

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ARQUITETURA DE NÓS E ENGENHARIA DE
TRÁFEGO EM REDES ÓPTICAS

Helvécio Moreira de Almeida Neto

Tese de doutorado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Engenharia
Elétrica
Área de Concentração:
Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Amilcar Careli César

São Carlos, SP

2009

Livros Grátis

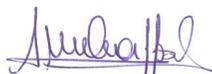
<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HELVECIO MOREIRA DE ALMEIDA NETO.**

Tese defendida e julgada em 25/09/2009 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Associado **AMÍLCAR CARELI CÉSAR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Titular **MURILO ARAÚJO ROMERO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof. Dr. **HELIO WALDMAN**
(Universidade Federal do ABC/UFABC)

AZROVADO



Prof.^a Dr.^a **MARIA THEREZA MIRANDA ROCCO GIRALDI**
(Instituto Militar de Engenharia - IME)

APROVADO



Dr. **MÁRIO TOSI FURTADO**
(Centro de Pesquisa e Desenvolvimento/CPqD)

APROVADO



Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Helvécio Moreira de Almeida Júnior e Anamaria Scalon Almeida e minha irmã Anne Scalon Almeida pela compreensão e paciência ao longo desses 7 longos anos de mestrado e doutorado. Dedico também a minha sobrinha Mônica Scalon que nos deu a alegria de sua existência durante esse período.

Dedico a minha namorada Thaís Araújo pela paciência, amor e pelo seu tempo dedicado para longas conversas para me acalmar nos dias mais difíceis.

Dedico aos dois irmãos que ganhei durante esse período. Luizir Modesto Pereira que com sua experiência profissional e visão de vida tornou essa jornada suportável. E ao meu irmão e companheiro para todas as horas Eduardo Martinelli Galvão de Queiroz que batalhou cada minuto para que conseguíssemos atingir os objetivos que sempre desejamos. Espero estar com vocês pela vida toda.

Agradecimentos

A Deus, pela saúde para suportar o trabalho.

Ao Professor Doutor Amilcar Carelli César, pela excelente orientação, confiança e paciência durante esses 7 anos de mestrado e doutorado.

Aos Professores Ben-Hur Viana Borges e José Carlos Sartori pela oportunidade de convivência e pelos conhecimentos.

Ao amigo Eduardo José Aloia que, apesar de sua confusão do dia a dia, se torna indispensável para tornar a vida mais divertida.

Aos amigos da empresa TCS tecnologia Luis Claudio Teixeira Sanches e Luciana Trevisan pelo suporte dado para as aplicações práticas.

Aos amigos de Laboratório Alex, Anderson, Daniel, Danilo, Eduardo, Getúlio, Guilherme, Luizir, Marcelo, Regiane, Ricardo, Ulisses, Pedro, Rafael, Tany, Valdemir, Valtemir e Yang pelos conhecimentos transmitidos, amizade e bom humor.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP, pela amizade e colaboração.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização desse trabalho

Meus Sinceros Agradecimentos

Sumário

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
1- INTRODUÇÃO.....	1
1.1- EVOLUÇÕES DOS TIPOS DE REDE.....	1
1.2 - CARACTERÍSTICAS DAS REDES ÓPTICAS	3
1.3 – REDES ÓPTICAS WDM COM COMUTAÇÃO WAVEBAND.....	5
1.4 - TRABALHOS RELACIONADOS E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	6
1.5-ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	8
1.6-ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE ESSA PESQUISA	9
2-CARACTERÍSTICAS DA TÉCNICA DE AGREGAÇÃO WAVEBAND	11
2.1-ARQUITETURA DE NÓS HÍBRIDOS.....	11
2.2-ARQUITETURAS DE COMUTADORES MG-OXCS	14
2.2.1 - MG-OXC de Três Camadas	14
2.2.2-MG-OXC de Uma Camada.....	15
2.3-AGREGAÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA EM WAVEBANDS NOS NÓS MG-OXCS.....	16
2.4 - ALGORITMOS DE ROTEAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DA REDE COM NÓS MG-OXCS.....	17
3 - IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA WAVEBAND.....	19
3.1- DEFINIÇÕES DOS TERMOS UTILIZADOS	19
3.2-ARQUITETURA DE REDE: COMPRIMENTO DE ONDA E WAVEBAND.....	21
3.3-TIPOS DE NÓS QUE COMPÕEM AS REDES WAVEBAND SIMULADAS	22
3.3.1-MG-OXC de Uma Camada	22
3.3.2-MG-OXC de Três Camadas	23
3.4-DETALHAMENTO DOS NÓS MG-OXCS E OXCS UTILIZADOS	25
3.5-TIPOS DE CONEXÃO NAS REDES COM MG-OXC DE UMA CAMADA E TRÊS CAMADAS... ..	28
3.6-GERENCIAMENTO DE CONEXÃO	29
3.6.1-MG-OXC de Uma Camada	29
3.6.2-MG-OXC de Três Camadas	30
3.7-ANÁLISE DE CUSTO DA ARQUITETURA DE NÓS	32
3.7.1-MG-OXC de Uma Camada	33
3.7.2-MG-OXC de Três Camadas	35
3.7.3-Cálculo do Coeficiente de Correlação.....	38
3.8-DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO DO WAVEBAND	38
4-INCLUSÃO DOS FATORES DE DEGRADAÇÃO DE SINAL NA SIMULAÇÃO.....	45
4.1-INTRODUÇÃO	45
4.2-ARQUITETURA DE REDE COM REGENERAÇÃO ESPARSA E TROCA DE COMPRIMENTO DE ONDA	46
4.3-LOCALIZAÇÃO DO REGENERADOR EM UMA REDE COM REGENERAÇÃO ESPARSA	47
4.3.1-Localização do Regenerador Baseada no Tráfego	47
4.4-MODELO DOS NÓS SIMULADOS E GERENCIAMENTO DE CONEXÃO	48
4.5-MODELAGEM DA CAMADA FÍSICA [59].....	51
4.5.1- OSNR	52
4.6-INCLUSÃO DAS RESTRIÇÕES DA CAMADA FÍSICA NO ALGORITMO.....	53

5- HEURÍSTICA DO CANAL ESPECÍFICO PARA A ESCOLHA DO COMPRIMENTO DE ONDA	57
5.1-INTRODUÇÃO	57
5.2-TÉCNICAS DE ESCOLHA DE COMPRIMENTOS DE ONDA	57
5.3-COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS	59
6- ESQUEMA DE MONITORAMENTO DE REDES WDM BASEADO NA INTENSIDADE DE TRÁFEGO.....	65
6.1- DEFINIÇÃO DE REDES ALEATÓRIAS E REDE SEM ESCALA	65
6.2 - LIBERAÇÃO DE RECURSO ATRAVÉS DO ESQUEMA DE MONITORAMENTO DE NÓS	65
6.3-INCLUSÃO DO ESQUEMA DE MONITORAMENTO DE NÓS NO ALGORITMO PROPOSTO.....	67
6.4 - DESEMPENHO DO ESQUEMA DE MONITORAMENTO.....	69
7-RESULTADOS NUMÉRICOS.....	77
7.1-ANÁLISE DO CUSTO E PROBABILIDADE DE BLOQUEIO DOS NÓS COM TROCA DE COMPRIMENTO DE ONDA	78
7.1.1-Análise do Custo e Probabilidade de Bloqueio dos Nós com Troca de Comprimento de Onda em nós MG-OXC de Uma Camada	78
7.1.2-Análise do Custo e Probabilidade de Bloqueio dos Nós com Troca de Comprimento de Onda e nós MG-OXC de Três Camadas.....	88
7.1.3-Comparação entre o Desempenho e Custo das Configurações de MG-OXC de Uma Camada e de Três Camadas.....	94
7.2-ANÁLISE DO CUSTO E PROBABILIDADE DE BLOQUEIO DOS NÓS COM WAVEBANDS DE “GRANULARIDADES” DIFERENTES	96
7.2.1-Análise dos Custos e Probabilidade de Bloqueio em Nós MG-OXC de Uma Camada com Diferentes Comprimentos de Onda Agregados ao Waveband.	96
7.2.2- Análise dos Custos e Probabilidade de Bloqueio em Nós MG-OXC de Três Camadas com Diferentes Comprimentos de Onda Agregados ao Waveband.....	104
7.2.3-Comparação Entre o Desempenho e Custo das Configurações de MG-OXC de Uma Camada e de Três Camadas.....	110
7.3-IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA WAVEBAND UTILIZANDO O MÉTODO DO CANAL ESPECÍFICO.....	111
7.4-RESTRICÇÕES FÍSICAS.....	121
7.4.1-Parâmetros do Sistema	121
7.4.2-Nós com Capacidade de Regeneração do Sinal Óptico	122
7.4.3-Comparação entre Redes Totalmente Ópticas e Redes com Conversão OEO em Nós Escolhidos Previamente.....	123
7.4.4-Probabilidade de Bloqueio Devido à Falta de Comprimentos de Onda com Banda Disponível na Camada de Rede e de Restrições Físicas.....	125
7.4.4.1-Bloqueio por Banda Insuficiente nos Comprimentos de Onda Disponíveis na Rede	126
7.4.4.2-Restrições Físicas.....	127
7.4.4.2.1-Bloqueio por BER	127
7.5-ADICIONANDO RECURSOS À REDE	127
7.6-INFLUÊNCIA DAS RESTRIÇÕES FÍSICAS NA TÉCNICA DE AGREGAÇÃO WAVEBAND	130
7.7-ANÁLISE DO ESQUEMA DE MONITORAMENTO DE REDES ÓPTICAS WDM EM CONJUNTO COM A TÉCNICA WAVEBAND.....	132
8- CONCLUSÕES.....	139
8.1- PROBLEMA	139
8.2- ABORDAGEM.....	139
8.3- RESULTADOS.....	140
8.3.1- MG-OXCs de uma e três camadas	140
8.3.2- Heurística do Canal Específico Para a Escolha do Comprimento de Onda	142
8.3.3- Restrições da camada física nas simulações dos nós MG-OXCs.....	143

8.3.4- Esquema de Monitoramento de Desempenho Baseado no Intensidade de Tráfego	143
8.4 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	144
9-REFERÊNCIAS.....	145
I.APÊNDICE- GERAÇÃO DOS EVENTOS, MATRIZ DE ENLACE E CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE BLOQUEIO.....	153
I.1 – GERAÇÃO DOS EVENTOS DE ALOCAÇÃO E DESALOCAÇÃO [66]	153
I.2 – FORMAÇÃO DA MATRIZ DE ENLACES	155
I.3 – CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE BLOQUEIO	156
II. APÊNDICE - DISPOSITIVOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA WAVEBAND.....	156
III.APÊNDICE- FORMULAÇÃO UTILIZADA NO CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AMPLIFICADORES RAMAN	159
III.1. GANHO E RUÍDO ASE DOS AMPLIFICADORES RAMAN DISTRIBUÍDOS	159
III.2. GANHO E RUÍDO ASE DE UM DRA [80]	160
III.3. INTERFERÊNCIA MULTICAMINHOS (MPI) EM UM AMPLIFICADOR RAMAN DISTRIBUÍDO	161

Lista de Figuras

Figura 1.1: Modelo geral de rede <i>backbone</i>	2
Figura 1.2: (a) Transmissão e chaveamento de wavebands. Um agregado de λ_s (B) é comutado através de um canal waveband; (b) Transmissão e chaveamento de λ_s . Cada λ ocupa uma porta do comutador.....	5
Figura 2.1: Diferentes Tipos de Arquiteturas de Comutadores [43].	12
Figura 2.2:Arquitetura do comutador óptico que tem a função WBS, comutação OEO e agregação de tráfego [45].	13
Figura 2.3. Comutador MG-OXC de três camadas. As camadas WXC, BXC e FXC são separadas e utilizam multiplexadores e demultiplexadores para comutarem λ_s e wavebands.	15
Figura 2.4. Comutador MG-OXC de uma camada. Nessa configuração não existe comunicação entre as camadas WXC, BXC e FXC.	16
Figura 2.5: (a) Waveband uniforme com granularidade igual a quatro (b) Waveband não uniforme com diferentes granularidades.	17
Figura 3.1: Conexão entre portas de nós OXC ou de portas dos nós MG-OXCs com λ_s isolados em que 16 conexões de 155 Mbps são agregadas e transportadas por um caminho óptico de 2,5 Gbps de largura de banda.	20
Figura 3.2: Conexão entre portas de nós OXC ou de portas dos nós MG-OXCs com λ_s isolados em que 16 conexões de 155 Mbps chegam em um caminho óptico através de λ_1 são desagregadas e agregadas novamente no comprimento de onda λ_2 e seguem até o próximo nó.	20
Figura 3.3. Arquitetura de rede: caminhos ópticos waveband e λ_s . O nó 1 é MG-OXC e está usando as portas waveband para agregar λ_1 e λ_2 ; o nó 2 é de passagem para o waveband; o nó 3 executa demultiplexação waveband (λ_1 e λ_2); o nó 4 executa a de/multiplexação (λ_3 e λ_4) e é de passagem para λ_5	21
Figura 3.4: Conexão waveband totalmente óptica e conexão λ no domínio eletrônico. As portas em vermelho são conexões com caminho waveband e as portas em azul são os caminhos λ_s	22
Figura 3.5: Nós MG-OXC de uma camada sem e com troca de λ . As portas em azul representam portas com troca de λ , as portas em cinza são waveband e as portas em branco são de λ isolado.	22
Figura 3.6: Nós MG-OXCs de uma camada com diferentes valores de granularidade.....	23
Figura 3.7: Nós MG-OXCs de três camadas com quatro λ_s agregados ao waveband e com as portas com λ_s isolados capacidade de troca de λ	24
Figura 3.8: Nós MG-OXCs de três camadas com diferentes λ_s agregados aos wavebands dos nós.	25
Figura 3.9: MG-OXC uma camada detalhado das.Os λ_s agregados aos wavebands são comutados na camada óptica e os λ_s isolados sofrem conversão OEO.	26
Figura 3.10: MG-OXC de três camadas. Nesse MG-OXC há multiplexadores de waveband para λ_s e de λ_s para wavebands.	27
Figura 3.11: Nós OXC.Os λ_s estão sujeitos a conversão OEO.	28
Figura 3.12: Caminho waveband-waveband.	30
Figura 3.13:Caminho λ - λ	30
Figura 3.14: Caminho waveband- λ	31
Figura 3.15: Caminho λ -waveband.	31
Figura 3.16: Caminho λ -waveband- λ	32
Figura 3.17: OXCs, WC-OXCs, MG-OXCs e WC-MG-OXCs com os custos das portas.	33
Figura 3.18: Custos das portas dos OXCs e MG-OXCs com diferentes granularidades.	34
Figura 3.19: Custos das portas dos OXCs, WC-OXCs, WC-MG-OXCs e MG-OXCs de três camadas.	36
Figura 3.20: Custos das portas dos OXCs e MG-OXCs com diferentes granularidades.	37

Figura 3.21: Fluxograma do algoritmo proposto para MG-OXC de uma camada no qual: j =nó origem do enlace, k =nó destino do enlace, i =conexão em andamento, W_e =waveband, B_{conex} =banda da conexão, B_λ =banda do λ , G_e =fator de agregação de λ , G_a =fator de agregação, $G_{(i)}$ =fator de agregação de tráfego.	42
Figura 3.22: Fluxograma do algoritmo proposto para MG-OXC de três camadas no qual: j =nó origem do enlace, k =nó destino do enlace, i =conexão em andamento, W_e =waveband, B_{conex} =banda da conexão, B_λ =banda do λ , G_e =fator de agregação de λ , G_a =fator de agregação, $G_{(i)}$ =fator de agregação de tráfego.	43
Figura 4.1: Nó com conversão OEO e regeneração 3R.	46
Figura 4.2: Tipos de nós utilizados para a simulação em redes totalmente ópticas e redes com alguns nós com troca de λ	48
Figura 4.3: Exemplo de conexão em nós totalmente ópticos sem recursos como regeneração 3R, agregação de tráfego e troca de λ	49
Figura 4.4: Exemplo de conexão entre nós totalmente ópticos com um nó regenerador com o recurso 3R.	50
Figura 4.5: Exemplo de conexão entre nós totalmente ópticos com um nó regenerador com recursos 3R, agregação de tráfego e troca de λ	50
Figura 4.6: Exemplo de conexão entre nós OXCs e MG-OXCs com os λ s agrupados em waveband e os λ s isolados sendo comutados no domínio óptico.	51
Figura 4.7: Exemplo de conexão entre nós OXCs e MG-OXCs com os λ s agrupados em waveband sendo comutados no domínio óptico e os λ s isolados passando pela regeneração e agregação de tráfego para ser convertido para o domínio óptico e seguir pela fibra de saída.	51
Figura 4.8: Arquitetura de simulação de um caminho óptico.	51
Figura 4.9: Fluxograma do algoritmo proposto no Capítulo 3 com a inclusão da camada física no qual: j = nó origem do enlace; k = nó destino do enlace; i = conexão em andamento; W_e = waveband; B_{conex} = banda da conexão; B_λ = Banda do λ ; G_e = Fator de agregação do λ ; G_a = Fator de agregação; $G_{(i)}$ = Fator de agregação de uma conexão.	55
Figura 5.1: Comprimentos de onda e larguras de banda designadas.	58
Figura 5.2: Comprimentos de onda e larguras de banda designadas.	59
Figura 5.3: Rede NSFNet [45].	60
Figura 5.4: (a) Taxa de utilização do $\lambda 1$; (b) $\lambda 2$; (c) $\lambda 3$; (d) $\lambda 4$; (e) $\lambda 5$; (f) $\lambda 6$; (g) $\lambda 7$; (h) $\lambda 8$	62
Figura 5.5: Comprimentos de onda e larguras de banda designadas.	63
Figura 5.6: Comparação da probabilidade de bloqueio global dos 3 métodos de escolha de λ s.	63
Figura 6.1: Fluxograma do algoritmo proposto. C_n é o total de conexões, R_n é o grau de congestionamento dos nós, M_n é a média das diferenças, L é o limiar pré-estabelecido, j é o nó origem do enlace, k é o nó destino do enlace, i é a conexão em andamento, W_e é o waveband, B_{conex} é a banda da conexão, B_λ é a banda do λ , G_e é o fator de agregação de λ , G_a é o fator de agregação, $G_{(i)}$ é o fator de agregação da conexão.	68
Figura 6.2: Rede “scale-free” utilizada para a simulação do sistema de monitoramento.	69
Figura 6.3: Variação do valor do limiar de monitoramento (L) produzindo diferentes probabilidades de bloqueio para a rede da Figura 6.2 com 5 nós monitorados.	70
Figura 6.4: Probabilidades de bloqueio com 1 λ disponível extra para efetuar o monitoramento.	71
Figura 6.5: Probabilidades de bloqueio com 8 λ s extras disponíveis para efetuar o monitoramento.	72
Figura 6.6: Comparação entre as probabilidades de bloqueio com 20 nós monitorados e 1 λ e 20 nós monitorados e 8 λ s.	73
Figura 6.7: Contribuição da inserção de mais λ s em dois nós monitorados.	74
Figura 6.8: Contribuição da inserção de mais λ s em vinte nós monitorados.	74
Figura 6.9: Comparação da probabilidade de bloqueio entre oito λ s sem monitorar, 9 λ s sem monitorar e 8 λ s com 2 nós monitorados.	75
Figura 7.1: Topologia NSFNet 12 λ s por enlace. Os nós 6,7,8,9 10 e 13 são nós com capacidade de agregação waveband. Todos os nós executam agregação de tráfego em portas com λ s isolados ao waveband.	78

Figura 7.2: Probabilidades de bloqueio das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de uma camada. A descrição das configurações 1 a 5 estão na Tabela 7.2.	80
Figura 7.3: Correlação do custo e do benefício das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de uma camada.	83
Figura 7.4: Relações custo-benefício das configurações simuladas.	84
Figura 7.5: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.	85
Figura 7.6: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.	86
Figura 7.7: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 140 erlangs.	86
Figura 7.8: Probabilidades de bloqueio das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de três camadas.	88
Figura 7.9: (a) Alocação de conexão entre λ - λ (b) Alocação de conexão entre λ -wb.	89
Figura 7.10: Correlação do custo e do benefício das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de três camadas.	91
Figura 7.11: Relação custo-benefício para as configurações simuladas em um nó MG-OXC de três camadas.	92
Figura 7.12: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.	93
Figura 7.13: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.	93
Figura 7.14: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 140 erlangs.	94
Figura 7.15: Comparação do desempenho do MG-OXC de uma camada e de três camadas para as configurações (a) 1; (b) 2 e (c) 4.	95
Figura 7.16: Comparação da relação do MG-OXC de uma camada e de três camadas para as configurações (a) MG-OXC de uma camada; (b) MG-OXC de três camadas.	96
Figura 7.17: Probabilidade de bloqueio das configurações simuladas com MG-OXCs de uma camada. As configurações 1 e 4 estão detalhadas na Tabela 7.9.	98
Figura 7.18: Correlação entre custo e benefício das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de uma camada.	100
Figura 7.19: Relação custo-benefício das configurações simuladas.	101
Figura 7.20: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.	102
Figura 7.21: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.	102
Figura 7.22: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 140 erlangs.	103
Figura 7.23: Probabilidade de bloqueio das configurações simuladas com MG-OXCs de três camadas.	104
Figura 7.24: (a) Alocação de conexão entre nós MG-OXC4 e MG-OXC3 (b) Alocação de conexão entre MG-OXC6 e MG-OXC2.	105
Figura 7.25: Correlação entre custo e benefício das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de três camadas.	106
Figura 7.26: Relação custo-benefício das configurações simuladas.	107
Figura 7.27: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.	108
Figura 7.28: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.	108
Figura 7.29: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 140 erlangs.	109
Figura 7.30: Comparação do desempenho do MG-OXC de uma camada e de três camadas para as configurações (a) 2; (b) 3 e (c) 4.	110
Figura 7.31: Comparação da relação do MG-OXC de uma camada e de três camadas para as configurações (a) MG-OXC de uma camada; (b) MG-OXC de três camadas.	111
Figura 7.32: Comprimentos de onda e larguras de faixa designadas.	112
Figura 7.33: Probabilidade de bloqueio global das configurações mostradas na Tabela 7.15. .	113
Figura 7.34: Comprimento de onda 8 sendo usado para a troca, pois possui banda disponível para essa operação.	114
Figura 7.35: Comprimentos de onda e larguras de faixa designadas para os nós MG-OXC. Nessa configuração apenas os λ s de redundância estão disponíveis para alocar conexões fora do waveband.	115
Figura 7.36: Comprimentos de onda e larguras de faixa designadas para os nós MG-OXC. Nessa configuração os λ s de redundância estão disponíveis para realizar a troca de λ	115
Figura 7.37: Comparação entre os métodos CE e FF (a) configuração 1; (b) configuração 2; (c) configuração 3; (d) configuração 4; (e) configuração 5.	116

Figura 7.38: Probabilidade de bloqueio para uma carga de 120 erlangs.....	118
Figura 7.39: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.	119
Figura 7.40: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.	119
Figura 7.41: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.	119
Figura 7.42: Intensidade de tráfego para os diferentes nós da rede NSFNet equipada apenas com nós OXCs. Sendo (a) Simulação 1, (b) Simulação 2, (c) Simulação 3 e (d) Simulação 4.	123
Figura 7.43: Comparação de desempenho da rede totalmente óptica e rede com nós com capacidade de regeneração do sinal óptico.....	123
Figura 7.44: Comparação de desempenho das configurações de rede 1,2 e 3 simuladas.	125
Figura 7.45: Comparação de desempenho das três configurações de rede simuladas.	126
Figura 7.46: Comparação de desempenho das configurações 1, 2 e 3 para o bloqueio por BER.	127
Figura 7.47: Probabilidades de Bloqueio das redes simuladas.....	129
Figura 7.48: Relação entre número de nós com conversão OEO, número de λ s que realizam conversão OEO e probabilidade de bloqueio.	129
Figura 7.49: Comparação entre os efeitos da BER nas arquiteturas 1 e 2.....	130
Figura 7.50: Comparação da configuração 1 com e sem a técnica de agregação waveband. ...	131
Figura 7.51: Comparação da configuração 2 com e sem a técnica de agregação waveband. ...	131
Figura 7.52: Rede nacional italiana [65].	132
Figura 7.53: Probabilidade de bloqueio para as configurações 1 a 5.	134
Figura 7.54: Probabilidade de bloqueio ao longo dos eventos da simulação da rede para as configurações 1 a 5.	136
Figura 7.55: Probabilidade de bloqueio ao longo dos eventos da simulação da rede para as configurações 6 a 11.	136
Figura 7.56: Probabilidade de bloqueio ao longo dos eventos da simulação da rede para as configurações 12 e 11.	137
Figura I.1: Formação da matriz de enlaces a partir das matrizes banda para uma conexão entre o nó inicial 4 e o nó final 2.	155
Figura II.1: Filtros de interferência de filmes finos.....	156
Figura II.2: Esquema de um multiplexador/demultiplexador waveband feito com a técnica BGT. A rotação da grade controla o espaçamento do canal enquanto a rotação do refletor faz a seleção do λ	157
Figura II.3: AWG com multiplexadores e demultiplexadores com grande número de canais separados por poucos nanômetros.	157
Figura II.4: Filtro de três portas.	157
Figura II.5 : a) Ilustração esquemática de arquitetura 2D; b) arquitetura 2D NxN fabricada pela AT&T.	158
Figura II.6: a) Ilustração de uma arquitetura 3D – 2N; b) Ilustração da reflexão de um feixe de luz usando-se um micro espelho com dois eixos de liberdade; c) Protótipo de um micro espelho.....	158

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Custo dos nós.....	34
Tabela 3.2. Tipo de nó, granularidade e custo.....	34
Tabela 3.3. Custo dos nós.....	36
Tabela 3.4. Tipo de nó, granularidade e custo.....	37
Tabela 4.1: Recursos disponíveis para os quatro tipos de nós simulados.	49
Tabela 5.1: Classes de Serviços e Taxas de bit.	60
Tabela 7.1: Classes de serviços e taxas de bit.	77
Tabela 7.2: Configurações da rede simuladas.	80
Tabela 7.3: Volume de utilização das portas dos nós simulados.	82
Tabela 7.4: Hierarquização das configurações do custo e benefício.....	83
Tabela 7.5: Custo-Benefício dos nós MG-OXC's de uma camada.	83
Tabela 7.6: Volume de utilização das portas dos nós simulados.	90
Tabela 7.7: Configurações hierarquizadas do custo e benefício.	91
Tabela 7.8: Custo-Benefício dos nós MG-OCX's de três camadas.....	91
Tabela 7.9: Configurações da rede simulada.....	97
Tabela 7.10: Volume de utilização das portas dos nós simulados.	100
Tabela 7.11: Configurações hierarquizadas do custo e benefício.	100
Tabela 7.12: Custo-benefício dos nós MG-OXC's de uma camada.....	101
Tabela 7.13: Volume de utilização das portas dos nós simulados.	106
Tabela 7.14: Configurações hierarquizadas do custo e benefício.	107
Tabela 7.15: Custo-Benefício dos nós MG-OXC's de três camadas.....	107
Tabela 7.16: Arquiteturas da rede simulada.....	113
Tabela 7.17: Parâmetros do sistema óptico usado no modelo [59].	121
Tabela 7.18: Classes de Serviços e Taxa de bit.....	122
Tabela 7.19: Arquitetura da rede e recurso dos nós.	133
Tabela 7.20: Número de eventos e cargas atribuídas.	135
Tabela I.1: Técnica de simulação por evento discreto.	153
Tabela I.2: Técnica de simulação por evento discreto após a classificação.	154

Lista de Abreviatura e Siglas

ASE	-Amplified Spontaneous Emission
AWG	-Arrayed Waveguide Grating
BER	-Bit Error Rate
BXC	-Band Cross Connect
CB	-Custo Benefício
DCF	-Dispersion Compensating Fibers
DRA	-Distributed Raman Amplifiers
DRS	-Distributed Raman Scattering
EDFA	-Erbium Doped Fiber Amplifier
FXC	-Fiber Cross Connect
LAN	-Local Area Network
MEMS	- Micro-Electromechanical Systems
MAN	-Metropolitan Area Networks
MG-OXC	-Multi Granularity Optical Cross Connect
NSFNet	-National Science Foundation Network
OC	-Optical Carrier
OEO	-Óptico-Eletrônico-Óptico
OOO	-Óptico-Óptico-Óptico
OSNR	-Optical Signal to Noise Ratio
OXC	-Optical Cross Connect
PLC	-Planar Lightwave Circuits
RWA	-Routing and Wavelength Assignment
SSMF	-Standard Single Mode Fiber
WAN	-Wide Area Network
WBS	-Waveband Switching
WC-MG-OXC	-Wavelength Conversion Multi Granularity Optical Cross Connect
WC-OXC	-Wavelength Converter Optical Cross Connect
WDM	-Wavelength Division Multiplexing
WRN	-Wavelength Routing Network
WXC	-Wavelength Cross Connect
3R	-Re-amplification, Re-shaping, Re-timing

Resumo

A interligação de várias redes de telecomunicação ampliou a cobertura, mas tornou a operabilidade entre elas complexa, principalmente por causa da arquitetura resultante, formada por várias camadas. Estas camadas lidam com protocolos e taxas de transmissão diferentes e com sinais elétricos e ópticos.

