 2001.
- [125] P. Manohar, D. Manjunath, R.K. Shevgaonkar, "Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks from Edge Disjoint Path Algorithms", *IEEE Communications Letters*, Vol. 6, pp. 211-213, May 2002.
- [126] Iguatemi E. Fonseca, Raul C. Almeida Jr., Moises R. N. Ribeiro, and Helio Waldman, "Greedy algorithm for Reducing FWM Impairments in Dynamic Optical Networks", in *Proc. SBrT '03*, 2003.
- [127] Iguatemi E. Fonseca, Raul C. Almeida Jr., Moises R. N. Ribeiro, and Helio Waldman, "Algorithms for FWM-aware Routing and Wavelength Assignment", *Proc. IEEE/MTT SBMO IMOC'03*, 2003.
- [128] Richard A. Barry, Pierre A. Humblet, "Models of Blocking Probability in All-optical Networks with and without Wavelength Changers", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 14, Jun 1996.
- [129] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr, and H. Waldman, "Meeting Optical QoS Requirements with Reduced Complexity in Dynamic Wavelength Assignment", in *Proc. IEEE BroadNets'04*, Oct 2004.
- [130] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, and H. Walman, "Optical DiffServ in FWM Impaired Dynamic Optical Networks", in *Proc. SBrT '04*, Sept 2004.

APÊNDICE 1: PUBLICAÇÕES

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO CAPÍTULO 3:

- I. E. Fonseca, R. C. Almeida Jr, M. R. N. Ribeiro, and H. Waldman, "Algorithms for FWM-aware Routing and Wavelength Assignment", *Proc. of International Microwave and Optoelectronics Conference 2003 - IEEE IMOC'03*, Foz do Iguaçu- PR, Sept 2003.
- I. E. Fonseca, R. C. Almeida Jr, M. R. N. Ribeiro, and H. Waldman, "Greedy Algorithm for Reducing FWM Impairments in Dynamic Optical Networks", *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações 2003 - SBT'03*, Rio de Janeiro - RJ, Oct 2003.

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO CAPÍTULO 4:

- I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr, and H. Waldman, "Preserving Global Optical QoS in FWM Impaired Dynamic Networks", *IEE Electronics Letters*, vol. 40, pp. 191-192, Feb 2004.
- I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr, and H. Waldman, "Meeting Optical QoS Requirements with Reduced Complexity", *Proc. of 30th European Conference on Optical Communication - ECOC'04*, Stockholm, Sweden, Sept. 2004.
- I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr, and H. Waldman, "Meeting Optical QoS Requirements with Reduced Complexity in Dynamic Wavelength Assignment", *Proc. of First International Conference on Broadband Networks - IEEE BroadNets'04*, San José, USA, Oct. 2004.
- I. E. Fonseca, R. C. Almeida Jr, M. R. N. Ribeiro, and H. Waldman, "CAC/RWA's for Preserving Optical QoS in Dynamic Optical Networks", *Anais do MOMAG 2004/ 11º Simpósio Brasileiro de Microondas*, São Paulo - SP, Aug. 2004.

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO CAPÍTULO 5:

- I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, and H. Walman, Differentiated Optical QoS under a Low Complexity FWM-aware Wavelength Assignment Algorithm, *Proc. of IEEE 9th Optical Network Design and Modelling 2005 - ONDM'05*, Milano, Italy, Feb. 2005.
- I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, and H. Walman, "Optical DiffServ in FWM Impaired Dynamic Optical Networks", *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações 2004 - SBT'04*, Belém-PA, Sept 2004.

APÊNDICE 2: AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

A pesquisa na área de interconexão óptica apóia-se sobre métodos analíticos ou computacionais. Métodos analíticos são preferíveis, mas a maioria dos trabalhos atualmente executados baseia-se em métodos computacionais, mais facilmente tratáveis. Ainda, mesmo quando o problema pode ser resolvido analiticamente, sua verificação em diferentes cenários é comumente computacional. Assim o principal instrumento de trabalho dos pesquisadores da área de conectividade óptica é a infra-estrutura computacional, como computadores e programas (softwares).

O simulador de redes ópticas utilizado nesta Tese foi desenvolvido no laboratório OptiNet do DECOM/FEEC/UNICAMP em linguagem de programação estruturada C, sendo que não utilizou-se nenhum simulador (*software*) comercial ou aberto, como por exemplo o *Network Simulator* (NS). O editor/copilador C utilizado foi o Borland C++ versão 5.02.

A maioria das simulações mostradas nesta Tese foi realizada utilizando um computador com processador *Pentium* IV 1.8 GHz e com 512 Mbytes de memória RAM.