Diante desse cenário, a alternativa usual de expandir os recursos proporcionalmente ao crescimento da demanda é inviável devido ao elevado custo. Assim, soluções eficientes que agregam os benefícios das tecnologias ópticas e eletrônicas na arquitetura de nós e no gerenciamento de tráfego tornaram-se uma necessidade importante no projeto, expansão e gerenciamento de redes de telecomunicação. Os nós que permitem a comutação de tráfego na camada óptica e eletrônica e a agregação de tráfego em várias granularidades têm sido empregados para fazer o melhor uso possível dos recursos disponíveis nas redes. Esses nós são conhecidos na literatura como MG-OXCs.

Nessa pesquisa, foi proposta uma abordagem dos nós MG-OXCs de uma e três camadas com a inclusão de recursos como conversão de comprimento de onda e agregação de tráfego. Também foi proposto um método de cálculo do custo desses nós baseado no volume de utilização das portas. Posteriormente foram inseridos fatores de degradação do sinal óptico para a análise da camada física de redes com os nós MG-OXCs. Adicionalmente, para o gerenciamento de tráfego, foi proposto um esquema de escolha de comprimentos de onda chamado de canal específico e um esquema de monitoramento baseado na intensidade de tráfego. A meta principal é a redução da probabilidade de bloqueio de solicitação de conexão.

Em redes ópticas, os modelos de nós propostos conseguem diminuir o número de portas dos nós comutadores tradicionais além de realizar a comutação de tráfego de conexões de diferentes valores de largura de banda. O esquema do canal específico consegue melhorar a utilização da largura de banda dos comprimentos de onda e diminui a probabilidade de bloqueio e o esquema do monitoramento diminui o número de conexões bloqueadas devido ao aumento dos recursos.

Resultados numéricos apresentados demonstram a potencialidade dos algoritmos propostos para gerenciar recursos e rotear o tráfego das redes de telecomunicação.

Palavras-chaves: Rede óptica WDM, tráfego dinâmico, waveband, agregação de tráfego, conversão de comprimento de onda, MG-OXC roteamento, alocação de recursos, otimização, monitoramento.

Abstract

Nodes Architecture and Traffic Engineering in Optical Networks

Integrating telecommunication networks has enlarged the coverage, but has made operations more complex, mainly because of the architecture, formed by various layers. These layers deal with different protocols and transmission rates, as well as electrical and optical signals.

The usual alternative of expanding the resources proportionally to the demand is impractical due to the high cost. Therefore, efficient solutions which add to the benefits of optical and electronic technology in node architecture and traffic management are essential in the design, expansion and management of telecommunications networks. The nodes that enable traffic switching in the optical and electronic layer and traffic grooming have been used to make the best use of the available resources in the networks. These nodes are known as MG-OXCs.

In this research, an approach based on MG-OXCs was proposed with one and three layers, which include the wavelength conversion and traffic grooming. Additionally, a method to calculate the node costs based on their use of ports was proposed. The work also considered optical signal impairments in order to analyze the network physical layer with MG-OXCs nodes. For the purpose of traffic management, a scheme which sets specific wavelengths for different bandwidths and a scheme which monitors the flow of traffic were proposed. The main aim is to reduce the blocking probability of connection requests.

In optical networks, the node models proposed are able to reduce the number of ports used in usual optical cross connects and switch the traffic connections using different bandwidths. The scheme of setting specific wavelengths for different bandwidths improves the bandwidth use and the blocking probability. The scheme which monitors the flow of traffic achieves blocking probability reduction due to the increase in resources.

The numerical results presented show the feasibility of the proposed algorithms to manage resources and switch traffic in telecommunication networks.

Keywords- WDM optical networks, dynamic traffic, waveband, traffic grooming, wavelength conversion, MG-OXC, routing, resource allocation, optimization, monitoring.

1- Introdução

Nesse capítulo é apresentada a evolução e as características das redes de telecomunicações em face das exigências causadas pelo aumento de tráfego das novas aplicações. Posteriormente, são apresentadas as características das redes inserindo o conceito de wavebands e de nós MG-OXCs que serão aplicados nesse trabalho.

Também são apresentados os trabalhos que utilizam a técnica waveband desde que o tema se intensificou nas publicações. Por fim, são apresentadas as contribuições, e a organização do trabalho.

1.1- Evoluções dos Tipos de Rede

Um novo patamar de demanda por largura de banda deve ser alcançado em breve por causa da diversificação da base de consumidores de serviços de telecomunicações, da incorporação de conteúdo multimídia aos serviços via Internet, da implantação de redes de acesso por fibra óptica e da migração de equipamentos para padrões como 40 e 100 Gigabit [1]. Em consequência, as operadoras de serviços estarão novamente diante do desafio de satisfazer a demanda, garantir qualidade de serviço e reduzir custos para assegurar lucratividade e tarifas competitivas.

A demanda por largura de banda no lado do consumidor costuma forçar todas as camadas da hierarquia das redes a contribuir com soluções para evitar gargalo, especialmente a camada óptica. É para ela que converge o tráfego gerado por usuários residenciais, corporativos, governamentais e educacionais, que demandam de baixa a alta taxa de bits (Gbps). Assim sendo, a complexa hierarquia de agregação de tráfego incluindo diversas “granularidades” é formada a partir da interligação das redes de acesso (LAN), metropolitana (MAN) e de longa distância (WAN) [1].

Em [2] foi estimado que o tráfego que flui em uma MAN pode futuramente ser semelhante ao tráfego que flui em uma WAN. Caso esse fato se concretize podemos estimar que, do ponto de vista econômico, será interessante considerar as redes WANs e MANs como uma única rede, e assim, o futuro das redes de telecomunicação poderá ser de apenas duas sub-redes, a LAN e a WAN. Uma rede WAN intelígada por fibra óptica é ilustrada na Figura 1.1.

Observando a Figura 1.1 nota-se que o tráfego dos consumidores chega aos nós da WAN através dos roteadores LANs. Os roteadores das redes locais se comunicam usando os caminhos ópticos disponibilizados pelas WANs. Esses caminhos ópticos formam o tráfego da rede óptica. Os nós da rede WAN que estão diretamente conectados com os roteadores das redes locais são os roteadores de borda. Os roteadores também podem se comunicar com outras redes externas à WAN através de alguns nós selecionados. Esse tipo de tráfego é o tráfego originado ou recebido para ou de outras redes não pertencentes ao domínio da rede *backbone*.

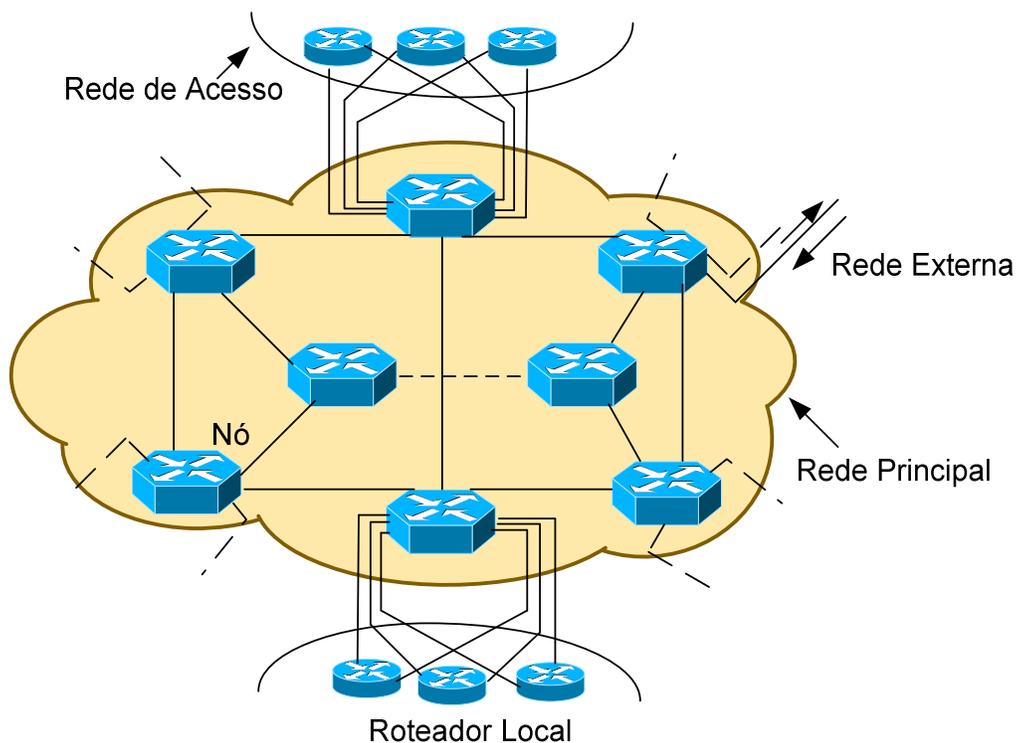


Figura 1.1: Modelo geral de rede *backbone*.

O tráfego para ou de um roteador local pode percorrer vários nós da WAN. Esses nós que gerenciam o tráfego que passa através deles são os nós do núcleo da rede WAN [3]. Nas redes ópticas atuais, os nós centrais são formados comutadores ópticos (OXCs) e os enlaces possuem fibras com a tecnologia de multiplexação WDM [4].

1.2 - Características das redes ópticas

Nas redes ópticas, as atenções têm se voltado para a arquitetura dos nós, pois parte da solução para o atendimento e gerenciamento da demanda por largura de banda está na inclusão de dispositivos versáteis de comutação e no uso de algoritmos eficientes de alocação de recursos.

Uma rede óptica avançada consegue comutar rapidamente os caminhos ópticos usando mecanismos de sinalização que habilitam cada elemento da rede a identificar e atualizar a topologia da rede e automaticamente reconfigurar os caminhos ópticos [5], [6], [7]

Os principais benefícios de uma rede óptica com essas características para as operadoras de serviços são baixos custos, rápido retorno do investimento, melhor utilização dos recursos, redução na intervenção manual, simplificação dos sistemas de gerenciamento, suporte para redes totalmente ópticas e fácil integração entre redes [8].

O fornecimento de canais ópticos em minutos ou mesmo em segundos pode significar melhor aproveitamento dos recursos como largura de banda. Recursos da rede óptica podem ser quase automaticamente fornecidos aos clientes. Por exemplo, roteadores das redes *backbone* podem necessitar de fornecimento de um comprimento de onda (λ) adicional em período de tempo relativamente curto. O comutador óptico adiciona dinamicamente um novo caminho. Quando o tráfego entre os roteadores decresce, o λ pode ser desabilitado [9]. Portanto, a possibilidade de alocar dinamicamente os recursos da rede óptica quando há mudanças na intensidade de tráfego poderá facilitar a operação da rede em comparação com redes configuradas estaticamente.

Para a grande quantidade de tráfego das redes principais, é melhor usar caminhos ópticos de alta granularidade, como 10 Gb/s ou 40 Gb/s e dessa forma rotar o λ utilizando sua máxima capacidade. Por exemplo, um caminho óptico que atenda uma conexão que demande 10 Gb/s de tráfego irá utilizar toda a capacidade de um λ de 10 Gb/s.

Apesar de reunir as vantagens e características comentadas, as redes ópticas não resolvem problemas relacionados com as características de tráfego das redes atuais que tem uma forte demanda por taxas de bits com valores menores, por exemplo, 155 Mbps (OC-3) e 622 Mbps (OC-12) [10], [11] e [12].

Dessa forma, é interessante se agregar tráfegos de menores taxas de bit em um λ de alta largura de banda para evitar o desperdício de banda. Por exemplo, em um λ de 10 Gb/s de capacidade podem ser agregadas até 64 conexões de 155 Mb/s.

Portanto, é necessário utilizar técnicas de agregação de tráfego para, em algum ponto da rede, agregar o tráfego de taxas mais baixas nos caminhos ópticos de alta granularidade e assim aumentar a eficiência da utilização do enlace [13].

Uma forma de se realizar a agregação de tráfego no domínio óptico é a utilização de *buffers* ópticos representados por linhas de atraso de fibras, mas essa técnica sofre limitações tecnológicas. Alguns críticos alegam que ela provoca um alto atraso na transmissão de taxas de bits mais altas tornando-se difícil de ser implementada [14], [15] e [16].

Assim, uma rede óptica não necessita ser totalmente óptica. Pode-se utilizar um nó com as duas tecnologias (eletrônica e óptica) [17], e assim aproveitar os benefícios conjuntos disponíveis nelas.

Outra desvantagem dos comutadores ópticos é que eles conseguem comutar uma quantidade limitada de λ s, mas uma fibra óptica possui grande capacidade de largura de banda e, portanto pode transportar centenas de λ s aumentando assim a complexidade e os custos do comutador OXC [18].

Para diminuir a complexidade dos comutadores, a técnica chamada de comutação waveband (Waveband Switching-WBS) foi proposta para reduzir o número de portas e conseqüentemente reduzir custos [19]. A principal idéia da técnica WBS é realizar o agrupamento de vários λ s em um waveband e assim comutar esses λ s em uma única porta do comutador reduzindo a quantidade de portas utilizadas [20]. A Figura 2.1 (a, b) mostra a comparação do chaveamento e transmissão de wavebands e λ s.

A linha em negrito da figura 1.2-a indica que vários λ s foram reunidos em um waveband (B), multiplexados em uma porta. Na porta de saída o waveband B foi demultiplexado em λ s isolados. A Figura 1.2-b ilustra a comutação de λ s na qual cada λ ocupa uma porta.

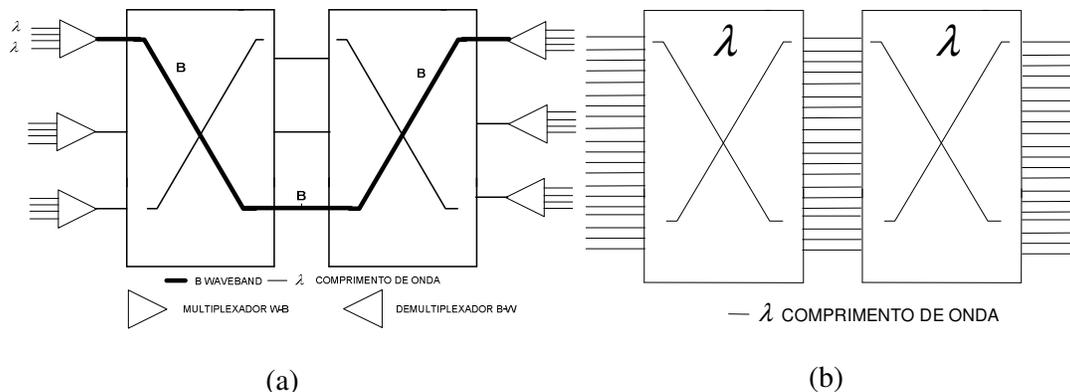


Figura 1.2: (a) Transmissão e chaveamento de wavebands. Um agregado de λ s (B) é comutado através de um canal waveband; (b) Transmissão e chaveamento de λ s. Cada λ ocupa uma porta do comutador.

1.3 – Redes Ópticas WDM com Comutação Waveband

O problema de estabelecer um conjunto de demandas (solicitações de conexão) em uma rede WDM com a funcionalidade WBS pode ser dividido em:

1. Procurar por caminhos disponíveis (roteamento);
2. Procurar por um λ isolado disponível ao longo dos caminhos e alocação de λ s;
3. Procurar por um waveband disponível ao longo dos caminhos e alocação de waveband.

O problema completo é chamado de roteamento e alocação de λ e waveband (RWWBA- routing wavelength and waveband assignment) [21].

Para realizar comutação e roteamento waveband de forma eficiente foram propostos em [22] os comutadores ópticos de várias granularidades (MG-OXC). Para que um OXC tradicional se torne um comutador MG-OXC é necessário que o OXC seja equipado com um comutador waveband, além de possuir multiplexadores e demultiplexadores capazes de agregar λ s em wavebands e desagregar wavebands em λ s.

A arquitetura dos nós MG-OXCs utilizada nesse trabalho é híbrida, ou seja, é considerada a comutação waveband totalmente óptica e a comutação, agregação de tráfego e conversão de λ s no domínio eletrônico [22].

Os comutadores ópticos de várias granularidades (MG-OXC) são divididos em MG-OXC de camada simples e MG-OXC de multicamadas. Os nós MG-OXC serão explicados com detalhes no Capítulo 2.

1.4 - Trabalhos Relacionados e Contribuições da Pesquisa

A partir de 1999 começaram a se intensificar na literatura o aparecimento de trabalhos que tratavam do conceito waveband e de sua integração com os OXCs existentes na rede. Os problemas de RWA que antes tratavam apenas de rotear λ s pelos caminhos ópticos da rede passaram a ser denominados problemas de RWWBA com a introdução do conceito de waveband.

Assim, as principais idéias dos artigos relacionados à técnica waveband analisados nesse trabalho são descritas abaixo:

1. Análise do conceito e da forma de se realizar a comutação envolvendo comutadores híbridos de várias camadas [23], [24], [25], [26], [27], [28] e [29];
2. Tipos de agregação uniforme e não-uniforme de λ s em wavebands e a relação do tipo de agregação com a minimização do uso das portas dos comutadores [30], [31], [32] e [33];
3. Impacto que a adoção da técnica waveband tem no custo da porta do comutador e as formas de minimizar esse custo [34], [35] e [36];
4. Comparação da solução do problema de agregação de λ s em wavebands utilizando a técnicas de programação linear e heurísticas [37] e [38];
5. Descrição de proteção em redes que possuem λ s e wavebands e conversão de λ s e wavebands [39];
6. Protocolos de sinalização e protocolos de gerenciamento de enlaces para a implementação dos MG-OXCs dentro das regras do protocolo GMPLS [40] e [41].

A partir da análise desses trabalhos verificou-se que, apesar de tratarem das configurações de MG-OXCs de uma e três camadas, tanto no aspecto de desempenho quanto no de custo em diversos cenários, eles não consideram outras funcionalidades dos nós. Nesse trabalho, funcionalidades como agregação de tráfego e conversão de λ são tratadas em conjunto com a técnica de agregação waveband, proporcionando assim analisar desempenho e custo-benefício de várias configurações. Propomos uma forma de calcular o custo-benefício da rede que considera a tecnologia de comutação, a função das portas, o volume de utilização das portas e a quantidade de operações que são realizadas para agregar λ s em wavebands e para desagregar wavebands em λ s.

Adicionalmente, consideramos fatores de degradação da qualidade do sinal óptico para analisar o impacto sobre a técnica waveband. Analisamos o desempenho de redes que utilizam a técnica waveband em nós nos quais a comutação é totalmente óptica e em nós com comutação nos domínios eletrônico e óptico. Propomos ainda configurações de nós com diferentes tecnologias de comutação e disponibilidades de recurso.

Também foi propusemos uma heurística para o uso da largura de banda dos λ s em uma rede com nós que realizam a comutação waveband. Essa heurística foi denominada “canal específico” e seu desempenho foi comparado com as de outras heurísticas conhecidas.

Por fim, considerando a característica dinâmica de aumento do tráfego em uma rede de telecomunicações, propusemos um sistema de monitoramento que libera banda para um número pré-definido de nós com volume muito grande de tráfego. Dessa forma, o desempenho da rede é mantido em condição satisfatória em situação de aumento da intensidade de tráfego.

Assim, agregando todas essas técnicas, foi possível desenvolver uma ferramenta de trabalho que pudesse ser utilizada para mais diversas configurações de rede com diversas arquiteturas de nó e diversas maneiras de rotear o tráfego. Com essa ferramenta é possível comparar o desempenho de diversas configurações de redes ópticas.

Resumindo as contribuições:

1. Proposta de nós MG-OXC com uma e três camadas incluindo o recurso de agregação de tráfego e conversão de λ ;
2. Análise da degradação do sinal óptico em redes com comutação waveband e proposta de um comutador MG-OXC totalmente óptico;
3. Proposta da heurística do canal específico para o uso da largura de banda dos λ s;
4. Proposta de um sistema de monitoramento baseado na intensidade de tráfego.

1.5-Organização do Texto

Os capítulos da tese estão organizados da seguinte maneira.

Capítulo 2: Características dos Nós Utilizados na Técnica de Agregação Waveband. Esse capítulo descreve e compara comutadores elétricos, ópticos e híbridos, descreve de forma geral os nós MG-OXCs de uma e três camadas, as técnicas de agregação de λ s em wavebands e o roteamento em redes em que a técnica waveband está presente.

Capítulo 3: Implementação da Técnica de Agregação Waveband. Nesse capítulo é mostrada a implementação da rede óptica WDM com a descrição dos nós MG-OXCs de uma e três camadas com as funcionalidades de waveband, agregação de tráfego e conversão de λ . O detalhamento das operações realizadas pelos nós MG-OXCs e OXCs também são mostradas nesse capítulo.

São apresentados os tipos de conexões quando a rede é equipada com nós MG-OXCs de uma ou três camadas, a proposta de análise de custo para os nós MG-OXCs e OXCs e a descrição e o fluxograma do algoritmo desenvolvido para a implementação desses nós em uma rede óptica WDM.

Capítulo 4: Inclusão das restrições físicas na simulação das redes ópticas. Nesse capítulo são descritos vários tipos de nós e gerenciamentos de conexões com diferentes tecnologias de comutação, diferentes capacidades de agregação de tráfego tanto no domínio eletrônico quanto a agregação de λ s em wavebands. Será feita a modelagem da camada física e utilizada uma equação para o cálculo da BER que será uma restrição a mais incluída no algoritmo desenvolvido.

Capítulo 5: Heurística do Canal Específico Para a Escolha do λ . Nesse capítulo serão tratados os conceitos do método escolha do λ em uma rede óptica. Serão analisados dois métodos conhecidos que são o first-fit e o menos utilizado. Outro terceiro método é proposto neste texto, o do canal específico, e será analisado e comparado com os outros métodos.

Capítulo 6: Esquema de Monitoramento de Redes WDM Baseado na Intensidade de Tráfego. O esquema de monitoramento de nós e liberação de recursos proposto é explicado nesse capítulo. Seu desempenho é exaustivamente testado em uma rede genérica para que posteriormente possa ser aplicado em uma rede de comutação waveband.

Capítulo 7: Resultados Numéricos. Nesse capítulo serão mostrados os resultados numéricos dos conceitos apresentados nos capítulos anteriores em conjunto com a técnica waveband.

Capítulo 8: Conclusões. Resume os principais resultados dessa tese e propõem linhas gerais para trabalhos futuros.

1.6-Artigos Publicados Durante essa Pesquisa

Está pesquisa gerou até essa data os seguintes artigos sobre o tema e assunto correlato apresentados em conferências.

1. E. M. G. de Queiroz, H. M. Almeida Neto e A. C. César, “Rede Óptica Comutada por Circuito e por Rajada”, XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2009, Blumenau.
2. H. M. Almeida Neto, E. M. G. de Queiroz, César e A. C. César, “Controle e Admissão de Conexões para Redes Ópticas WDM Baseado em Roteamento pelo Caminho Específico”, 13^o SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o 8^o CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2008, Florianópolis.
3. E. M. G. de Queiroz, César, H. M. Almeida Neto e A. C. César, “Algoritmo de Alocação Dinâmica de Banda para Redes de Terceira Geração (3G)”, 13^o SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o 8^o CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2008, Florianópolis.
4. H. M. Almeida Neto, E. M. G. de Queiroz, César e A. C. César, “Análise de Rede Brasileira de Comunicação Óptica Integrada com Rede de Satélites LEO”, XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2008, Rio de Janeiro.
5. E. M. G. de Queiroz, César, H. M. Almeida Neto e A. C. César, “Alocação Dinâmica de Largura de Faixa para Redes Sem Fio”, XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2007, Recife.
6. H. M. Almeida Neto, E. M. G. de Queiroz, César e A. C. César, “Análise de Custo-benefício de Rede Óptica WDM com Agregação de Tráfego e Agregação de Comprimentos de Onda”, XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2007, Recife.

7. H. M. Almeida Neto, E. M. G. de Queiroz, César e A. C. César, "Cost-Benefit Analysis of WDM Optical Network Simultaneously Using Waveband Grooming and Wavelength Conversion", IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference, 2007, Salvador.

2-Características da Técnica de Agregação Waveband

Nesse capítulo são apresentados os conceitos de nós com comutação óptica e com comutação eletrônica e mostradas as suas vantagens e desvantagens. Após essa definição será apresentado o conceito do nó híbrido que reúne as vantagens das comutações eletrônicas e ópticas em um único nó. O nó híbrido capaz de comutar wavebands e λ s é definido na literatura como MG-OXC [22].

Após mostrar a tecnologia de comutação dos nós são descritas as arquiteturas dos nós MG-OXCs de uma camada e de três camadas. São apresentados os conceitos gerais de seu funcionamento sem os detalhes específicos de sua implementação.

Posteriormente, é explicada a técnica de agregação de λ s em wavebands em que são definidos os tipos de agregação que podem ser feitos e suas principais características, vantagens e desvantagens e por fim os modelos de roteamento que podem ser implementados utilizando nós MG-OXCs.

Portanto, esse capítulo define os principais conceitos e características dos nós MG-OXCs que serão utilizados nesse trabalho sem entrar nos detalhes da implementação dos mesmos que será feito em capítulos posteriores.

2.1-Arquitetura de Nós Híbridos

Os nós de uma rede principal (*backbone*) consistem de equipamentos de transmissão WDM e equipamentos de comutação [42]. A Figura 2.1-a [43] mostra um comutador eletrônico. Nesse comutador quando um sinal WDM chega em uma fibra de entrada ele encontra um demultiplexador WDM (DEMUX) e os λ s são separados. Cada λ entra em um receptor onde são convertidos em sinais eletrônicos. A seguir, são convertidos novamente em sinais ópticos (conversão OEO) por uma interface óptica [42]. Ao final da interface da entrada um conversor óptico para eletrônico (OE) converte o sinal novamente para eletrônico e o envia para ser comutado. No lado de saída do comutador, os processos de conversão EO e OEO são repetidos.

Se um comutador óptico é usado, existem três diferentes tipos de configuração. A configuração da Figura 2.1-b é similar à eletrônica, na qual 4 portas OEO são necessárias. A próxima configuração, Figura 2.1-c, remove os conversores OEO que estão juntos ao comutador e comuta diretamente o sinal óptico da interface óptica. Na

configuração da Figura 2.1-d são removidos todos os conversores OEO que estavam no equipamento de transmissão WDM e no equipamento de comutação, comutando os λ s que saem da fibra diretamente. Essa configuração é a solução totalmente óptica.

Comutadores eletrônicos apresentam limitações de espaço e elevado consumo de potência. Apesar dessas limitações, a tecnologia dos comutadores eletrônicos é madura e pode dispor de funções como agregação de tráfego e conversão de λ [44].

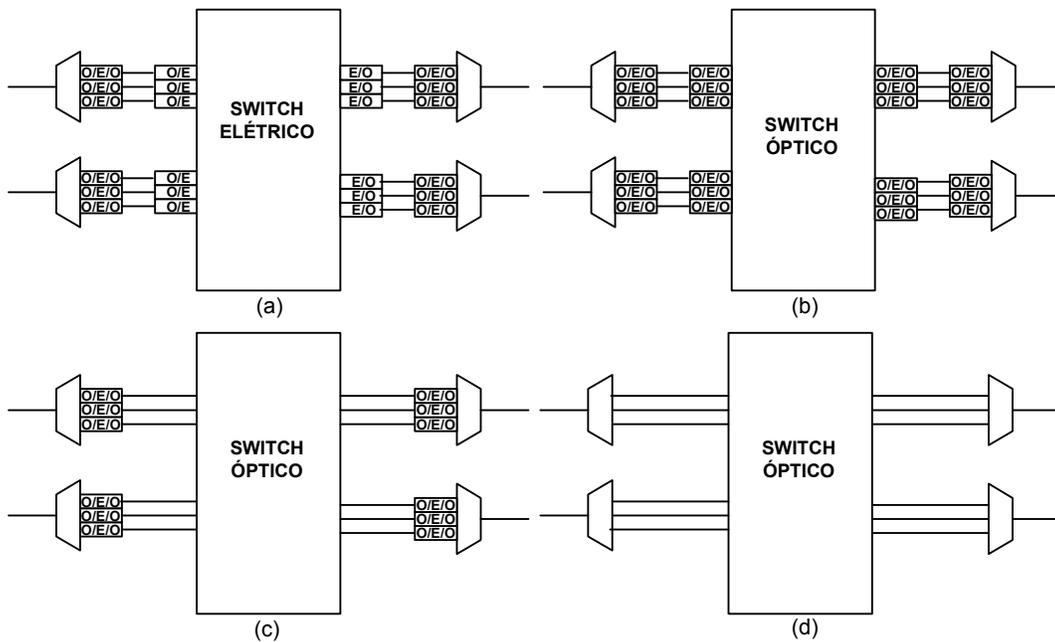


Figura 2.1: Diferentes Tipos de Arquiteturas de Comutadores [43].

Como tecnologia adicional à comutação eletrônica, o comutador totalmente óptico tem despertado interesse ao longo dos últimos anos. A comutação totalmente óptica (OOO) (Figura 2.1-d) supera várias limitações da comutação OEO em termos de taxas de bits e transparência dos protocolos.

Analisando as características descritas conclui-se que há motivação em se utilizar as 2 tecnologias.

Uma arquitetura que une as vantagens do comutador óptico com as vantagens do comutador elétrico é mostrada na Figura 2.2. O nó é composto de um painel de emendas de fibras, um comutador waveband, um comutador OEO com capacidade de agregação de tráfego e conversão de λ e multiplexadores e demultiplexadores de waveband e λ .

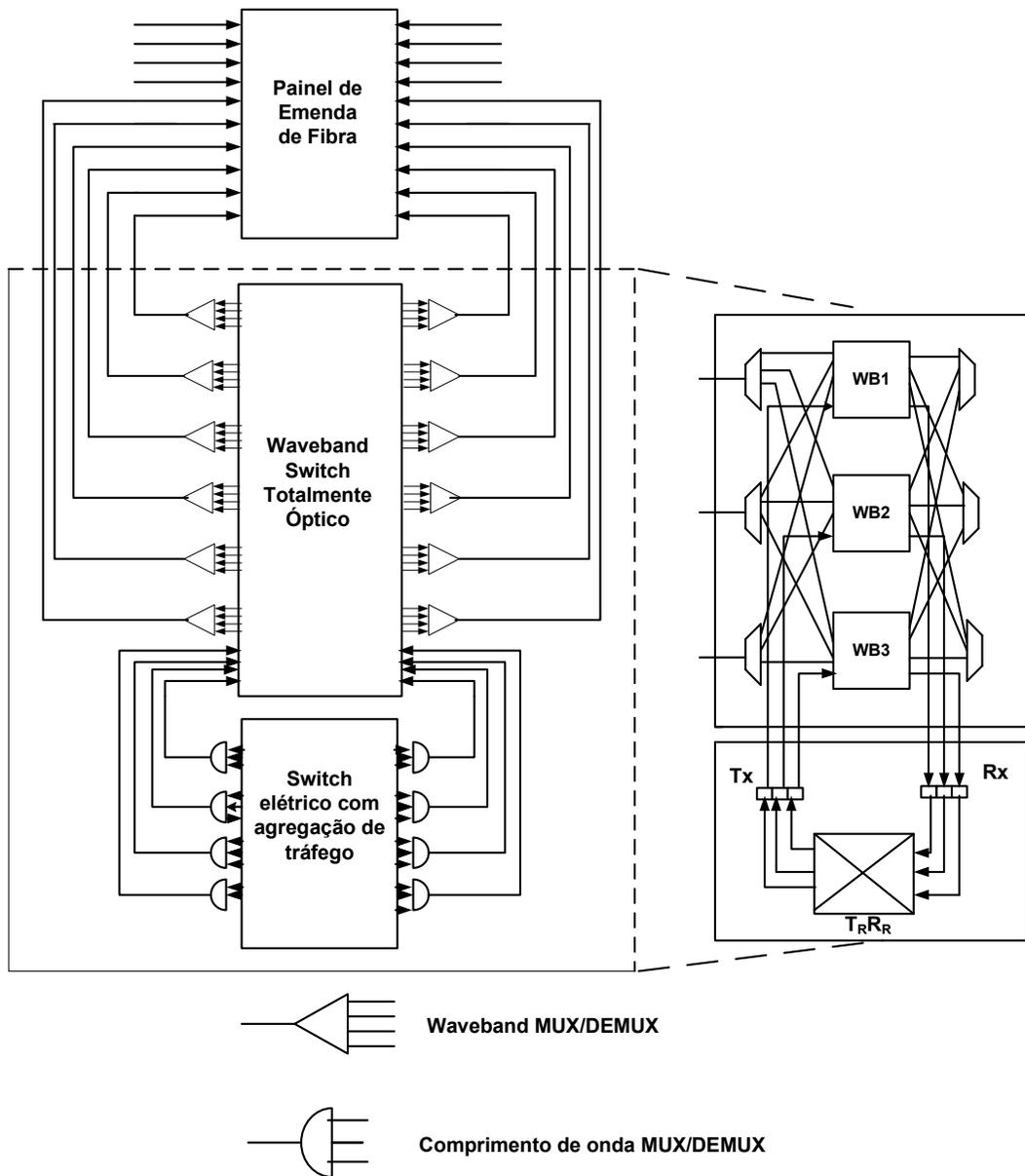


Figura 2.2: Arquitetura do comutador óptico que tem a função WBS, comutação OEO e agregação de tráfego [45].

O número de portas de entrada e saída da configuração híbrida mostrada na Figura 2.2 é determinado pelo número de fibras de entrada e de saída, número de λ s que serão adicionados ou retirados das portas e número de portas que possuem conversão OE. Essa configuração equilibra portas totalmente ópticas e portas que permitem conversão OE podendo aproveitar suas vantagens conjuntas.

2.2-Arquiteturas de Comutadores MG-OXC

As duas principais arquiteturas dos MG-OXC são o MG-OXC de três camadas e o MG-OXC de uma camada.

2.2.1 - MG-OXC de Três Camadas

A Figura 2.3 mostra um MG-OXC de três camadas que inclui as camadas de comutação de λ s (WXC), comutação de waveband (BXC) e comutação de fibra (FXC). As camadas WXC e BXC são formadas por comutadores, multiplexadores e demultiplexadores. A camada WXC possui um comutador de caminhos ópticos que passam pela camada e portas para adicionar ou retirar λ s. A camada BXC possui um comutador para os wavebands que passam pela camada e portas para adicionar ou retirar wavebands.

Há também nessa configuração de MG-OXC as portas de waveband para λ , necessárias para demultiplexar wavebands em λ s e portas λ para waveband que multiplexam λ s da camada WXC para wavebands. A camada FXC é usada para comutar, adicionar e retirar o tráfego das fibras para as camadas BXC e WXC.

O MG-OXC de três camadas irá comutar o tráfego contido nos λ s e nos wavebands da fibra usando uma porta do comutador da camada FXC. Caso seja necessário adicionar ou retirar algum λ da fibra, o tráfego será demultiplexado até a camada WXC. Nesta será adicionado ou retirado um λ específico e os restantes, que são de passagem serão comutados pela camada WXC. Se não for necessário retirar ou adicionar λ s, o tráfego da fibra poderá ser demultiplexado em wavebands e comutado pela camada BXC. Se for necessário, o waveband é demultiplexado em λ s e um λ específico será adicionado ou retirado. Os λ s restantes, que são de passagem, serão comutados pela camada WXC.

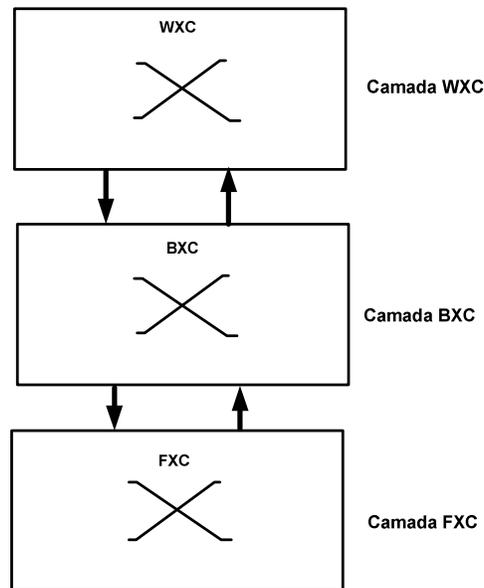


Figura 2.3. Comutador MG-OXC de três camadas. As camadas WXC, BXC e FXC são separadas e utilizam multiplexadores e demultiplexadores para comutarem λ s e wavebands.

2.2.2-MG-OXC de Uma Camada

Comparado com o MG-OXC de três camadas, o MG-OXC de uma camada, mostrado na Figura 2.4, tem todas as três camadas integradas em um único equipamento. A matriz de chaveamento inclui três divisões lógicas que são a FXC, BXC e WXC, respectivamente. Porém, a maior diferença em relação ao MG-OXC de três camadas é a eliminação das portas necessárias para demultiplexar wavebands em λ s e multiplexar λ s em wavebands entre as diferentes camadas, o que resulta em uma arquitetura mais simples para implementar, configurar e controlar.

Outra vantagem do MG-OXC de uma camada é a melhor qualidade do sinal porque todos os caminhos ópticos passam através de um equipamento feito por um único fabricante, diferentemente do MG-OXC de três camadas [46].

No MG-OXC o tráfego de algumas fibras de entrada precisa ser preconfigurado, como o tráfego que será retirado separado em wavebands ou λ s enquanto que o tráfego remanescente irá passar pelo nó. As outras fibras de entrada têm todo o seu tráfego passando ou sendo retirado inteiramente.

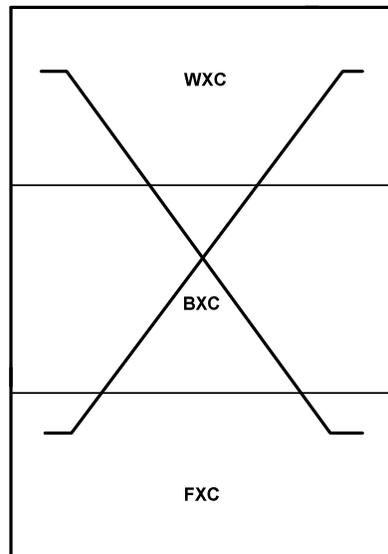


Figura 2.4. Comutador MG-OXC de uma camada. Nessa configuração não existe comunicação entre as camadas WXC, BXC e FXC.

Assim, o funcionamento de um MG-OXC de uma camada é simples, mas não é flexível porque não permite que os λ s sejam agrupados e desagrupados dentro de bandas que não são predefinidas.

2.3-Agregação de Comprimentos de Onda em Wavebands nos Nós MG-OXCs

O benefício da agregação de λ s em wavebands é maximizado se todos os λ s forem agregados dentro do waveband no nó fonte e comutados de forma totalmente óptica nos nós MG-OXCs intermediários. Assim as portas OEO dos MG-OXCs só seriam utilizadas para retirar ou adicionar λ s nos nós finais.

Infelizmente, esse tipo de função do equipamento é difícil de ser alcançado devido ao comportamento real do tráfego da rede onde nem sempre os λ s agregados ao waveband suportam a demanda do tráfego. Também, há a restrição de continuidade de waveband, se não há conversão de waveband disponível no domínio óptico [47]. Como resultado dessas restrições, as portas do MG-OXC que fazem conversão OEO precisam ser utilizadas para não degradar o desempenho da rede.

Um MG-OXC pode agregar λ s em wavebands em 2 formas: uniforme e não-uniforme. Nos 2 tipos, a granularidade é um importante fator para que ocorra a mínima utilização de portas do equipamento. Na uniforme, todos os wavebands agregam o

mesmo número de λ s e, na não-uniforme, diferentes, como mostra a Figura 2.5. Comparada com a agregação uniforme, a agregação não-uniforme é mais flexível. Entretanto, essa flexibilidade de agregação não necessariamente significa economia de custos. Além disso, a implementação e controle são difíceis sob tráfego dinâmico [48]. Por esse motivo, a agregação uniforme foi escolhida para ser utilizada nesse trabalho.

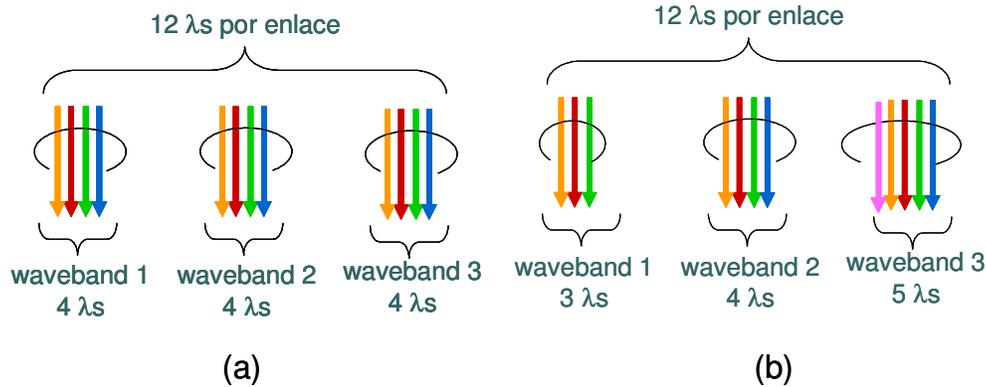


Figura 2.5: (a) Waveband uniforme com granularidade igual a quatro (b) Waveband não uniforme com diferentes granularidades.

O benefício da agregação depende de como os λ s são roteados ao longo do caminho; até que ponto a agregação em waveband é benéfica para a rede sem degradar o desempenho e quais são as estratégias de agrupamento dos wavebands. O principal desafio, portanto, é maximizar o benefício da agregação waveband para uma topologia de rede e para padrão de tráfego baseado em uma eficiente técnica de agregação, roteamento e alocação de wavebands e de λ s.

2.4 - Algoritmos de Roteamento e Classificação da Rede com Nós MG-OXCs

Baseado na seqüência de agregação de wavebands e roteamento, algoritmos de roteamento que envolvem waveband podem ser classificados em dois modelos: integrado e separado [49].

No modelo de roteamento integrado, as rotas são computadas para os caminhos waveband e λ no mesmo módulo. As decisões de roteamento são baseadas nos recursos disponíveis dos wavebands e λ s. O roteamento integrado permite o uso dos recursos da rede de uma forma mais otimizada. Entretanto, ele necessita de um algoritmo de

roteamento mais complexo. Esse é o modelo de roteamento que será utilizado nesse trabalho.

No modelo de roteamento separado, existem dois módulos independentes atuando nas camadas waveband e de λ s. Primeiro, o módulo de λ computa a rota para a demanda de tráfego. Depois, o módulo waveband determina a possibilidade de agregação dos λ s dentro dos wavebands.

Dependendo do número de nós MG-OXCs existentes, a rede pode ser classificada em heterogênea e homogênea. No caso homogêneo, todos os nós são MG-OXC. Assim, um caminho waveband pode ser estabelecido entre nós. No caso heterogêneo, alguns nós são MG-OXC. Assim, um caminho waveband só pode ocorrer entre os nós que são MG-OXC.

Para uma rede WBS heterogênea realizar os dois tipos de conexão, waveband e λ , apenas uma fração de λ s pode ser agrupada em wavebands. Portanto, um enlace de fibra pode conter λ s e wavebands ativos, satisfazendo a relação

$$BG \leq W \quad (2.1)$$

na qual B é a quantidade de wavebands, G é a granularidade do waveband e W é o número total de λ s na rede.

O número de λ s agregados em um waveband em relação ao total de λ s que a fibra possui é dado pela taxa r

$$r = \frac{BG}{W} \quad (2.2)$$

na qual $0 \leq r \leq 1$. Dependendo do tipo de MG-OXC utilizado o número de λ s agregados ao waveband é especificado anteriormente. Por exemplo, um waveband b_i pode ser formado de G λ s próximos $w_{(i-1)G}, w_{(i-1)G+1}, \dots, w_{iG-1}$.

A classificação utilizada de algoritmos de roteamento em tempo real (on line) e fora do tempo real (off line) também é utilizada nas redes com nós MG-OXC. No caso on line o roteamento é feito no tempo de duração da chamada e no caso off-line a rota não é computada no tempo de duração da chamada para a melhor utilização dos recursos da rede. Nesse trabalho é feito o roteamento em tempo real.

3 - Implementação da Técnica Waveband

Nesse capítulo serão detalhadas as implementações propostas dos tipos de nós utilizados na simulação e a implementação da técnica waveband em um algoritmo de controle e admissão de chamadas.

Serão descritas a arquitetura de rede com λ s e wavebands, os tipos de nós que compõem as redes waveband com nós MG-OXCs de uma e três camadas, os tipos de conexão, o gerenciamento de conexão de redes waveband, a análise do custo da arquitetura de nós, o cálculo da relação custo-benefício e a descrição do algoritmo implementado. Todas as explicações dos nós OXCs e MG-OXCs de uma e três camadas serão feitas considerando 12 λ s por nós.

3.1- Definições dos Termos Utilizados

Essa seção será dedicada à definição dos termos utilizados para explicação das arquiteturas de nós propostas nesse capítulo.

O termo caminho waveband é definido como o caminho óptico em que o tráfego da rede é transportado em λ s agregados aos wavebands e o termo caminho λ é definido como o caminho óptico em que o tráfego da rede é transportado em λ s isolados. Quando ocorrer uma conexão entre nós apenas por caminhos wavebands seu transporte e comutação será no domínio óptico e quando ocorrer uma conexão entre nós apenas por caminhos λ s sua comutação será no domínio eletrônico e seu transporte no domínio óptico.

Os nós tratados nesse capítulo são híbridos possuindo a capacidade de realizar conversão de λ e agregação de tráfego no domínio eletrônico nos λ s isolados e comutação waveband no domínio óptico nos λ s agregados ao waveband. Portanto, não haverá conversão de λ s no domínio óptico.

A partir desse item o termo troca de λ será utilizado no lugar do termo conversão de λ para tratar essa operação sem destacarmos um dispositivo específico para sua realização.

A função de agregação de tráfego no domínio eletrônico é feita nas portas que comutam os λ s não agregados ao waveband. As principais características dessa técnica são a granularidade da agregação que indica o menor valor de largura de banda da conexão que pode ser transportada em um λ e o fator de agregação (g) que indica

quantas conexões podem ser agregadas em cada porta. Por exemplo, um λ com largura de banda de 2,5 Gbps pode transportar até 16 conexões de 155 Mbps em um caminho óptico se o fator de granularidade (g) for igual a 16. A Figura 3.1 ilustra o exemplo de uma conexão de uma porta do nó OXC ou de uma porta do nó MG-OXC em que o λ não está agregado ao waveband.

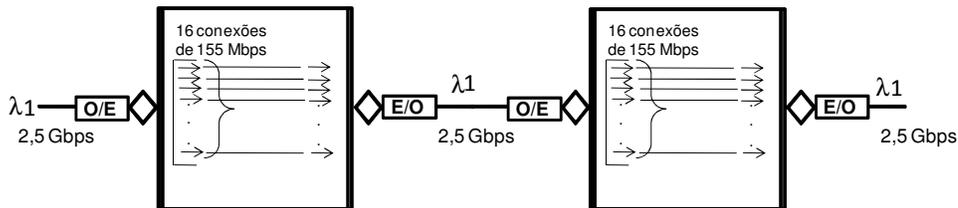


Figura 3.1: Conexão entre portas de nós OXC ou de portas dos nós MG-OXCs com λ s isolados em que 16 conexões de 155 Mbps são agregadas e transportadas por um caminho óptico de 2,5 Gbps de largura de banda.

A função de troca de λ é feita no domínio eletrônico. A conexão de 2,5 Gbps é agregada na porta de saída do nó em um λ diferente do λ da porta de entrada e segue seu caminho através desse λ diferente. A Figura 3.2 ilustra a troca de λ .

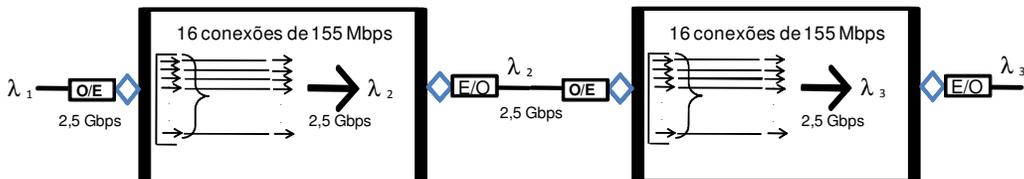


Figura 3.2: Conexão entre portas de nós OXC ou de portas dos nós MG-OXCs com λ s isolados em que 16 conexões de 155 Mbps chegam em um caminho óptico através de λ_1 são desagregadas e agregadas novamente no comprimento de onda λ_2 e seguem até o próximo nó.

Nesse contexto são definidos e analisados quatro tipos diferentes de nós: MG-OXC de uma e três camadas, WC-MG-OXC de uma e três camadas, OXC e WC-OXC. O nó MG-OXC possui algumas portas com λ s agregados aos wavebands e algumas portas com λ s isolados com capacidade de agregação de tráfego sem o recurso da troca de λ s. O nó WC-MG-OXC tem como única diferença a característica dos λ s isolados poderem realizar troca de λ s. Nos nós OXCs só existem portas com λ s isolados com o recurso de agregação de tráfego e nos nós WC-OXC é inserido o recurso da troca de λ s.

3.2-Arquitetura de Rede: Comprimento de Onda e Waveband

Um caminho waveband ocupa apenas duas (entrada e saída) portas de um MG-OXC em um nó. Uma rede em malha na qual o tráfego é transportado por caminhos ópticos que contem λ s e wavebands é mostrada na Figura 3.3. O tráfego entre os nós 1 e 3 é transportado pelo waveband formado por λ_1 e λ_2 e entre os nós 1 e 2 por λ_3 e λ_4 . O nó 2 é de passagem para o waveband. Os nós 1, 2 e 3 são formados por MG-OXC com portas de λ s isolados que podem realizar agregação de tráfego e troca de λ s. O tráfego entre os nós 5 e 4, 3 e 5 é transportado via λ por λ_3 e λ_5 . O nó 4 executa (de/multi)plexação de λ_3 e é de passagem para λ_5 , que transporta tráfego entre os nós 3 e 5.

Essa topologia de rede ilustra como o tráfego é transportado pelos λ s e pelos wavebands. O número de λ s agregados ao waveband pode variar para cada nó sendo que os caminhos ópticos que trafegam por caminhos waveband fazem o percurso na rede e a comutação no nó no domínio óptico. Os λ s isolados trafegam na rede no domínio óptico e quando chegam aos nós para a comutação passam pelo processo de conversão OEO e assim podem agregar tráfego e trocar λ . A Figura 3.4 ilustra a comutação de wavebands e λ s.

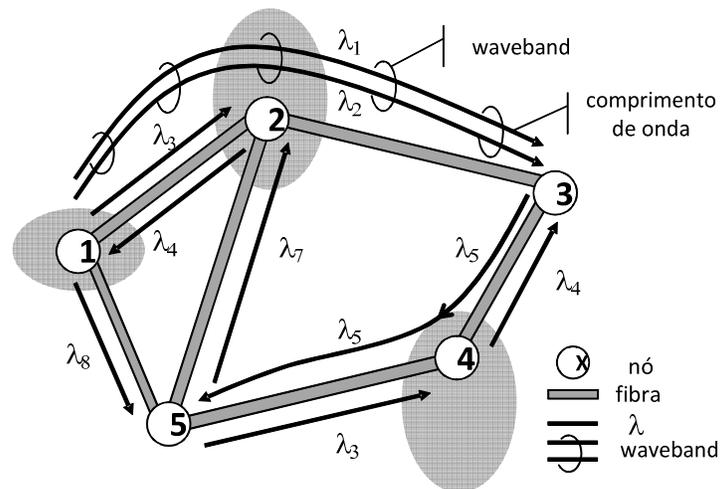


Figura 3.3. Arquitetura de rede: caminhos ópticos waveband e λ s. O nó 1 é MG-OXC e está usando as portas waveband para agregar λ_1 e λ_2 ; o nó 2 é de passagem para o waveband; o nó 3 executa demultiplexação waveband (λ_1 e λ_2); o nó 4 executa a de/multiplexação (λ_3 e λ_4) e é de passagem para λ_5 .

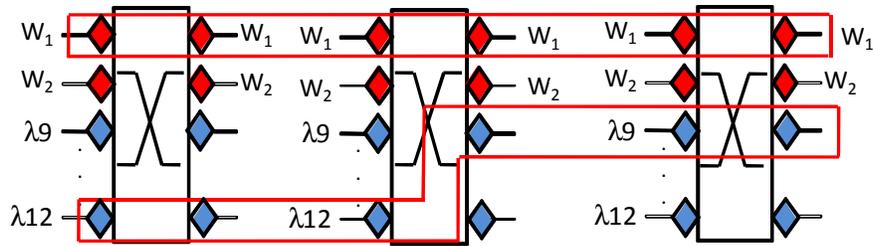


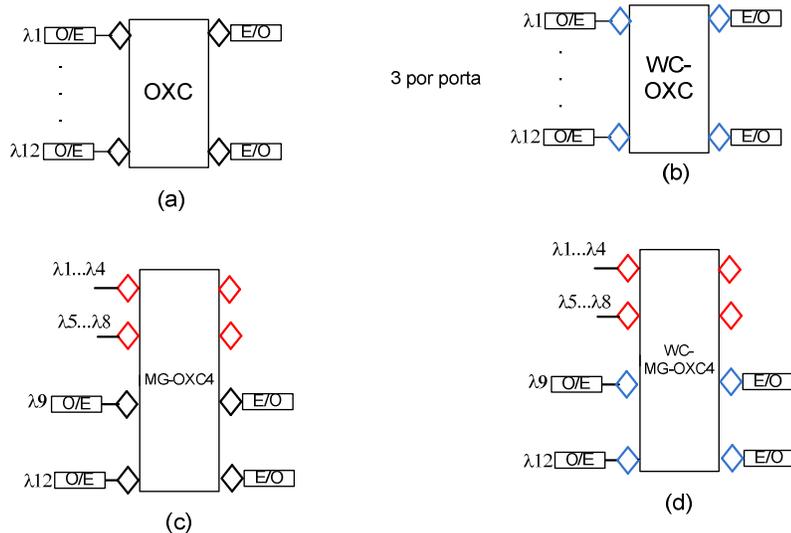
Figura 3.4: Conexão waveband totalmente óptica e conexão λ no domínio eletrônico. As portas em vermelho são conexões com caminho waveband e as portas em azul são os caminhos λ s.

3.3-Tipos de Nós que Compõem as Redes Waveband Simuladas

Nesse item são descritos os nós que compõem as redes waveband simuladas. Eles são separados em dois grupos distintos: nós MG-OXC de uma camada e nós MG-OXC de três camadas. Cada grupo de nós apresentado será utilizado para a simulação de diferentes arquiteturas.

3.3.1-MG-OXC de Uma Camada

Os nós são formados pela combinação de 2 MG-OXCs com granularidade quatro e dois OXCs convencionais, sendo: nós com waveband do tipo MG-OXC; nós com waveband do tipo WC-MG-OXC; nós sem waveband do tipo OXC e nós sem waveband do tipo WC-OXC. A Figura 3.5 mostra a arquitetura dos nós.



Portas \square Comprimento de onda \diamond Waveband \diamond Troca de Comprimento de Onda

Figura 3.5: Nós MG-OXC de uma camada sem e com troca de λ . As portas em azul representam portas com troca de λ , as portas em cinza são waveband e as portas em branco são de λ isolado.

A Figura 3.6 mostra a arquitetura dos nós para um número diferente de λ s agregados aos dois canais waveband que cada nó possui. Os nós formados pela combinação de MG-OXCs com diferentes números de λ s agregados ao waveband e OXCs convencionais, sendo: nós sem waveband (OXC) e nós MG-OXC i , nos quais $i=2$ a 6 e indica o número de λ s agregados ao waveband. Portanto, as configurações de nós ilustradas nas Figuras 3.5 e 3.6 são as utilizadas para a simulação dos nós MG-OXC de uma camada na qual as conexões são restritas apenas as portas waveband-waveband e λ - λ , não sendo possível a comunicação entre as portas λ e as portas waveband.

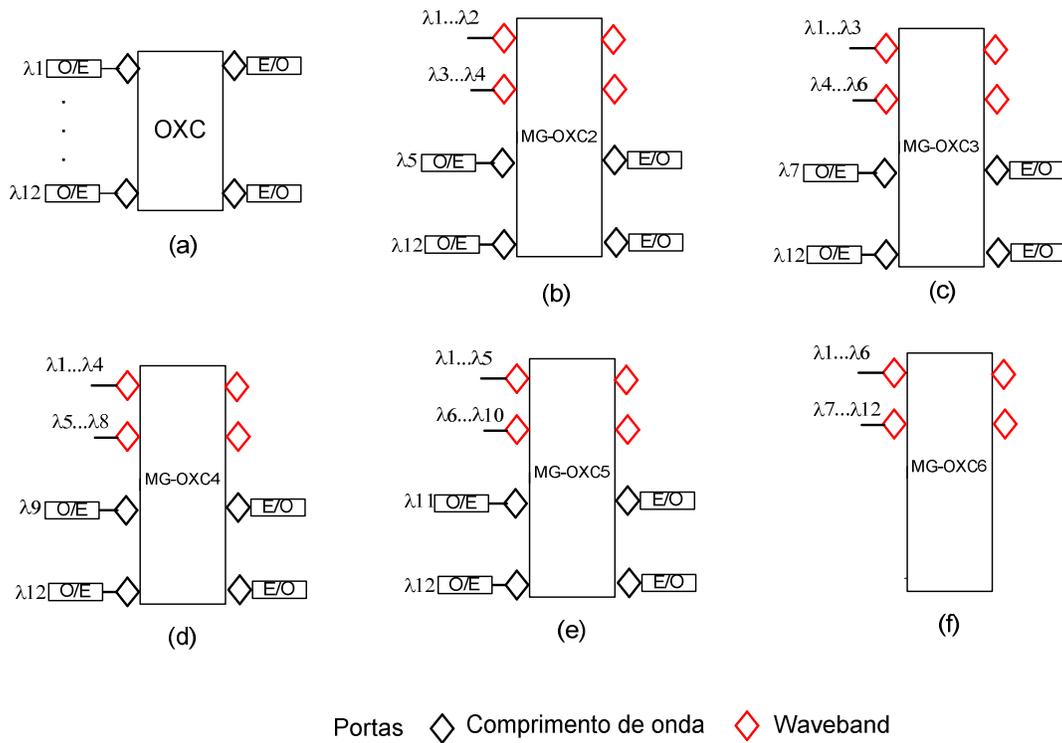


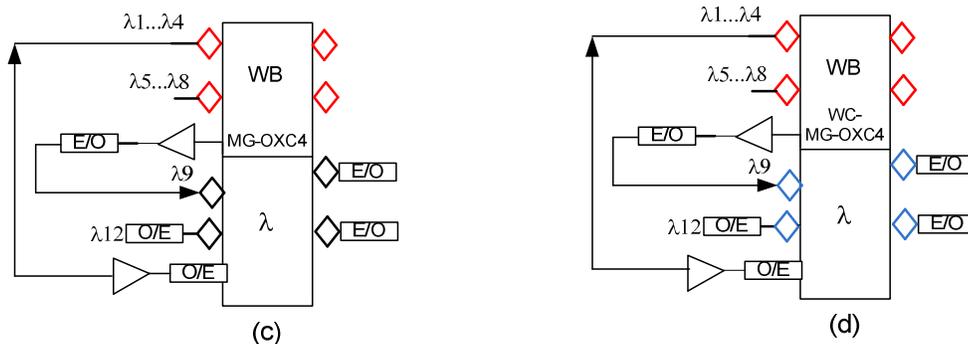
Figura 3.6: Nós MG-OXCs de uma camada com diferentes valores de granularidade.

3.3.2-MG-OXC de Três Camadas

As configurações dos nós MG-OXCs de três camadas são mostradas nas Figuras 3.7 e 3.8. A configuração da Figura 3.7 possui quatro λ s agregados às duas portas waveband e nós OXCs. A principal diferença em relação às configurações dos nós MG-OXC de uma camada é a presença de demultiplexadores de waveband para λ e de multiplexadores de λ para wavebands. Esses de/multiplexadores permitem que as camadas λ e waveband verifiquem a possibilidade de passagem de conexões entre elas.

Se uma conexão se inicia em λ agregado ao waveband, mas no nó seguinte não houver banda suficiente para alocar essa conexão no waveband ele é demultiplexado da camada waveband para a camada do λ . Em seguida, verifica-se a possibilidade de alocar a conexão em algum λ isolado. Caso não haja essa possibilidade, a conexão é bloqueada. Caso a conexão se inicie em um λ isolado e não haja banda suficiente, um waveband é demultiplexado para a camada de λ e verifica-se a possibilidade de alocar a conexão em um dos λ s que estavam reunidos ao waveband. Posteriormente, esses λ s são novamente multiplexados em wavebands. As configurações da Figura 3.8 são de MG-OXC de três camadas com números diferentes de λ s agregados ao waveband por nó.

Portanto, com essa função adicional espera-se que o MG-OXC de três camadas tenha um desempenho melhor que o MG-OXC de uma camada, embora o número de operações para alocar conexões seja maior.



Portas \blacklozenge Comprimento de onda $\color{red}\blacklozenge$ Waveband $\color{blue}\blacklozenge$ Troca de Comprimento de Onda

Figura 3.7: Nós MG-OXC de três camadas com quatro λ s agregados ao waveband e com as portas com λ s isolados capacidade de troca de λ .

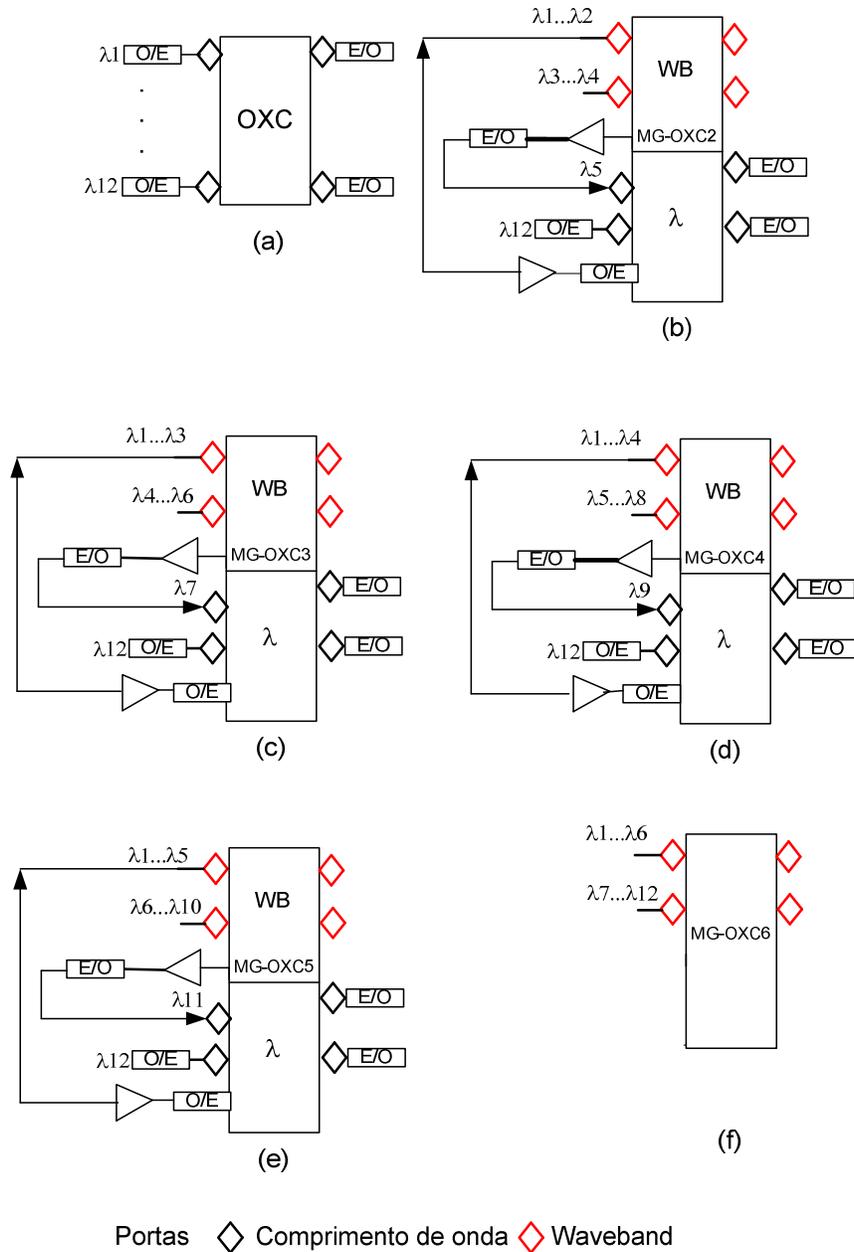


Figura 3.8: Nós MG-OXCs de três camadas com diferentes λ s agregados aos wavebands dos nós.

3.4-Detalhamento dos Nós MG-OXCs e OXCs Utilizados

As Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 mostram detalhes dos nós MG-OXC de uma camada, MG-OXC de três camadas propostos e do nó OXC utilizado na simulação.

O nó da Figura 3.9 ilustra os caminhos ópticos que chegam pelas fibras de entrada 1 ou 2 através de λ s agregados aos wavebands e λ s isolados. Eles são

demultiplexados e enviados para serem comutados pelo comutador WB1 no caso de λ s agregados aos wavebands ou pelo comutador OXC no caso de serem λ s isolados. Depois de passarem pelos comutadores WB1 e OXC os λ s agregados aos wavebands e os λ s isolados dos caminhos ópticos são multiplexados e encaminhados para as fibras de saída.

Na Figura 3.9 os caminhos ópticos com os λ s em cores azul e laranja agregados ao waveband e o caminho óptico do λ em cor verde chegam através da fibra de entrada 1 e são demultiplexados. O caminho óptico do waveband é comutado pela camada WB1 enquanto que o do λ é comutado pela camada OXC. Os caminhos ópticos do waveband e do λ são multiplexados e seguem a sua rota pela fibra de saída 2. Os nós da Figura 3.5 (c e d), da Figura 3.6 (b,c,d,e e f), da Figura 3.8 (f) representam essa configuração.

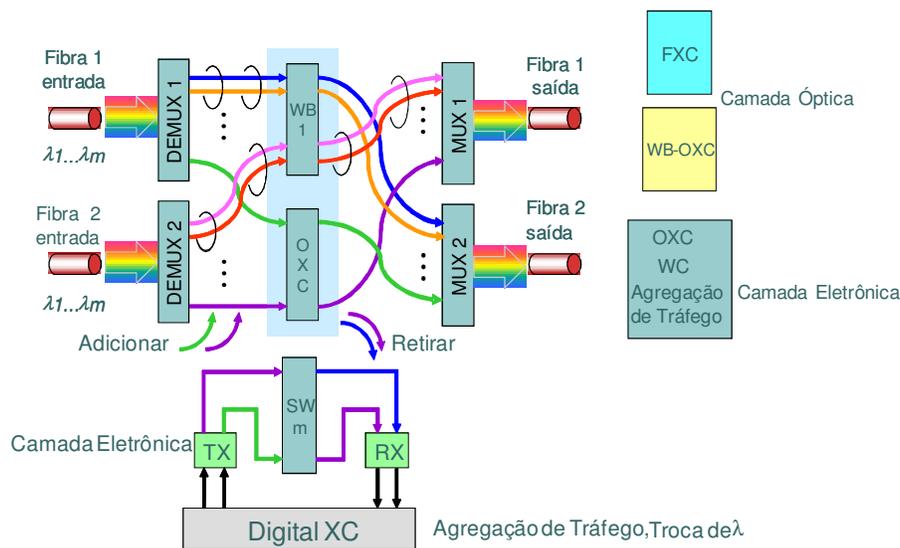


Figura 3.9: MG-OXC uma camada detalhado das. Os λ s agregados aos wavebands são comutados na camada óptica e os λ s isolados sofrem conversão OEO.

O nó da Figura 3.10 é o MG-OXC de três camadas que, em relação ao de uma camada, adiciona as funções de multiplexação de λ s em wavebands e a demultiplexação de wavebands em λ s. Essas funções permitem que os λ s agregados ao waveband e os λ s isolados trafeguem pelas camadas que compõem o nó.

Descrevendo a Figura 3.10, começamos pelo caminho óptico do waveband com dois λ s agregados representados em cores azul e laranja. Supondo um caminho óptico A-B-C, esse canal waveband específico possui banda suficiente para alocar uma conexão com banda de, por exemplo, 622 Mbps entre os nós A e B, mas não entre os

nós B e C. Desta maneira, a Figura 3.9 representa a situação no nó B para a demultiplexação do waveband de dois lambdas agregados (cores azul e laranja) para λ s isolados (azul e laranja). Esses λ s são convertidos para a camada eletrônica onde a conexão específica de 622 Mbps será retirada e alocada no λ em cor roxa, que possui banda suficiente para suportar essa conexão. Em seguida, será comutado pela camada OXC do nó para posteriormente sofrer a conversão para o domínio óptico e seguir pela fibra de saída 2. O λ s de cor azul e laranja, com todo o tráfego restante serão novamente convertidos para o domínio óptico e multiplexados para o canal waveband original para seguir na fibra de saída 1.

Ainda em relação à Figura 3.10 e supondo o mesmo caminho A-B-C, o λ em cor marrom não possui banda suficiente para alocar uma conexão com banda de, por exemplo, 155 Mbps entre os nós B e C. No nó B, a conexão de 155 Mbps será alocada em algum λ que foi demultiplexado e convertido para a camada eletrônica do waveband formado pelos λ s em rosa e vermelho. Assim, após agregar esta conexão de 155 Mbps, esses λ s serão novamente multiplexados formando o waveband. O λ em marrom será convertido para a camada óptica novamente transmitindo o tráfego restante. Os nós da Figura 3.7(c e d) e da Figura 3.8 (b, c, d, e e) representam essa configuração.

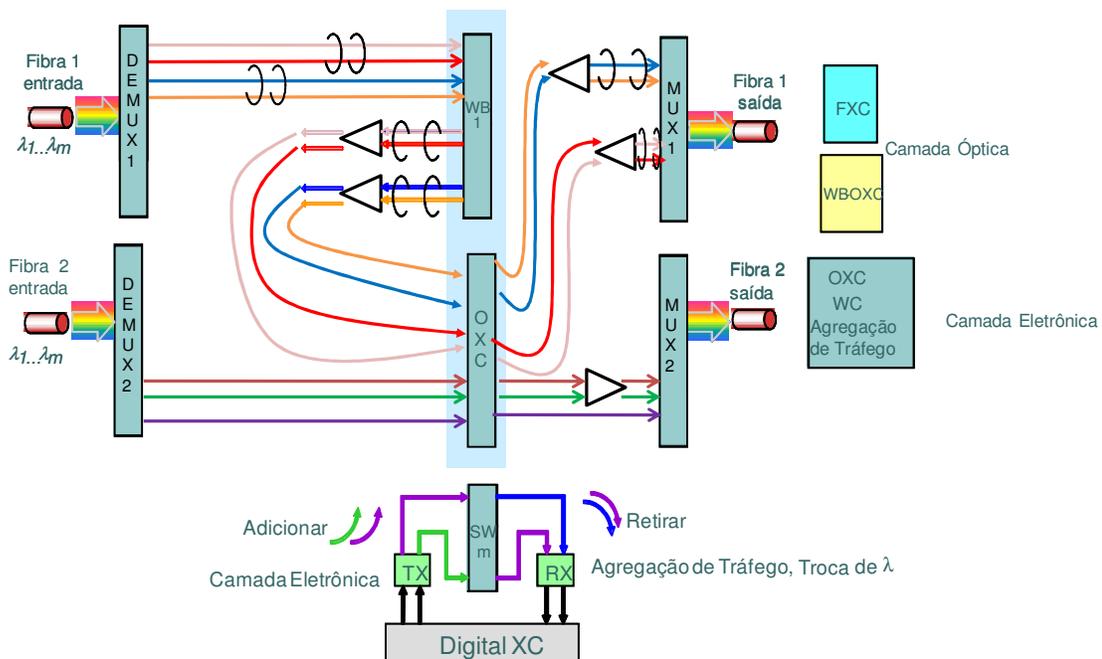


Figura 3.10: MG-OXC de três camadas. Nesse MG-OXC há multiplexadores de waveband para λ s e de λ s para wavebands.

A Figura 3.11 mostra o OXC utilizado nas simulações. Nesse tipo de nó é feita apenas a comutação de λ s. Os λ s que chegam por meio dos caminhos ópticos são demultiplexados, convertidos para o domínio eletrônico e se houver recursos é feita a troca de λ e agregação de tráfego. Posteriormente, o λ é comutado e convertido para o domínio óptico e segue pela fibra de saída. Os nós da Figuras 3.5 (a e b), 3.6 (a), 3.7 (a e b) e 3.8 (a) representam essa configuração.

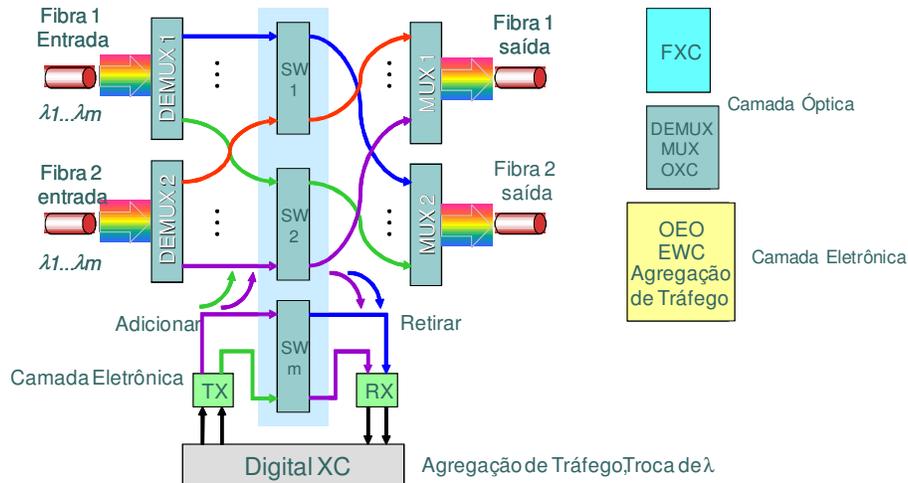


Figura 3.11: Nós OXC. Os λ s estão sujeitos a conversão OEO.

3.5-Tipos de Conexão nas Redes com MG-OXC de Uma camada e Três Camadas

Para os nós MG-OXC e WC-MG-OXC de uma camada há duas formas de alocar solicitação no nó: conexões entre λ s ou entre wavebands. No caso das solicitações de conexões entre nós MG-OXCs o algoritmo verifica se a solicitação de alocação foi feita utilizando um λ agregado ao waveband. Caso o λ seja agregado ao waveband, a largura de banda disponível no waveband é verificada e se não houver banda suficiente ela é bloqueada. Se for uma solicitação de alocação utilizando um λ isolado é verificada a sua disponibilidade de largura de banda e se não houver banda suficiente a alocação não se concretiza. Se houver o recurso da troca de λ e a banda do λ inicial estiver esgotada os outros λ s isolados são verificados

Se os nós forem do tipo MG-OXC e WC-MG-OXC de três camadas a solicitação poderá ser alocada em um waveband e em um λ no mesmo caminho. Assim,

o algoritmo verifica se há um waveband com banda disponível para aceitar a solicitação em andamento e, caso não haja, verifica se há banda disponível nos λ s isolados que podem ou não estarem sujeitos a troca de λ . E também caso não haja banda suficiente em um λ isolado tenta alocar essa banda nos λ s agregados ao waveband.

Os nós OXC recebem uma solicitação de alocação de conexão em um determinado λ e o algoritmo verifica a largura de banda disponível nos λ . Entretanto, para os nós WC-OXC o algoritmo verifica a largura de banda disponível do λ da solicitação e, no caso de indisponibilidade, o algoritmo verifica a largura de banda dos outros λ s.

3.6-Gerenciamento de Conexão

Uma conexão em uma rede waveband pode ser originada ou terminada em um nó OXC ou em um nó MG-OXC de uma ou de três camadas. Assim, devemos levar em consideração as características de alocação de banda desses nós para que se possa estruturar o algoritmo de simulação de uma rede baseado nos tipos de gerenciamentos de conexão que podem ser realizadas para os nós.

3.6.1-MG-OXC de Uma Camada

Para acomodar uma conexão do tipo waveband em um MG-OXC de uma camada, todos os nós do caminho óptico precisam ser MG-OXC e os λ s precisam estar agregados em wavebands. Baseado no caminho óptico waveband adotado, ele pode ser classificado em duas categorias:

(1) O caminho waveband pode ser uma rota waveband fim-a-fim, na qual todos os nós ao longo do caminho são MG-OXC. Para que esse tipo de conexão ocorra primeiro é necessário ter um λ disponível que é agrupado com outros λ s e transmitido como um único grupo. Este λ é desagregado do waveband no nó destino. Esse caminho é chamado wb - wb e é mostrada na Figura 3.12.

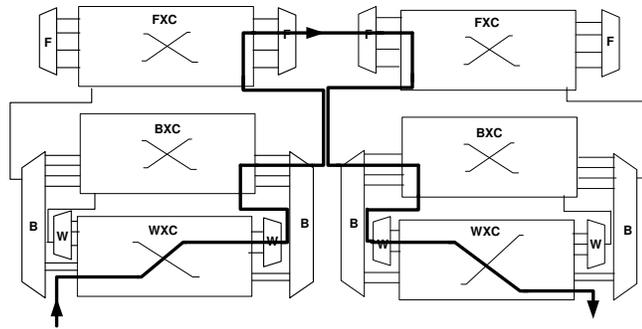


Figura 3.12: Caminho waveband-waveband.

(2) O caminho é formado por um λ do nó fonte ao nó destino. Esse caminho é chamado de $\lambda - \lambda$ e é mostrado na Figura 3.13.

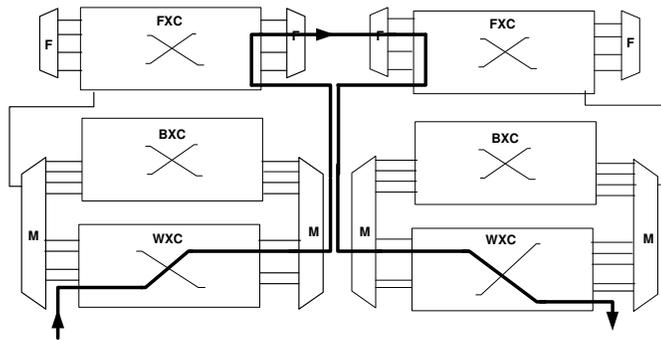


Figura 3.13: Caminho λ - λ .

3.6.2-MG-OXC de Três Camadas

No caso de utilização de nós MG-OXCs de três camadas, pode haver comunicação entre camadas waveband e λ . Portanto, além das conexões apresentadas na seção anterior podemos acrescentar as seguintes possibilidades de conexão:

(1) O caminho waveband se origina em um nó fonte e termina em um nó MG-OXC intermediário. Uma conexão se inicia em um λ disponível que é agrupado em um waveband no nó fonte e é desagregada do waveband em um nó MG-OXC intermediário. Assim, para o resto do caminho a conexão segue em um λ individual para os nós restantes. Esse caminho é chamado de $wb - \lambda$ e é mostrado na Figura 3.14.

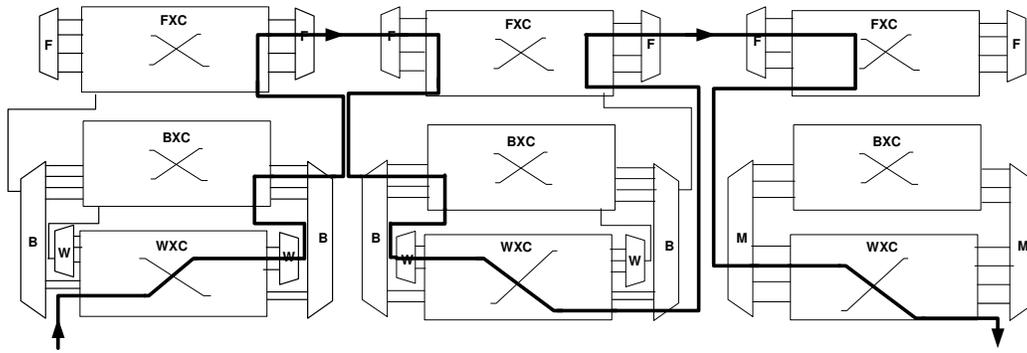


Figura 3.14: Caminho waveband- λ .

(2) O caminho waveband se origina em um nó MG-OXC intermediário e termina em um nó destino. Uma conexão se inicia em um dos λ s isolados e é transferida em um nó intermediário para os λ s agregados ao waveband. Quando chega ao nó final a conexão que está em um λ agregado ao waveband é desagregada em λ s e é completada. Esse caminho é chamado de λ -wb e é mostrado na Figura 3.15.

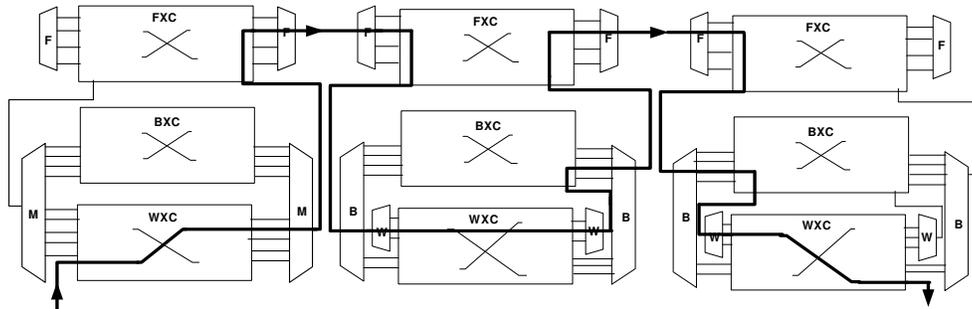


Figura 3.15: Caminho λ -waveband.

(3) O caminho waveband pode originar em um nó intermediário MG-OXC e terminar em outro nó MG-OXC intermediário. Uma conexão se inicia em λ isolado e é agregada aos λ s disponíveis para agregação aos wavebands nos nós intermediários e é desagregada dos λ s reunidos nos wavebands em nós intermediários e segue nos λ s individuais nos nós restantes. Esse caminho é chamado de λ - wb - λ e é mostrado na Figura 3.16.

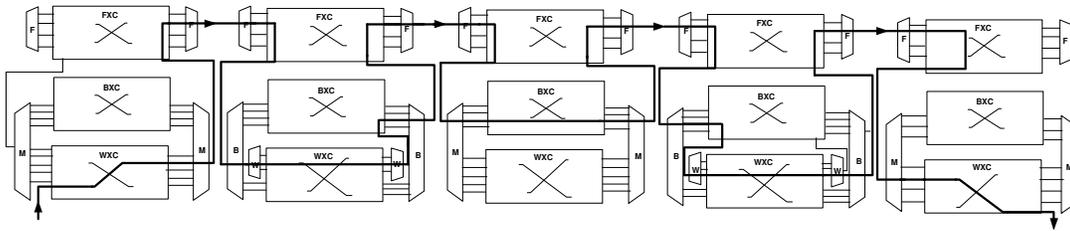


Figura 3.16: Caminho λ -waveband- λ .

3.7-Análise de Custo da Arquitetura de Nós

A análise de custo foi baseada na arquitetura do nó MG-OXC de uma e três camadas com as funcionalidades de troca de λ e agregação de tráfego no domínio eletrônico nos λ s isolados.

Dada a dificuldade em estabelecer custos efetivos para os equipamentos utilizados nos nós da rede, adotamos neste artigo a abordagem feita em [48], que é a de estabelecer custos relativos entre os equipamentos.

De acordo com [48] o custo relativo de uma porta de um nó OOO é cerca de 5 vezes menor que o custo relativo de uma porta de um nó que realiza conversão OEO. Esse valor maior é devido ao custo da transferência de conversão de dados do domínio óptico para o domínio eletrônico. Nesse artigo é feita uma análise de custos por meio de pesos de portas tomando como referência a porta waveband com 4 λ s agregados com custo igual a 1.

Cada conversão OEO necessita de muitos componentes ópticos como LASERs, moduladores, multiplexadores e demultiplexadores WDM. Portanto, em redes em que o número de conversões OEO aumenta com a capacidade da rede pode tornar sua arquitetura economicamente inviável. Entretanto, nos últimos anos estamos presenciando uma acentuada diminuição de custos de componentes eletrônicos e a viabilização em larga escala de vários componentes ópticos fazendo com que essas portas se tornem mais viáveis economicamente [50].

Portanto, levando em consideração essas informações foi proposto que a porta do comutador que realiza conversão OEO terá um custo relativo duas vezes maior que a porta do comutador waveband tomado como referência que foi o com 4 λ s agregados.

O custo relativo das portas dos nós OEO com funções adicionais foi definida a partir da referência de custo da porta OEO com capacidade de agregação de tráfego. Para cada recurso adicionado a porta OEO o custo foi aumentado em 1 unidade.

No caso das portas dos nós OOC com diferentes λ s agregados ao waveband foram definidos os custos em função do número de λ s agregados ao waveband. Assim, quanto mais λ s agregados ao waveband maior o custo da porta e vice-versa.

3.7.1-MG-OXC de Uma Camada

O custo total da arquitetura de nós é calculado de acordo com os seguintes pesos e conforme as portas dos nós:

1. Portas waveband com fator de agregação 6: 1,4 por porta;
2. Portas waveband com fator de agregação 5: 1,2 por porta;
3. Portas waveband com fator de agregação 4: 1,0 por porta;
4. Portas waveband com fator de agregação 3: 0,8 por porta;
5. Portas waveband com fator de agregação 2: 0,6 por porta;
6. Nós sem troca de λ com portas OEO: 2,0 por porta;
7. Nós com troca de λ com portas OEO: 3,0 por porta.

A combinação das arquiteturas dos nós pode ser feita considerando o número de λ s que foram agregados nos wavebands. Por exemplo, em um nó com 12 λ s e 2 wavebands de granularidade 4, 8 λ s são agrupados em 2 grupos de 4. A Figura 3.17 ilustra o exemplo descrito com os custos das portas incluídos.

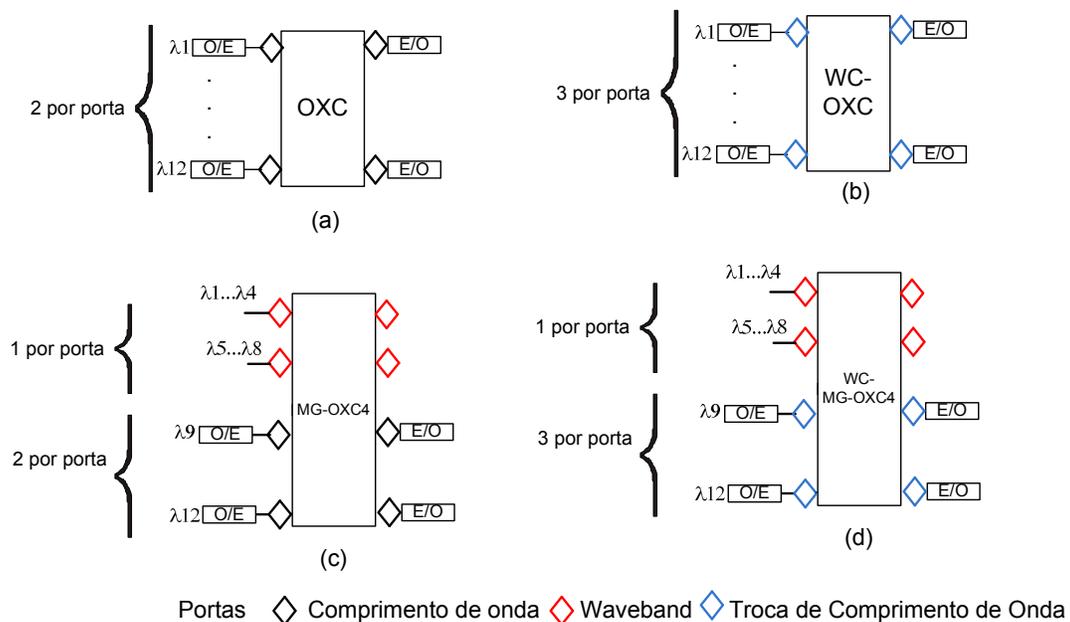


Figura 3.17: OXCs, WC-OXCs, MG-OXCs e WC-MG-OXCs com os custos das portas.

A Tabela 3.1 resume o tipo e os custos dos nós.

Tabela 3.1. Custo dos nós.

Tipo	OXC	WC-OXC	MG-OXC	WC-MG-OXC
Custo	24,0	36,0	10,0	14,0

No caso de quantidades diferentes de λ s agrupados ao waveband nos nós temos, por exemplo, em um nó com 12 λ s e 2 wavebands de granularidade 3, 6 λ s estão agrupados em 2 grupos de 3. Os 6 λ s restantes são λ s isolados. Se forem 2 wavebands com granularidade 5, 10 λ s estão agrupados em 2 grupos de 5 e os 2 λ s restantes são isolados. Portanto, para os 12 λ s considerados, a Figura 3.18 ilustra os custos das portas e a Tabela 3.2 mostra os valores dos custos dos nós considerados no sistema.

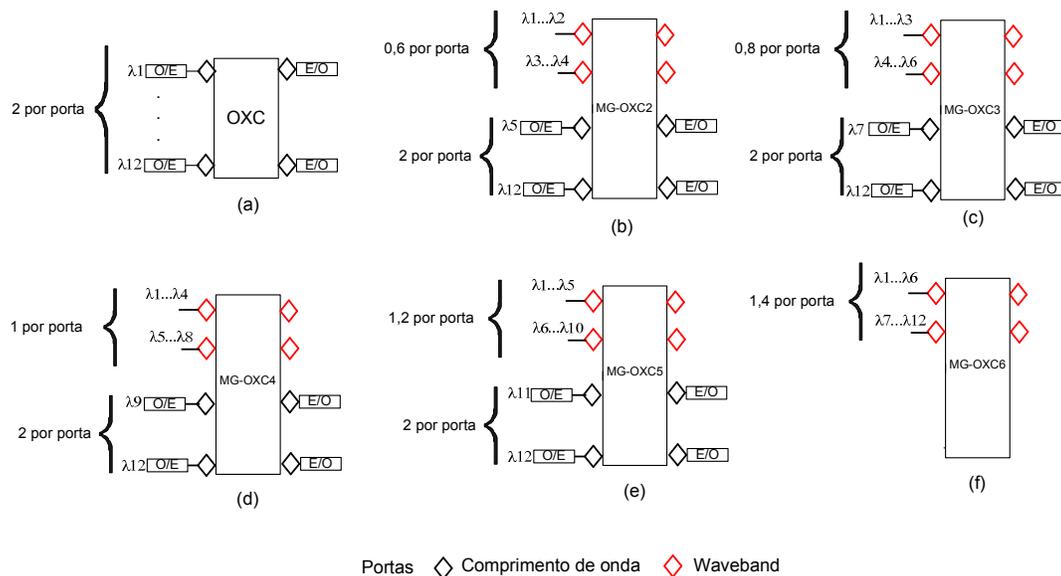


Figura 3.18: Custos das portas dos OXCs e MG-OXCs com diferentes granularidades.

Tabela 3.2. Tipo de nó, granularidade e custo.

Tipo do Nó	Granularidade	Custo
MG-OXC	4	10,0
MG-OXC	6	2,8
MG-OXC	5	6,4
MG-OXC	3	13,6
MG-OXC	2	17,2
OXC	-	24,0

A relação custo-benefício é calculada de acordo com o custo total do tipo de porta utilizado, o volume de utilização da porta e o número de chamadas aceitas.

O cálculo do custo-benefício do comutador MG-OXC de uma camada foi feito utilizando a equação abaixo

$$CB = \frac{(C_T)(V_U)}{C_A} \quad (3.1)$$

na qual CT é o custo total do conjunto de portas e corresponde à soma do custo de cada tipo de porta utilizada com os pesos atribuídos, VU é o volume de utilização das portas wb , λ ou λ com troca de λ utilizadas por cada configuração e CA são as chamadas aceitas em cada configuração.

3.7.2-MG-OXC de Três Camadas

A diferença em relação ao MG-OXC de uma camada são as portas adicionais que convertem wavebands em λ_s e λ_s em wavebands. A Figura 3.19 ilustra os nós com essas portas que acrescentam novos custos sendo:

1. Demultiplexador de wavebands para λ_s : 1,0 por porta;
2. Multiplexador de λ_s para wavebands: 1,0 por porta;
3. Conversões OEO adicionais devido às novas funções dos nós: 2,0 por porta.

Portanto, o custo relativo total associado a essas portas passa a ser 3,0 sendo a soma do custo da de/multiplexação mais o custo das conversões OEO adicionais formando os novos custos mostrados na Tabela 3.3.

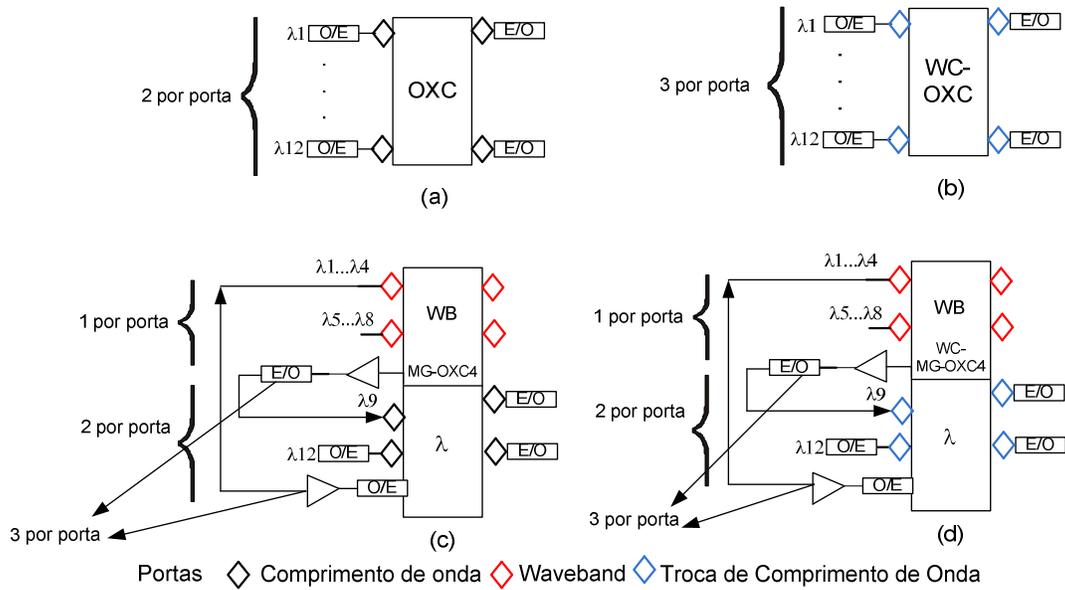


Figura 3.19: Custos das portas dos OXCs, WC-OXCs, WC-MG-OXCs e MG-OXCs de três camadas.

Tabela 3.3. Custo dos nós.

Tipo	OXC	WC-OXC	MG-OXC	WC-MGOXC
Custo	24,0	36,0	16,0	20,0

Para os nós MG-OXCs de diferentes granularidades os custos das novas operações precisam ser computados significando que os nós terão novos custos. A Figura 3.20 ilustra os nós com as portas adicionais e a Tabela 3.4 ilustra os novos custos dos nós.

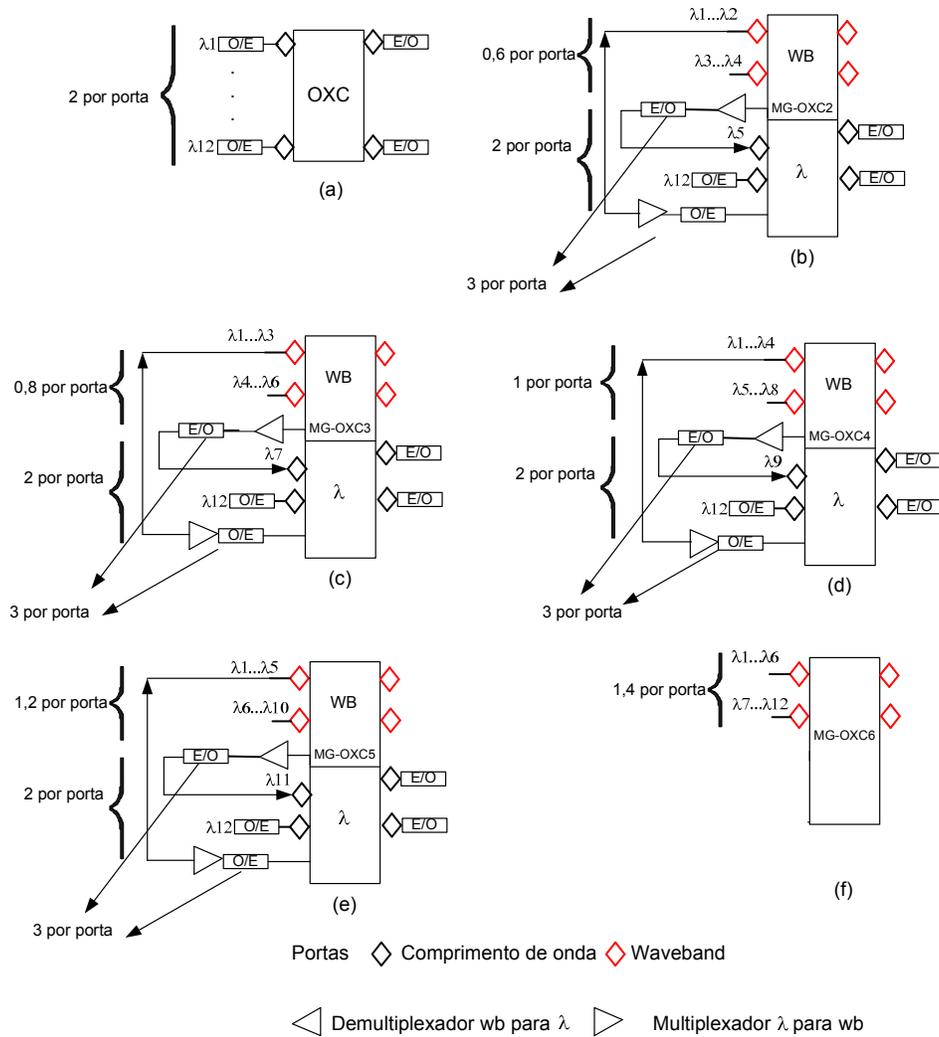


Figura 3.20: Custos das portas dos OXC e MG-OXC com diferentes granularidades.

Tabela 3.4. Tipo de nó, granularidade e custo.

Tipo do Nó	Granularidade	Custo
MG-OXC	4	16,0
MG-OXC	6	2,8
MG-OXC	5	12,4
MG-OXC	3	19,6
MG-OXC	2	25,2
OXC	-	24,0

O cálculo do custo-benefício do comutador MG-OXC de três camadas foi feito incluindo o custo da comutação entre wb- λ e λ -wb. Nesse caso, foi acrescentado o custo da conversão OE que ocorre quando se passa da camada waveband para a camada λ e o custo da conversão EO quando se passa da camada λ para a camada waveband e também o custo da agregação e desagregação de wavebands em λ s e vice-versa.

$$CB = \frac{(C_T)(V_U)}{C_A} + \frac{(C_{wb-\lambda})(V_{U_{wb-\lambda}})}{C_{Adicionais}} + \frac{(C_{\lambda-wb})(V_{U_{\lambda-wb}})}{C_{Adicionais}} \quad (3.2)$$

na qual $C_{wb-\lambda}$ é o custo da desagregação $wb-\lambda$ e conversão OE, $C_{\lambda-wb}$ é o custo da agregação $\lambda-wb$ e da conversão EO e $C_{Adicionais}$ são as chamadas aceitas em função do uso do gerenciamento de conexões do MG-OXC de três camadas.

3.7.3-Cálculo do Coeficiente de Correlação

O intuito do cálculo dessa variável para cada conjunto de configurações simuladas é verificar se existe um coeficiente de correlação positivo ou negativo entre o custo e o benefício das configurações e assim relacionar e montar uma tabela que irá hierarquizar as configurações a partir do pior até o melhor benefício. Com essa tabela será possível identificar como se relacionam os custos com os benefícios.

O valor do coeficiente de correlação de Pearson [51] não pode determinar a relação de causa-efeito de uma variável sobre outra, mas é calculado para indicar a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis. O valor do coeficiente de correlação pode ser calculado pela seguinte equação:

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (3.3)$$

na qual x e y são variáveis independentes.

Se r está próximo a -1 indica uma forte correlação negativa entre as variáveis, se r está próximo de 0 indica que não há correlação entre as variáveis e se r está próximo de 1 indica forte correlação positiva entre as variáveis.

3.8-Descrição do Algoritmo de Implementação do Waveband

Inicialmente, os parâmetros de entrada do algoritmo são descritos e a resposta esperada é mostrada nos parâmetros de saída. O núcleo do algoritmo contém os procedimentos implementados.

Definição das variáveis do algoritmo implementado:

1. Topologia de rede $G(V, E)$. É uma matriz que contém a distância em quilômetros dos nós da rede em relação aos nós vizinhos no grafo. Nessa matriz não é permitida a conexão de um nó para ele mesmo;
2. Carga da rede. Representa a intensidade de tráfego da rede e é dada em erlang;
3. Tempo médio de duração das chamadas (μ^{-1});
4. Número de λ s e largura de banda dos λ s- É o número de λ s com que a rede WDM opera e a largura de banda do λ é a capacidade máxima de banda suportada;
5. Faixas de banda e probabilidade de geração de cada banda. São as larguras de banda de cada requisição de conexão. Cada largura de banda tem uma probabilidade de geração dada por:

$$P_G = \frac{1/c}{\sum_{m=1}^b 1/m} \quad (3.4)$$

na qual c é o número da largura de banda utilizada $c=\{1,2,3,4,\dots,n\}$ e b é o total de largura de banda utilizadas $b=\{n\}$ [52];

6. Fator de Agregação de λ s - O TG é realizado em cada λ não-agregado ao WB. O TG é realizado com base no fator de TG, G_a , que é a quantidade de chamadas que podem ser agrupadas em um determinado λ . Por exemplo, um λ de largura de banda máxima 2,5 Gbps e fator de agregação 16 pode agregar no máximo 16 conexões de largura de banda de 155,52 Mbps. Desta maneira, se a largura de banda e o fator de agregação de um λ suportar a solicitação, então ela é aceita. Dados λ_a e G_a , a solicitação será aceita apenas se a condição de disponibilidade de largura de banda for satisfeita e o número de conexões G_e presentes em λ_a for $G_e \leq G_a$;
7. Número de wavebands. É o número de wavebands que cada nó pode admitir.
8. Granularidade dos wavebands – É a quantidade de λ s que serão agrupados em cada waveband;
9. Lista de nós com capacidade de realizar waveband; lista de nós com capacidade de realizar troca de λ s e lista de nós que podem realizar a

agregação de tráfego são as listas cujos nós que podem ou não realizar as respectivas funções.

Início do Algoritmo

Parâmetros de Entrada: Uma topologia de rede $G(V, E)$ com os parâmetros: carga da rede, tempo médio de duração das chamadas (μ^{-1}), número de λ s, largura de banda, bandas e probabilidade de geração de banda, fator de agregação de λ s, número de wavebands, granularidade dos wavebands, lista de nós com capacidade de realizar waveband, lista de nós com capacidade de realizar troca de λ s e lista de nós com capacidade de realizar agregação de tráfego.

Parâmetros de Saída: Um λ ou um λ agregado ao waveband escolhido e uma rota para completar a conexão ou um bloqueio por falta de recursos.

Algoritmo:

Passo 1: Geração de tráfego Poissoniano.

Passo 2: Geração dos eventos de alocação e desalocação, geração aleatória das conexões e organização dos eventos, para que possam ser organizados em um vetor da seguinte forma: tempo de chegada das conexões, número da conexão, identificador do evento, nó origem, nó destino e banda escolhida para a conexão (I apêndice).

Passo 3: Tratamento dos eventos de alocação e desalocação.

Passo 3.1: Tratamento do evento alocação e geração da matriz de enlaces.

Passo 3.1.1: Estabelecimento dos enlaces.

a) Nó origem do enlace não é MG-OXC. O algoritmo escolhe um λ_e de acordo com a política *first-fit*, ou seja, utiliza o primeiro λ que contém capacidade disponível de largura de banda para aceitar a solicitação. Caso possua mecanismo de troca de λ , o nó origem do enlace pode escolher um λ_i para estabelecer a solicitação com um nó destino do enlace. Caso não possua, o nó origem do enlace verifica se há disponibilidade de alocar a solicitação em andamento em λ_e para o estabelecimento da solicitação com o nó destino do enlace;

b) Nó origem do enlace é MG-OXC, mas utiliza λ s isolados ao waveband. O nó também pode possuir ou não a função de troca de λ . Caso não possua, o algoritmo aloca uma solicitação em determinado comprimento de onda λ_e e verifica se a largura de banda é suficiente para aceitar a solicitação em andamento. Se possuir, então aceita a solicitação entre os nós origem e destino do enlace. Caso possua o recurso da troca, verifica se os λ s isolados podem receber a solicitação;

c) Nó origem do enlace é MG-OXC e todos os nós do caminho (nós ao longo da conexão e nó destino da conexão) também são e utilizam os λ s agregados ao waveband. Ele verifica se há largura de banda disponível para alocar a solicitação em andamento no waveband W_e .

Passo 3.1.2: Preenche a matriz de enlaces;

Passo 3.1.3: Informa a matriz de enlaces montada ao algoritmo de Dijkstra [45] para calcular o menor caminho entre o nó origem e o nó destino;

Passo 3.1.4: Se não houver caminho devido à falta de recursos dos enlaces, bloqueia a chamada;

Passo 3.2: Tratamento do evento desalocação;

Passo 3.2.1: Devolve a banda alocada para os wavebands ou para os λ s.

Fim do Algoritmo

No caso do gerenciamento de conexões permitir que a conexão possa ser alocada em um waveband e em um λ no mesmo caminho, então a parte c) do Passo 3.1.1 passa a ser:

c) Se o nó origem do enlace é MG-OXC e os nós ao longo do enlace também são MG-OXCs, o algoritmo verifica se há um waveband com banda disponível para aceitar a solicitação em andamento. Caso não haja, o algoritmo verifica se há banda disponível nos λ s isolados para aceitar a solicitação em andamento e vice-versa. O nó pode possuir ou não o recurso de troca de λ nos λ s não agregados ao waveband. Caso possua troca, verifica se os λ s não agregados ao waveband podem receber a solicitação.

As Figuras 3.21 e 3.22 ilustram os fluxogramas dos algoritmos com o gerenciamento de conexões do MG-OXC de uma camada e de três camadas.

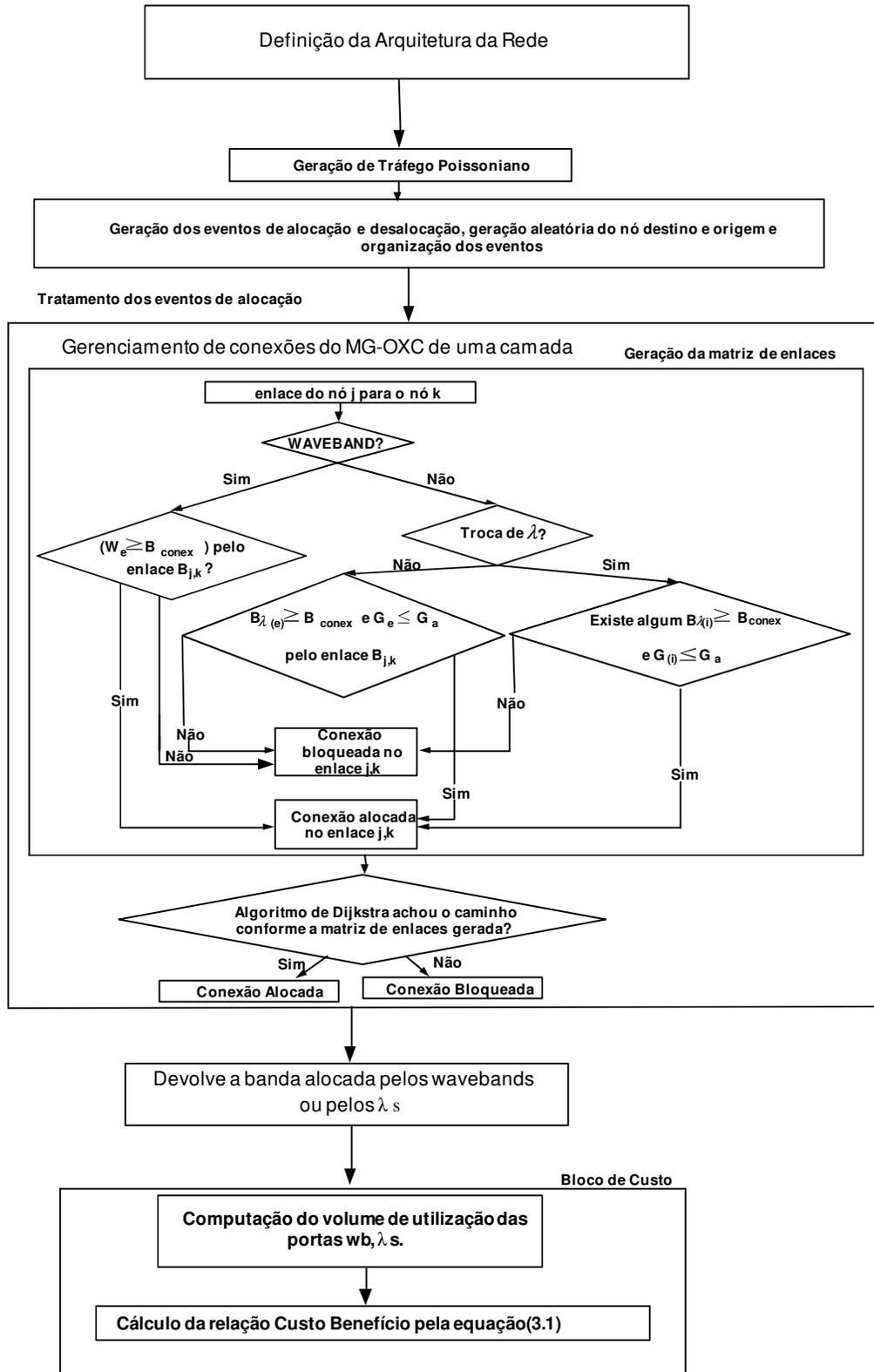


Figura 3.21: Fluxograma do algoritmo proposto para MG-OXC de uma camada no qual: j =nó origem do enlace, k =nó destino do enlace, i =conexão em andamento, W_e =waveband, B_{conex} =banda da conexão, B_λ =banda do λ , G_e =fator de agregação de λ , G_a =fator de agregação, $G_{(i)}$ =fator de agregação de tráfego.

4-Inclusão Dos Fatores de Degradação de Sinal na Simulação

Nesse capítulo serão incluídos os fatores de degradação física do sinal óptico no controle de admissão de conexões proposto. Para avaliar a degradação do sinal foram simuladas redes totalmente ópticas e redes na qual alguns nós são capazes de regenerar o sinal.

Para essas simulações foram utilizadas as seguintes arquiteturas de nós: totalmente ópticos, com capacidade de regeneração do sinal, com capacidade de regeneração com os recursos de agregação de tráfego e troca de λ e MG-OXCs de uma camada propostos no capítulo 3. Também foi proposto um nó MG-OXC de uma camada totalmente óptico em que tanto a comutação waveband quanto a comutação de λ s individuais é realizada no domínio óptico.

Dessa forma espera-se analisar os efeitos da degradação física nos diferentes tipos de gerenciamento de conexões propostos utilizando essas arquiteturas de nós.

4.1-Introdução

Em [53] rede roteada por λ (WRN) se refere a uma rede totalmente óptica, na qual o tráfego em um enlace óptico é roteado de um nó fonte para um nó destino sem passar por conversão óptica-eletrônica-óptica (OEO) em qualquer nó intermediário. Embora existam vantagens como transparência de protocolos, essas redes precisam superar as degradações de sinal introduzidas por longos enlaces de fibras e por componentes ópticos colocados em série, como amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA), amplificadores Raman e comutadores ópticos [54]-[56].

O oposto de uma rede totalmente óptica é a rede em que todos os nós o sinal sofre conversão OEO [57]. O sinal óptico nessa rede passa por regeneração (3R - regeneração, retemporização e reformatação) em cada nó intermediário de um caminho óptico para melhorar a qualidade do sinal transmitido.

Uma rede em que o sinal óptico passa pelo processo de conversão OEO em determinados nós é chamada de rede óptica com regeneração esparsa. Assim, o número de regeneradores OEO é reduzido [57].

Para avaliar o desempenho da rede óptica em relação a essas configurações de nós serão incluídas no algoritmo a degradação de sinais ópticos.

4.2-Arquitetura de Rede com Regeneração Esparsa e Troca de Comprimento de Onda

Quando um sinal óptico atravessa muitos enlaces de fibra e componentes ópticos durante o roteamento a qualidade do sinal é degradada. Os amplificadores EDFAs e os amplificadores Ramam podem compensar algumas perdas, mas introduzem ruído ASE e interferência multicaminhos [58]. Os OXCs e demultiplexadores introduzem ruído proveniente do crosstalk entre os λ s. Para superar essas degradações, o sinal óptico precisa ser convertido para o domínio eletrônico para ser regenerado.

Os regeneradores 3R consistem de um par transmissor e receptor (T-R) e um módulo de processamento eletrônico. A Figura 4.1 ilustra um regenerador 3R

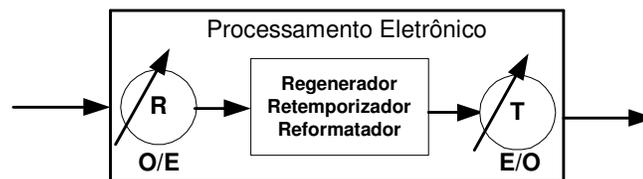


Figura 4.1: Nó com conversão OEO e regeneração 3R.

A descrição do processo que ocorre em um nó OXC com regeneração 3R é a seguinte:

1. Os λ s são demultiplexados;
2. Após a demultiplexação os λ s são convertidos para o domínio eletrônico e são processados por no módulo eletrônico onde é feita a operação 3R;
3. Após passarem pelo processo de regeneração os λ s são comutados;
4. Após a comutação dos λ s eles são novamente convertidos para o domínio óptico, multiplexados e transmitidos.

Quanto o nó possui o recurso de troca de λ , qualquer λ na entrada pode ser convertido em qualquer λ na saída.

4.3-Localização do Regenerador em Uma Rede com Regeneração Esparsa

Um dos problemas de projeto de rede é escolher em quais nós os regeneradores serão colocados. O problema da localização do regenerador é definido da seguinte forma:

- (1) Dado: Um grafo com a topologia de rede óptica $G(V, E)$ com N regeneradores;
- (2) Objetivo: Encontrar K nós que vão acomodar a regeneração $3R$.

Devido à dificuldade em prever o padrão de tráfego futuro, a localização de regeneradores sob a condição de tráfego dinâmico precisa ser baseada em algum tipo de conhecimento do volume do tráfego nos nós. Portanto, é necessário um modelo heurístico para descobrir quais nós podem abrigar os regeneradores.

4.3.1-Localização do Regenerador Baseada no Tráfego

Quando alguma informação sobre o tráfego futuro da rede está disponível, pode-se utilizar um algoritmo de localização de regeneradores baseado na quantidade de chamadas que passa pelo nó. É utilizado um algoritmo RWA sobre um grande número de chamadas criando uma grande demanda de caminhos ópticos e identificando em quais nós há maior intensidade de tráfego. As etapas do algoritmo são:

Etapa 1: Iniciar cada nó com o número de chamadas igual a zero e atribuir a cada nó uma variável C_i igual a zero;

Etapa 2: Iniciar o algoritmo RWA gerando um número aleatório de caminhos ópticos;

Etapa 3: Incrementar C_i em uma unidade para cada nó em que a chamada passa;

Etapa 4: Organizar os nós em ordem decrescente do valor da variável C_i ;

Etapa 5: Escolher K nós com maiores C_i .

Uma carga de tráfego elevada tende a aumentar o ruído devido ao aumento do crosstalk e também causa uma necessidade maior de λ_s no nó, aumentando assim a probabilidade de bloqueio. Assim, a localização do regenerador nos nós é realizada conforme a intensidade de tráfego de cada um.

4.4-Modelo dos Nós Simulados e Gerenciamento de Conexão

Os quatro tipos de nós simulados na rede considerando as restrições físicas são mostrados na Figura 4.2. São 5 tipos de nós diferentes sendo:

1. Nó OXC totalmente óptico sem capacidade de agregação de tráfego nem troca de λ ;
2. Nó OXC com capacidade de realizar regeneração 3R;
3. Nó OXC com capacidade de regeneração 3R, troca de λ e agregação de tráfego;
4. Nó MG-OXC com os λ s isolados do waveband com capacidade de regeneração 3R e agregação de tráfego.
5. Nó MG-OXC totalmente óptico.

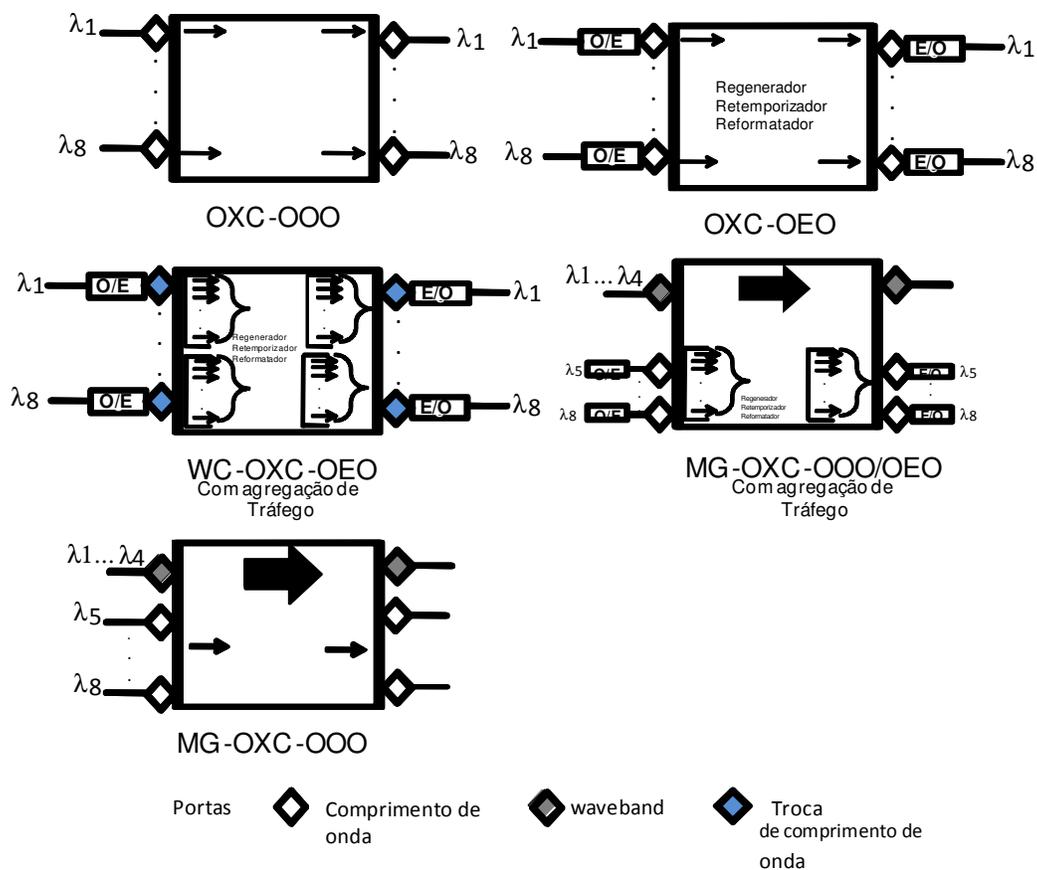


Figura 4.2: Tipos de nós utilizados para a simulação em redes totalmente ópticas e redes com alguns nós com troca de λ .

Os nós totalmente ópticos simulados possuem oito λ s com largura de banda de 10 Gbps. Os que possuem capacidade de agregação de tráfego têm granularidade de 155 Mbps, ou seja, podem agregar conexões com no mínimo 155 Mbps de largura de banda. A Tabela 4.1 ilustra os recursos disponíveis para os quatro nós simulados.

Tabela 4.1: Recursos disponíveis para os quatro tipos de nós simulados.

OXC/WC- OXC/MG- OXC	Tecnologia de Comutação	Capacidade de Agregação de Tráfego	Capacidade da Porta OXC/MG- OXC (Gbps)	“Granularidade” da Agregação (Mbps)
Tipo I	OOO	Não	10	N/A
Tipo II	OEO	Não	10	N/A
Tipo III	OEO	Sim	10	155 Mbps
Tipo IV	OOO/OEO	Sim	10/40	155 Mbps/N/A
Tipo V	OOO/OOO	Não	10/40	N/A

A Figura 4.3 ilustra uma conexão totalmente óptica. A conexão se inicia em um λ com um determinado valor de largura de banda e prossegue até o destino final. Além da degradação do sinal óptico ao longo do percurso, é a falta de capacidade de agregação de banda nos nós em que a comutação é totalmente óptica reduz a versatilidade e o desempenho da rede. Por exemplo, sem a capacidade de agregação de tráfego uma conexão de 155 Mbps pode ocupar totalmente um λ com capacidade de banda de até 10 Gbps.

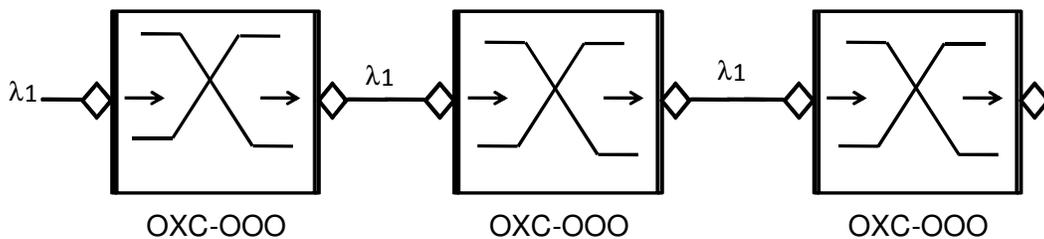


Figura 4.3: Exemplo de conexão em nós totalmente ópticos sem recursos como regeneração 3R, agregação de tráfego e troca de λ .

A Figura 4.4 mostra uma conexão que se inicia em um nó totalmente óptico, passa por um nó regenerador e segue para ser comutado em outro nó totalmente óptico.

Nesse caso, apenas o recurso de regeneração 3R está disponível, não sendo possível realizar a agregação de tráfego nem a troca de λ .

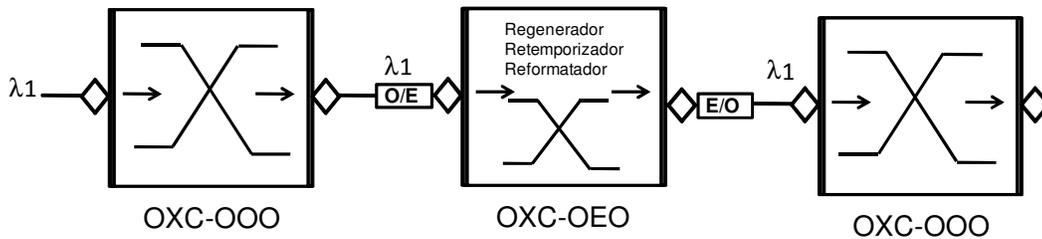


Figura 4.4: Exemplo de conexão entre nós totalmente ópticos com um nó regenerador com o recurso 3R.

A próxima alternativa de conexão mostrada na Figura 4.5, é iniciada em um nó totalmente óptico, passa por um nó regenerador, mas dessa vez com capacidade de agregação de tráfego e troca de λ . Uma conexão isolada de 155 Mbps que se inicia no λ_1 , com capacidade de 10 Gbps, sofre conversão OE no próximo nó e outras conexões podem ser adicionadas dependendo do valor de g . Se g for igual a 64 ela pode agregar outras 63 conexões de 155 Mbps e sintonizar o transmissor de saída no λ_2 , que estará com sua banda de 10 Gbps ocupada com 64 conexões de 155 Mbps e com tráfego totalmente óptico no próximo nó.

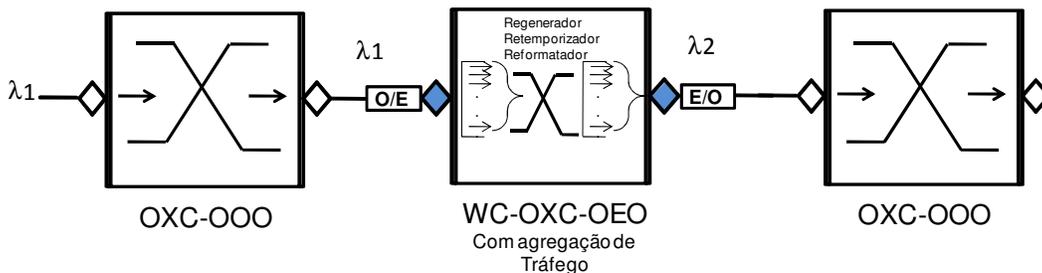


Figura 4.5: Exemplo de conexão entre nós totalmente ópticos com um nó regenerador com recursos 3R, agregação de tráfego e troca de λ .

Os próximos exemplos de conexão são ilustrados pela Figura 4.6 e 4.7. Nesse caso a conexão é feita utilizando nós MG-OXC de uma camada em duas configurações. Na configuração da Figura 4.6 tanto os λ s agregados ao waveband quanto os λ s isolados são comutados no domínio óptico. Eles não possuem recursos como regeneração de sinal, agregação de tráfego e troca de λ . Na Figura 4.7 os λ s isolados passam por um nó regenerador que possui os recursos de agregação de tráfego e troca de λ .

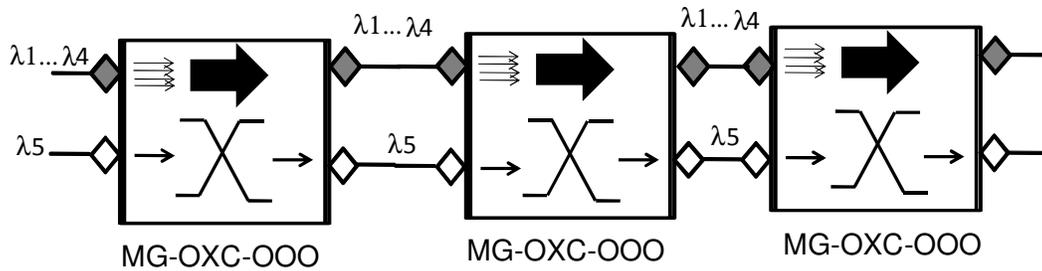


Figura 4.6: Exemplo de conexão entre nós OXCs e MG-OXCs com os λ s agrupados em waveband e os λ s isolados sendo comutados no domínio óptico.

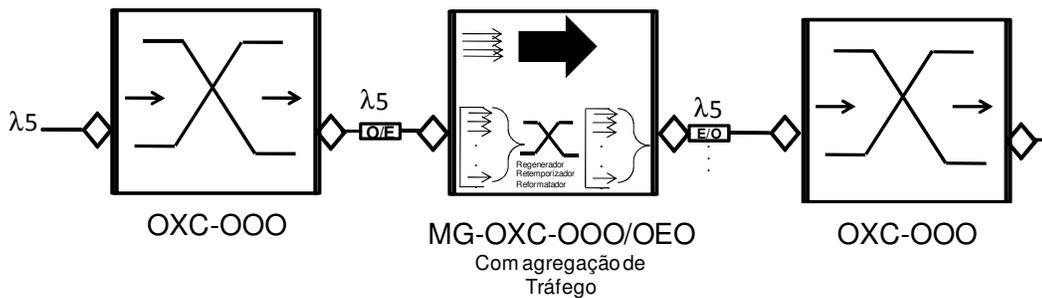


Figura 4.7: Exemplo de conexão entre nós OXCs e MG-OXCs com os λ s agrupados em waveband sendo comutados no domínio óptico e os λ s isolados passando pela regeneração e agregação de tráfego para ser convertido para o domínio óptico e seguir pela fibra de saída.

4.5-Modelagem da Camada Física [59]

Na modelagem da degradação do sinal foram considerados os seguintes parâmetros: Ruído entre os λ s (crosstalk) no nó OXC, ruído ASE devido aos EDFAs, ruído ASE e interferência multicaminhos nos amplificadores Raman como fatores dominantes que afetam a qualidade do sinal. Esses parâmetros são usados para o cálculo da relação sinal-ruído óptico (OSNR). A Figura 4.8 ilustra a arquitetura de um caminho óptico.

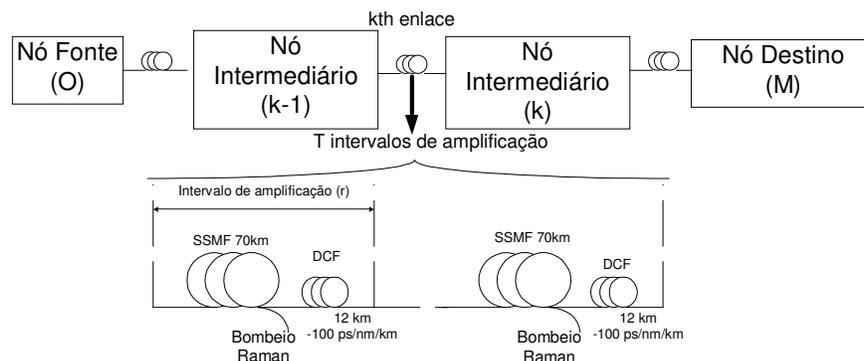


Figura 4.8: Arquitetura de simulação de um caminho óptico.

4.5.1- OSNR

O caminho óptico, mostrado na Figura 4.8, é usado para avaliar a OSNR. Os amplificadores são Raman distribuídos (DRA) com bombeio. Para um enlace de fibras entre os nós k e $k+1$ são empregados amplificadores com espaçamento de 82 km. Cada intervalo entre amplificadores consiste de 70 km de fibra padrão monomodo (SSMF) e 12 km de fibra compensadora de dispersão (DCF) para todos os λ s. A atenuação da SSMF e DCF são 0,2 e 0,5 db/km, respectivamente. O DRA compensa todas as perdas da fibra no intervalo de amplificação T .

A OSNR em um caminho óptico varia com as mudanças no tráfego da rede, pois quanto mais intenso o tráfego, maior é a degradação imposta pelo ruído entre os λ s no mesmo caminho óptico (crosstalk) e pelo ruído no comutador. Um método iterativo, proposto em [59] e que é baseado no estado atual da rede, é usado para calcular as potências do sinal e do ruído no caminho óptico.

As equações recursivas (4.1) e (4.2) expressam a potência do sinal de saída (S) e o ruído do DRA (N_{DRA}) para um dado caminho óptico (Figura 4.8). A Equação (4.3) expressa o ruído no nó ($N_{NÓ}$) que inclui o ruído crosstalk (N_{XT}) gerado na comutação dos caminhos ópticos e o ruído ASE dos EDFAs (N_{EDFA}) colocados na entrada e na saída do $(k+1)$ -ésimo nó intermediário.

$$S(k+1) = S(k) \prod_{r=1}^T L_{tf} G_a(r, \lambda) \quad (4.1)$$

$$N_{DRA}(k+1) = N_{DRA}(k) + P_a \sum_{r=2}^T \prod_{j=r}^T L_{tf}(j) G_a(j, \lambda) \quad (4.2)$$

$$N_{nó}(k+1) = N_{xt}(k+1) + N_{EDFA}(k+1) \quad (4.3)$$

na qual

$$N_{xt}(k+1) = N_{xt}(k) \prod_{r=1}^T L_{tf}(r) G_a(r, \lambda) + X_{sw} P_{xt}(k+1) \quad (4.4)$$

$$N_{EDFA}(k+1) = N_{EDFA}(k) \prod_{r=1}^T L_{tf}(r) G_a(r, \lambda) + P_{EDFA} \quad (4.5)$$

$L_{tf}(r)$ é a perda total da SSMF e DCF no r -ésimo intervalo de amplificação dos segmentos de fibra entre os nós k e $k+1$, que consiste de T intervalos de amplificação;

$G_a(r, \lambda)$ é o ganho do amplificador no r -ésimo intervalo; P_a é o ruído gerado pelo DRA. Os modelos de cálculo do ruído DRA (ruído ASE e interferência multicaminhos) usados nesse texto são modelos aproximados investigados em [58] e descritos no III Apêndice; P_{xt} é a potência total do sinal co-propagante compartilhado com o sinal desejado em diferentes λ s no mesmo caminho óptico na chave; X_{sw} é a taxa de ruído crosstalk na chave. Os detalhes da arquitetura da chave e a geração de crosstalk são mostrados e descritos em [60]. P_{EDFA} é potência de ruído ASE total gerado pelos EDFAs na saída do nó representado por

$$P_{EDFA} = 2n_{sp}(G_{in} - 1)hf_{\lambda}B_oL_{dm}L_{sw}L_{mx}G_{out}L_{tap} + 2n_{sp}(G_{out} - 1)hf_{\lambda}B_oL_{tap} \quad (4.6)$$

na qual h é a constante de Planck; n_{sp} é o fator ASE do EDFA no nó; G_{in} e G_{out} são os ganhos do EDFA no nó; f_{λ} é a frequência do sinal; B_o é a largura de banda óptica; L_{dm} e L_{mx} são as perdas no multiplexador e demultiplexador; L_{sw} é a perda na chave e L_{tap} é a perda nos conectores.

No nó destino a OSNR é calculada por:

$$OSNR_{destino} = \frac{S(destino)}{N_{DRA}(destino) + N_{node}(destino)} \quad (4.7)$$

O fator Q é calculado a partir do valor da OSNR

$$Q = \sqrt{\frac{B_o}{B_e} \frac{2OSNR}{\sqrt{4OSNR + 1} + 1}} \quad (4.8)$$

na qual B_o é a largura de banda óptica e B_e é a largura de banda elétrica.

O fator Q em função da OSNR encontrada no nó destino e a BER é calculado por:

$$BER = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.9)$$

4.6-Inclusão das Restrições da Camada Física no Algoritmo

No algoritmo proposto no Capítulo 3 a camada física é considerada resolvida, não sendo um fator determinante para a alocação ou bloqueio de chamadas. Nessa seção serão descritas as restrições da camada física que passam a integrar o algoritmo.

As variáveis da camada física do algoritmo são: Perda total da SSMF e DCF (L_{tf}); ganho do amplificador DRA (G_a); ruído gerado pelo DRA (P_a); potência do sinal co-propagante (P_{xt}); crosstalk na chave (X_{sw}); fator ASE do EDFA no nó (η_{sp}); largura de banda óptica (B_O); largura de banda elétrica (B_e); faixa de valores dos λ s de onda utilizados; valor máximo que a BER pode atingir; número de nós regeneradores.

Início do Algoritmo

Restrições Físicas da OSNR

Parâmetros de Entrada: Valores de L_{tf} , G_a , P_a , P_{xt} , X_{sw} , η_{sp} , B_O , B_e e limiar da BER.

Parâmetros de Saída: Um λ ou waveband escolhido e uma rota que satisfaz as restrições de limiar da BER.

Algoritmo:

Passo 1: Se o algoritmo de menor caminho achou caminho conforme a matriz de enlaces gerada, a qualidade desse caminho óptico é verificada;

Passo 2: Se o caminho óptico passar pelos nós escolhidos para regeneração, o sinal é submetido ao processo 3R e as restrições físicas da OSNR são zeradas. Esses nós podem possuir os recursos de agregação de tráfego e troca de λ ;

Passo 3: Verifica se o caminho óptico atende a restrição por BER que é calculada por (4.9);

Passo 4: Se a restrição por BER é satisfeita, o caminho óptico é de boa qualidade;

Passo 5: Conexão alocada;

Passo 6: Devolve a banda alocada pelos wavebands ou pelos λ s.

A Figura 4.9 ilustra o fluxograma completo do algoritmo implementado.

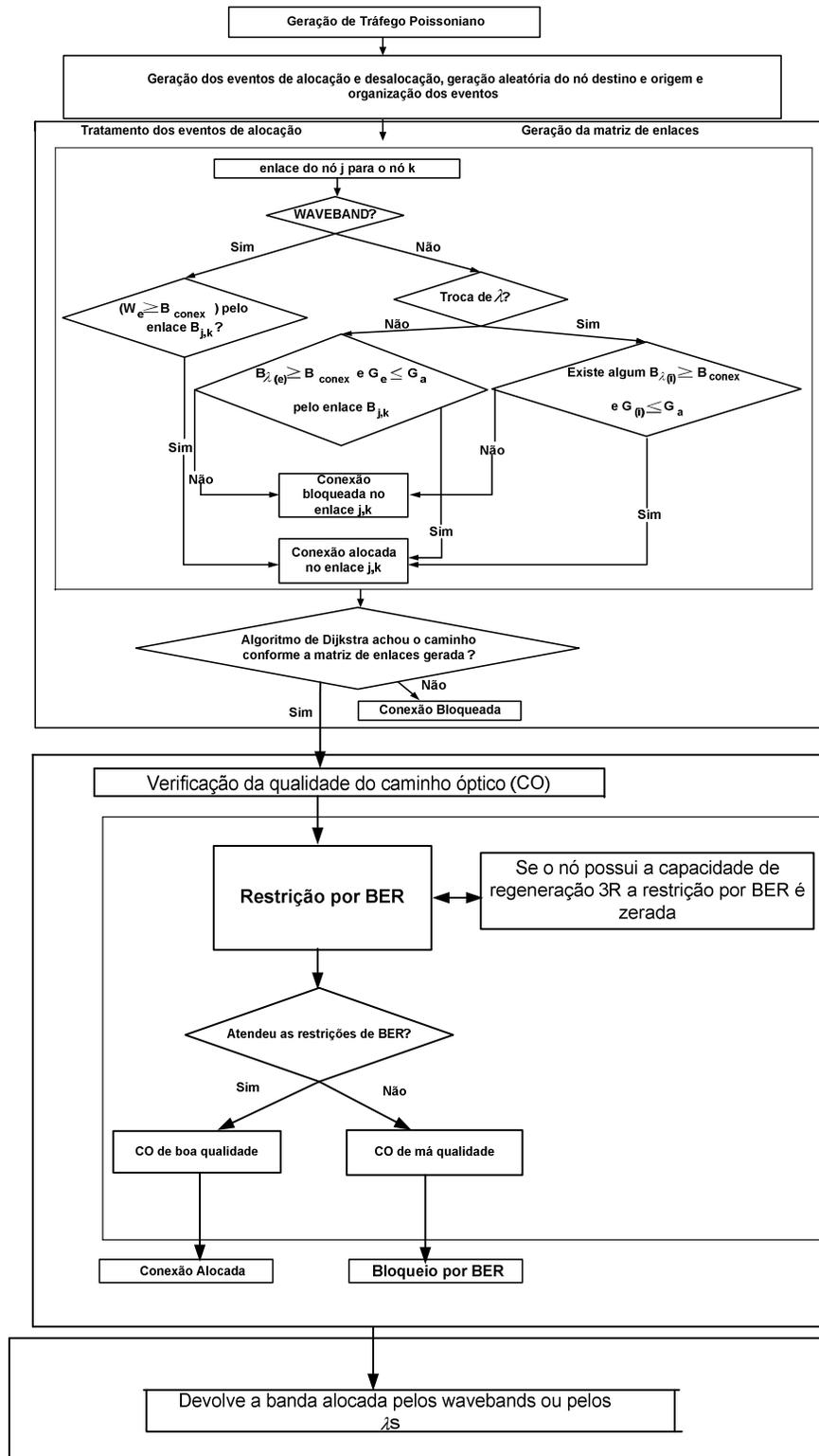


Figura 4.9: Fluxograma do algoritmo proposto no Capítulo 3 com a inclusão da camada física no qual: j = nó origem do enlace; k = nó destino do enlace; i = conexão em andamento; W_e = waveband; B_{conex} = banda da conexão; B_λ = Banda do λ ; G_e = Fator de agregação do λ ; G_a = Fator de agregação; $G_{(i)}$ = Fator de agregação de uma conexão.

5- Heurística do Canal Específico Para a Escolha do Comprimento de Onda

As heurísticas das escolhas das larguras de banda dos λ s em redes ópticas são tratadas neste capítulo. Neste trabalho propomos um método chamado canal específico, que será comparado com dois métodos clássicos o first-fit e o menos utilizado.

5.1-Introdução

A otimização do uso da largura de banda de cada λ é importante em uma rede WDM, pois assim é possível aplicar técnicas como agregação waveband e conversão OEO esparsa sem sacrificar acentuadamente o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio. Algumas técnicas propostas na literatura são a escolha aleatória de λ s (random assignment) [45], menos usado (least used) [61] e mais usado (most used) [61], [62].

Nesse capítulo serão feitas as comparações entre as técnicas first fit [45] e menos utilizado com a técnica de canal específico proposta neste trabalho. Será mostrada a comparação entre os métodos utilizando o desempenho da taxa de utilização dos λ s e a probabilidade de bloqueio global em uma rede NSFNet com 14 nós com capacidade de realizar agregação de tráfego e 8 λ s disponíveis em cada fibra.

5.2-Técnicas de Escolha de Comprimentos de Onda

As técnicas first-fit, menos utilizado e canal específico são descritas a seguir.

1) First-fit (FF) – Nesse esquema, todos os λ s são numerados e o de número menor na lista é escolhido. Quando todos estão ocupados, o primeiro λ desocupado e com largura de banda disponível é o escolhido;

2) Menos-utilizado (MU) – Nesse esquema é calculada a taxa de utilização de cada λ em cada enlace e elas compõem um vetor em que são ordenadas crescentemente e o λ escolhido, que vai ser utilizado em todos os enlaces, é aquele que for o menos utilizado.

A utilização de banda do enlace é calculada subtraindo a banda total do λ da banda utilizada na conexão e depois dividindo pela banda total do λ . A divisão do

somatório da utilização da banda do λ pelo número de vezes que o λ é utilizado no enlace determina a taxa de utilização dos λ s no enlace.

A taxa de utilização dos λ s compõem o vetor escolha, ordenado em ordem crescente. Assim, o λ menos utilizado é escolhido para a chamada alocada.

3) Canal específico (CE) – Nesse esquema é especificado um λ para cada tipo de banda da rede. Desta maneira, para um determinado valor de banda, um λ é designado para a alocação da conexão em todo o caminho oriundo do algoritmo *Dijkstra*. Para os demais valores de banda os outros λ s de onda são designados.

A Figura 5.1 ilustra um exemplo em que 8 λ s são especificados para cada valor de banda.

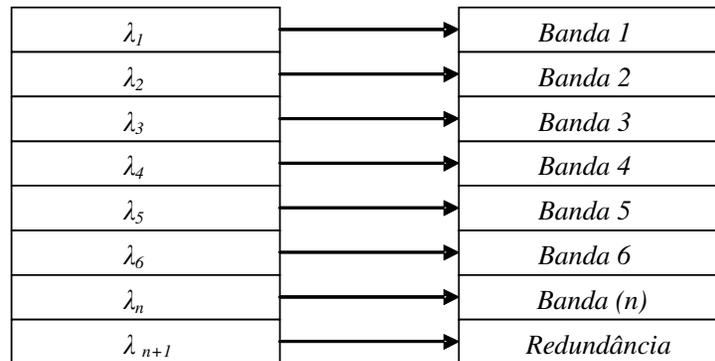


Figura 5.1: Comprimentos de onda e larguras de banda designadas.

Nesse esquema, no mínimo um λ funciona como redundância, ou seja, o algoritmo percorre todos os λ s específicos para cada largura de banda e, caso o canal esteja com largura de banda insuficiente, o algoritmo verifica a possibilidade de alocar a conexão no λ de redundância.

Tomando como exemplo as taxas de bit 155,52; 622,08; 933,12; 1.244; 1.866 e 2.488 Mbps e 8 λ s, podemos montar a seguinte distribuição de λ s, ilustrada na Figura 5.2.

λ_1	→	155 Mbps
λ_2	→	622 Mbps
λ_3	→	933 Mbps
λ_4	→	1244 Mbps
λ_5	→	1866 Mbps
λ_6	→	2488 Mbps
λ_7	→	Redundância
λ_8	→	Redundância

Figura 5.2: Comprimentos de onda e larguras de banda designadas.

5.3-Comparação entre os Métodos

Nessa seção serão feitas as comparações entre os dois métodos apresentados e o método proposto. Será avaliado o desempenho de cada λ para os métodos first-fit, menos utilizado e canal específico com base na taxa de utilização de λ e na probabilidade de bloqueio global da rede como métrica de avaliação. A Equação (5.1) representa o cálculo da taxa de utilização do λ .

$$U_{\lambda_n} = \frac{\sum UB_{\lambda_n}}{\sum C_{\lambda_n}} \quad (5.1)$$

na qual UB_{λ_n} é a utilização da banda no enlace e é calculada por:

$$(BT_{\lambda} - BU_{\text{Conexão}}) / BT_{\lambda} \quad (5.2)$$

na qual BT_{λ} é a banda total do λ , $BU_{\text{Conexão}}$ é a banda utilizada na conexão. O C_{λ_n} é o número de vezes que o λ foi utilizado no enlace.

A Tabela 5.1 fornece o valor das respectivas taxas de bit e as probabilidades de chegada de cada solicitação de conexão e a Figura 5.3 a rede utilizada na simulação. Utilizamos maior probabilidade de geração de tráfego com baixas taxas de bit em detrimento a maiores taxas para simular tráfego semelhante ao real.

Tabela 5.1: Classes de Serviços e Taxas de bit.

Classes de Serviços	Taxas de bit (Mbps)	Probabilidade de Chegada
1	155,2	59%
2	622,08	15%
3	933,12	10%
4	1.244	8%
5	1.866	5%
6	2.488	3%

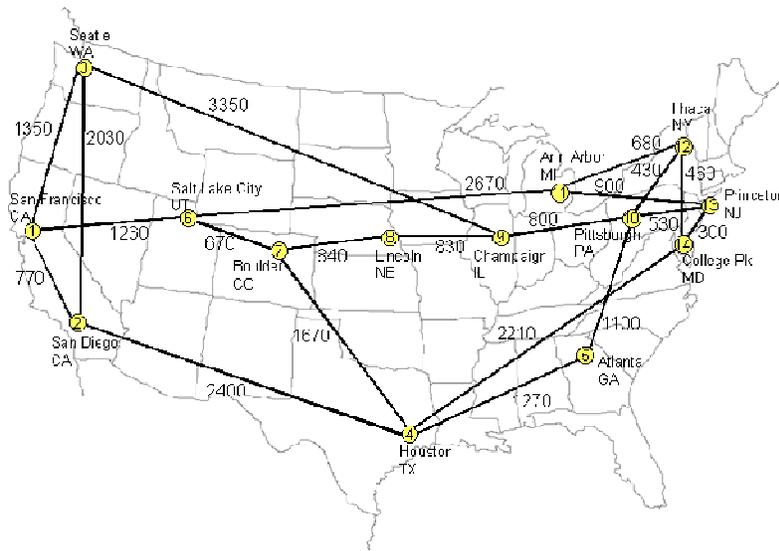
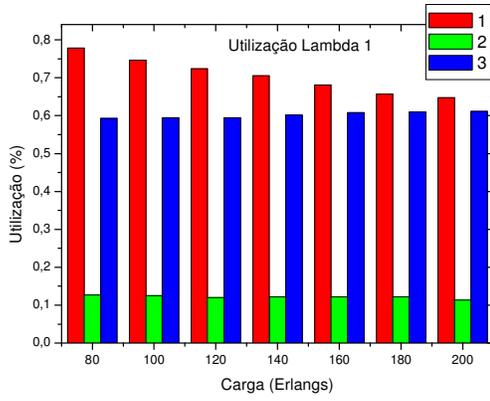


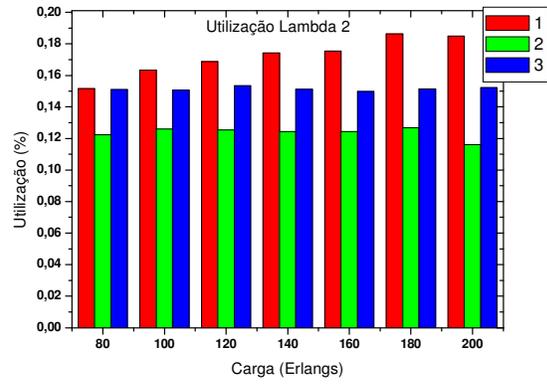
Figura 5.3: Rede NSFNet [45].

O total de 100.000 conexões foram geradas nos nós. O tempo de espera da conexão é distribuído exponencialmente com média de 60 segundos. Excedido o tempo de espera, a conexão é desfeita e a banda que foi utilizada em waveband ou λ isolado fica à disposição para atender novas solicitações.

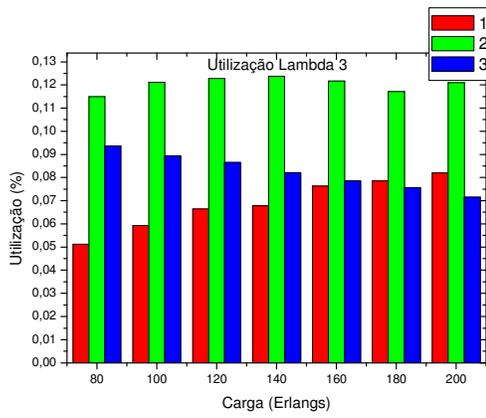
A Figura 5.4 ilustra os gráficos da utilização dos oito λ s sendo: 1) First-Fit, 2) Menos Utilizado e 3) Canal Específico.



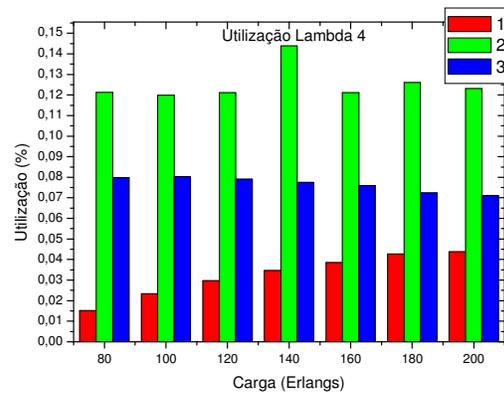
(a)



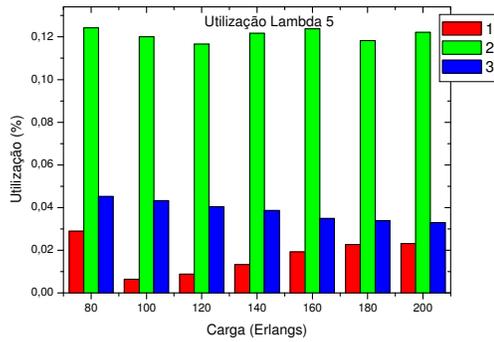
(b)



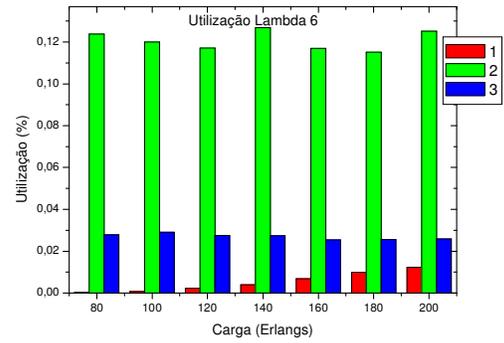
(c)



(d)



(e)



(f)

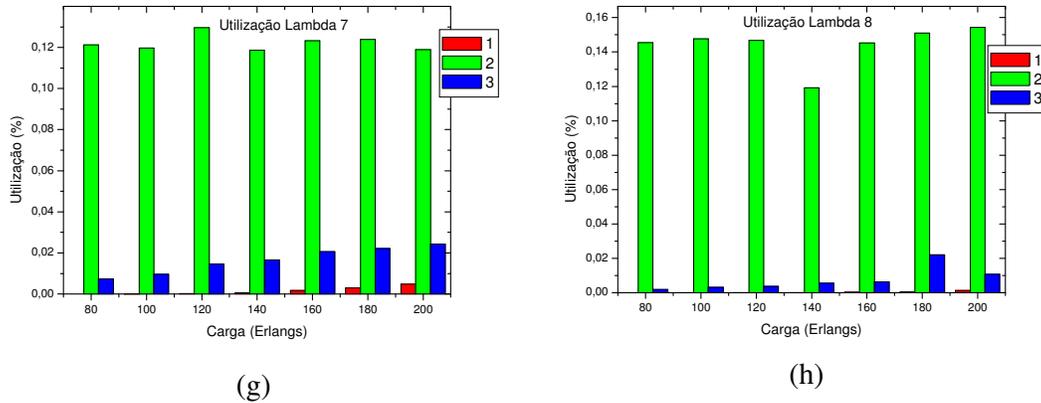


Figura 5.4: (a)Taxa de utilização do λ_1 ;(b) λ_2 ;(c) λ_3 ;(d) λ_4 ;(e) λ_5 ;(f) λ_6 ;(g) λ_7 ; (h) λ_8 .

O método FF (1) apresenta taxa de utilização maior nos primeiros λ s e essa taxa vai diminuindo à medida que se aproxima do λ final. O algoritmo FF tenta alocar o maior número de largura de banda para os λ s iniciais ou que estão nos primeiros lugares de uma lista pré-determinada.

O método MU (2) apresenta uma distribuição de faixa mais equalizada porque a escolha do λ a ser utilizado no primeiro enlace é baseada na utilização dos λ s de toda a rede. Todas as larguras de faixa da rede podem ser alocadas em qualquer λ disponível.

O método CE (3) trabalha com alocação de λ s específicos para cada taxa de bit, assim cada λ fica responsável por alocar uma demanda específica de taxa. O λ_1 apresentará valor maior de taxa de utilização porque a probabilidade de chegada do número de conexões de 155 Mbps é cerca de 59%; o λ_2 tem um valor menor porque a taxa de chegada de conexões é de cerca de 15% e assim por diante até a menor utilização, que ocorre para λ_8 devido à baixa taxa de chegada das conexões de 2,5Gbps.

Para a largura de banda de 933 Mbps, verificou-se que com carga elevada a alocação de apenas um λ não proporciona um pleno funcionamento do esquema proposto porque essa taxa possui o terceiro maior valor de probabilidade de chegada (10%) e consegue-se alocar apenas 2 conexões em um λ com largura de banda máxima de 2,5 Gbps sendo que 634 Mbps são desperdiçados. Portanto, foi atribuído mais um λ para a largura de banda de 933 Mbps e uma nova distribuição é apresentada na Figura 5.5.

A Figura 5.6 ilustra a comparação do desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio.

λ_1	→	155 Mbps
λ_2	→	622 Mbps
λ_3	→	933 Mbps
λ_4	→	1244 Mbps
λ_5	→	1866 Mbps
λ_6	→	2488 Mbps
λ_7	→	933 Mbps
λ_8	→	Redundância

Figura 5.5: Comprimentos de onda e larguras de banda designadas.

O λ_8 é alocado para atuar como redundância, ou seja, o algoritmo percorre todos os λ_s específicos para cada tipo de tráfego e, caso o canal esteja com largura de banda insuficiente, o algoritmo verifica a possibilidade de alocar a conexão no λ_8 .

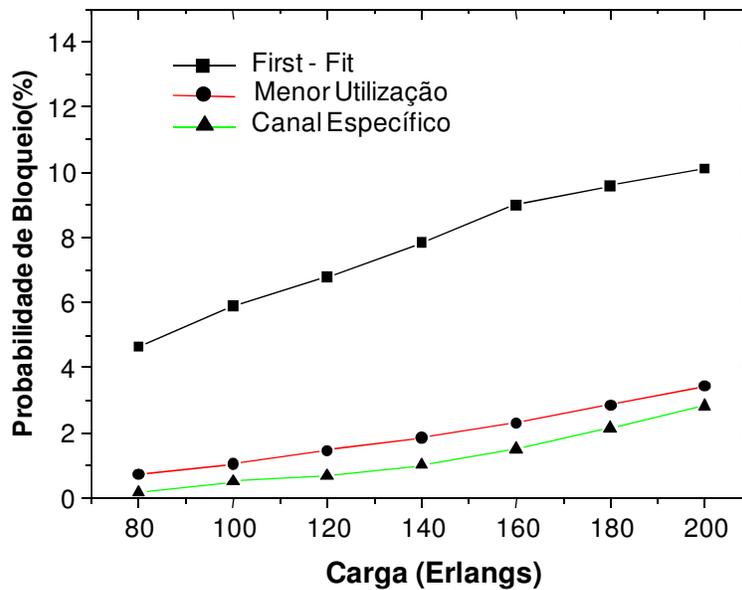


Figura 5.6: Comparação da probabilidade de bloqueio global dos 3 métodos de escolha de λ_s .

Nota-se pela Figura 5.6 que, com a aplicação do método FF, a rede apresenta a mais alta probabilidade de bloqueio. Apesar de apresentar a melhor taxa de utilização dos λ_s porque verifica a sua disponibilidade levando em consideração os λ_s de todos os enlaces da rede, o esquema MU não consegue apresentar a melhor probabilidade de bloqueio. Ocorre que muitas vezes o λ escolhido como menos utilizado em um enlace

qualquer da rede não apresenta largura de banda disponível para ser alocado no primeiro enlace da conexão em andamento.

Com o esquema de CE proposto, a alocação de uma determinada largura de banda em λ específico resulta em melhor aproveitamento da sua largura de banda. Alocando o mesmo tipo de tráfego em um λ , diminui-se a probabilidade de largura de banda que não pode ser utilizada devido a composição de várias bandas diferentes em um mesmo λ .

6- Esquema de Monitoramento de Redes WDM Baseado na Intensidade de Tráfego

O esquema proposto de monitoramento de nós e liberação de recursos é descrito nesse capítulo. O algoritmo é exaustivamente testado em uma rede sem escala genérica antes de ser aplicado em uma rede de comutação waveband.

6.1- Definição de Redes Aleatórias e Rede Sem Escala

O grau de um nó é caracterizado por uma função de distribuição $P(k)$ que é a probabilidade que um nó aleatoriamente selecionado tenha exatamente k enlaces. No caso de uma rede totalmente aleatória, o grau de distribuição obedece a uma distribuição de Poisson que decresce exponencialmente do valor de pico do grau de distribuição médio ($\langle k \rangle$) da rede. Por causa desse declínio exponencial, a probabilidade de se encontrar um nó com k extremidades torna-se menor para $k \gg \langle k \rangle$ [63].

Um número particular de redes pode ser descrito pela lei da potência $P(k) = k^{-\lambda}$. Essa lei de distribuição decresce mais rapidamente que uma exponencial, permitindo que poucos nós com altos graus de distribuição existam. Essas redes com essas características são chamadas de sem escala.

6.2 - Liberação de Recurso Através do Esquema de Monitoramento de Nós

Devido ao aumento do valor da probabilidade de bloqueio em redes aleatórias que utilizam wavebands ou em redes sem escala com ou sem waveband, um sistema de monitoramento por meio do qual recursos são liberados aos nós mais congestionados é proposto. Nesse esquema, a quantidade de nós que serão monitorados é escolhida previamente, mas os nós que terão acréscimo de recurso são escolhidos dinamicamente de acordo com o grau de congestionamento do nó (R_n) e a média das diferenças (M_n) que serão definidas posteriormente pelas equações (6.2) e (6.3). Quanto maior a média das diferenças, mais chances o nó tem de ser escolhido para receber recursos e, assim, alocar número maior de conexões.

O esquema de monitoramento funciona da seguinte maneira:

1. É definido o número total de nós que se deseja monitorar;
2. O total de conexões em cada instante da simulação em cada nó n da rede é computado por meio de

$$C_n = C_{n(o)} + C_{n(p)} + C_{n(c)} \quad (6.1)$$

na qual $C_{n(o)}$ é o número de conexões que se originam no nó, $C_{n(p)}$ é o número de conexões que passam pelo nó e $C_{n(c)}$ é o número de conexões que terminam no nó;

3. Computado o total de conexões, o valor de R_n é calculado de acordo com

$$R_n = \frac{PB}{C_n} \quad (6.2)$$

na qual PB é a probabilidade de bloqueio da rede até o passo do algoritmo. A relação R_n é uma estimacão do fluxo de tráfego pelo nó.

4. O valor de R_n é calculado para cada nó n da rede e deste valor é subtraído os valores dos nós restantes. Para uma rede com d nós temos, para cada valor de R_n , a seguinte média das diferenças M_n , na qual u é a quantidade de diferenças do somatório.

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^d \Delta R_i}{(u)}, \text{ para } \Delta R_i > 0 \text{ e } i \neq n \quad (6.3)$$

na qual $\Delta R_i = R_n - R_i$ e u é a quantidade de diferenças do somatório.

5. Para T nós monitorados, os K maiores valores de M_n serão escolhidos para que sejam comparados com um limiar pré-estabelecido L. Assim, se M_n for maior que o limiar é acrescentado um valor de banda aos enlaces que atendem ao nó.

O exemplo a seguir ilustra a aplicação do método.

Seja uma rede com quatro nós e cem conexões, na qual, no intervalo de eventos 50 a 60, (6.1) resulta em: $C_1 = 6$; $C_2 = 15$; $C_3 = 5$; $C_4 = 8$.

Supondo a probabilidade de bloqueio global nesta etapa $PB=0,05$ então: $R_1=0,05/6 = 0,008$; $R_2=0,05/15 = 0,003$; $R_3=0,05/5 = 0,01$; $R_4=0,05/8 = 0,006$.

Supondo $T=2$, para os quatro nós: $M_1 = |0,008-0,003| + |0,008-0,006| = 0,005+0,002 = (0,007/2) = 0,0035$; $M_2 = 0$; $M_3 = |0,01-0,008| + |0,01-0,003| + |0,01 -$

$0,0061 = 0,002 + 0,007 + 0,004 = (0,013/3) = 0,0043$; $M_4 = |0,006 - 0,003| = (0,003/1) = 0,003$.

Desta maneira, temos em ordem decrescente 0,0043; 0,0035; 0,003; 0, ou seja, $[M_3, M_1, M_4, M_2]$. Portanto, se o limiar for $L=0,003$, então os nós que serão monitorados serão o 3 e o 1, pois $M_3 > L$ e $M_1 > L$.

O procedimento de monitoramento é baseado na escolha de nós que apresentam as maiores diferenças calculadas por (6.2) em relação aos outros nós da rede. Desta maneira, o objetivo é escolher nós de maneira mais apurada, com base nas diferenças que um nó apresenta em relação aos demais. Um valor R_n de um nó que difere significativamente indica que C_n também destoa dos demais, apresentando um menor número de conexões de maiores larguras de faixa, contribuindo para o bloqueio geral da rede.

6.3-Inclusão do Esquema de Monitoramento de Nós no Algoritmo Proposto

Nessa seção descrevemos mais um bloco incluído no algoritmo de implementação do waveband. O bloco monitora as conexões que passam pelos nós da rede e decide se há necessidade de liberar recursos.

As variáveis do bloco de monitoramento são: C_n é o total de conexões, R_n é o grau de congestionamento dos nós, M_n é a média das diferenças e L é o limiar pré-estabelecido.

Início do Algoritmo

Bloco de Monitoramento

Parâmetros de Entrada: Número de nós a ser monitorado, tipo de recurso escolhido para ser liberado e valor do limiar.

Parâmetros de Saída: Quantidade de nós monitorados.

Algoritmo:

Passo 1: Calcular os parâmetros por meio de (6.1), (6.2) e (6.3);

Passo 2: Comparar a equação (6.3) com o valor do limiar L pré-estabelecido;

Passo 3: Caso o valor de (6.3) seja maior que o limiar L liberar recursos para os nós selecionados.

A Figura 6.1 ilustra o fluxograma do algoritmo.

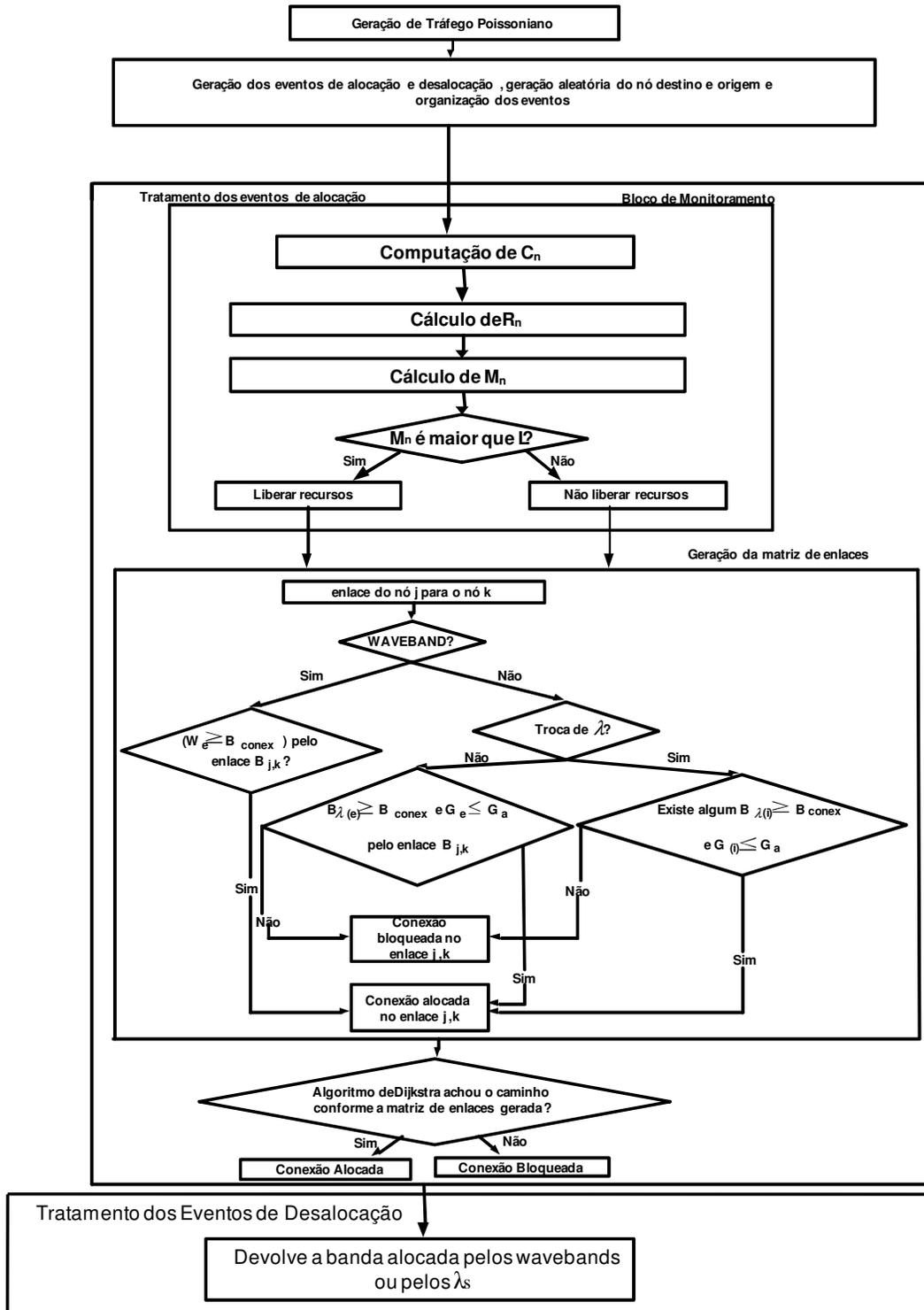


Figura 6.1: Fluxograma do algoritmo proposto. C_n é o total de conexões, R_n é o grau de congestionamento dos nós, M_n é a média das diferenças, L é o limiar pré-estabelecido, j é o nó origem do enlace, k é o nó destino do enlace, i é a conexão em andamento, W_e é o waveband, B_{conex} é a banda da conexão, B_{λ} é a banda do λ , G_e é o fator de agregação de λ , G_a é o fator de agregação, $G_{(i)}$ é o fator de agregação da conexão.

6.4 - Desempenho do Esquema de Monitoramento

A Figura 6.2 mostra a topologia de uma rede óptica sem escala gerada pelo programa “B-A scale-free network generation and visualization” [64] e utilizada na simulação. Ela é formada por 21 nós e 40 enlaces bidirecionais. Cada enlace conectando dois nós tem 8 λ s com largura de banda disponível. A requisição de conexões segue a distribuição de Poisson e o tempo de espera da conexão é distribuído exponencialmente com média 60 segundos. Quando a conexão excede o tempo de espera sua largura de banda é liberada para outras conexões. Nas simulações, 100.000 requisições de conexão são geradas e as taxas de bits utilizadas são as mesmas mostradas na Tabela 5.1.

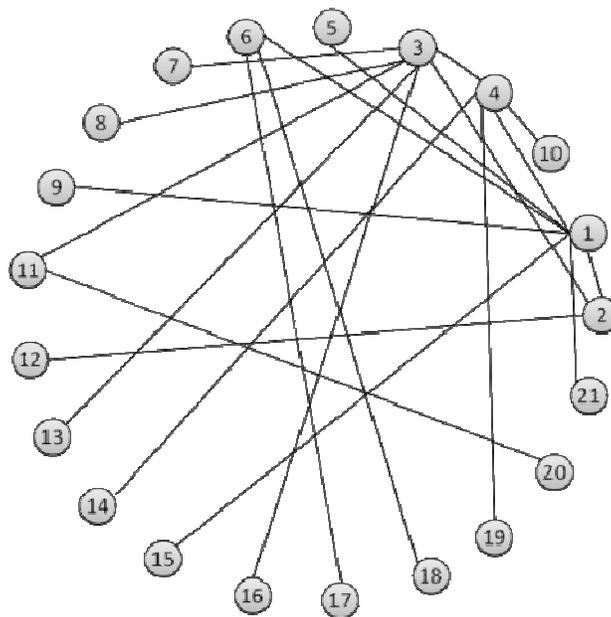


Figura 6.2: Rede “scale-free” utilizada para a simulação do sistema de monitoramento.

Após uma série de simulações com diferentes valores de limiares, o valor escolhido de L para que o nó seja monitorado foi 10^{-6} . A Figura 6.3 ilustra a simulação de diferentes valores de limiares produzindo diferentes probabilidades de bloqueio. Podemos observar na Figura que a partir do limiar 10^{-3} as contribuições passam a ser marginais se estabilizando em 10^{-6} . A simulação foi feita utilizando rede ilustrada na Figura 6.2 com 5 nós monitorados.

A largura de banda é o recurso escolhido para ser liberado. Quando nó for escolhido pelo processo de monitoramento, 2,5 Gbps de banda são acrescentados,

apenas uma vez, aos enlaces que atendem esse nó e assim ele é capaz de alocar mais conexões.

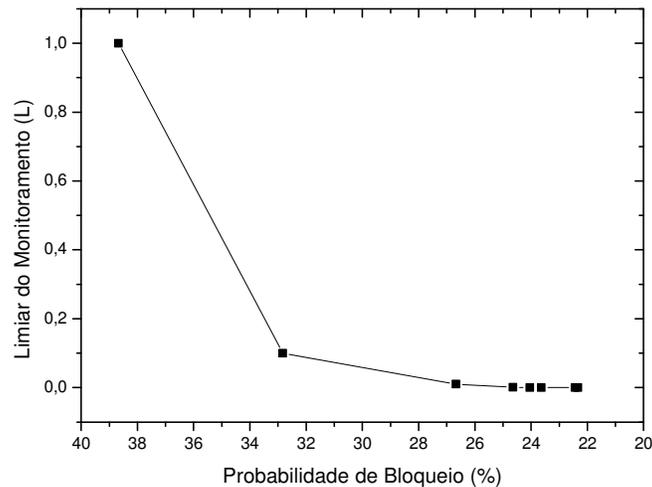


Figura 6.3. Variação do valor do limiar de monitoramento (L) produzindo diferentes probabilidades de bloqueio para a rede da Figura 6.2 com 5 nós monitorados.

A Figura 6.4 mostra as probabilidades de bloqueio da rede na qual está sendo aplicado o esquema de monitoramento com um λ adicional com capacidade de 2,5 Gbps para os 8 λ s de cada enlace. As configurações simuladas são as seguintes:

1. Sem monitorar;
2. Com 2 nós monitorados;
3. Com 5 nós monitorados;
4. Com 10 nós monitorados;
5. Com 15 nós monitorados;
6. Com 20 nós monitorados.

Visto que os nós concentradores são os nós mais conectados, os seus enlaces são intensamente requisitados, o que os faz ser frequentemente candidatos a receber largura de banda extra. O número de nós monitorados é escolhido arbitrariamente, mas o algoritmo monitora dinamicamente os nós com maior demanda. Como os nós concentradores são os nós com maior demanda, seus enlaces frequentemente são incluídos no esquema de monitoramento. A Figura 6.4 ilustra a probabilidade de bloqueio global das requisições de conexão em função da carga da rede. As simulações foram feitas com elevados valores de tráfego para demonstrar o desempenho do esquema de monitoramento proposto.

A Figura 6.4 mostra que para maiores cargas, a probabilidade de bloqueio sobe

porque a largura de banda disponível nos λ s diminui. A probabilidade de bloqueio é maior sem o esquema de monitoramento. Os enlaces mais requisitados estão associados aos nós mais conectados uma vez que esses nós encurtam a distância entre o restante dos nós da rede.

A probabilidade de bloqueio diminui fortemente quando o número de nós monitorados chega perto do número total de nós da rede. Em uma topologia de rede do tipo sem escala significa que o plano de controle monitora praticamente toda a rede, incluindo os nós concentradores. Assim apenas nós com um pequeno número de conexões permanece sem monitoramento.

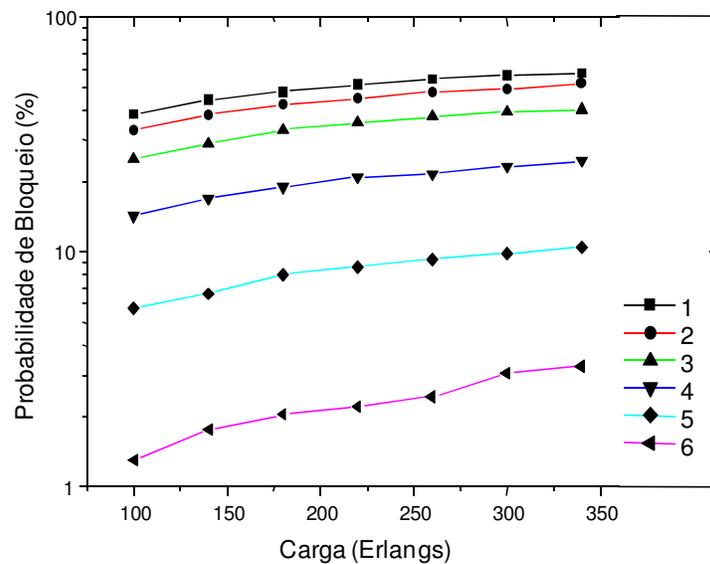


Figura 6.4: Probabilidades de bloqueio com 1 λ disponível extra para efetuar o monitoramento.

Dessa forma concluímos que para a configuração com apenas 1 λ reservado para o monitoramento o maior peso é no número de nós monitorados em relação à quantidade de λ s usados para ampliar a banda.

A Figura 6.5 é semelhante à Figura 6.4 e difere apenas na quantidade de λ s extras que estão disponíveis para atender os enlaces dos nós monitorados. Nesse caso, há 1 λ disponível com 2,5 Gbps de banda extra cada para cada λ de recurso no enlace. À medida que o número de nós monitorados aumenta, o desempenho da rede também sofre uma sensível melhora.

As principais diferenças em relação à Figura 6.4 é que de 2 para 5 nós monitorados a probabilidade de bloqueio da configuração com 8 λ s de reserva sofre uma diminuição bem mais acentuada e de 15 para 20 nós monitorados a diferença da

probabilidade de bloqueio não é tão acentuada quanto na configuração com 1 λ de reserva.

Esse comportamento é devido ao aumento do número de λ s de reserva disponíveis para atender os nós congestionados. Com apenas 5 nós monitorados existem poucos enlaces com banda aumentada, mas devido à característica da rede concentrar muitas conexões em poucos nós e estarem disponíveis até 8 λ s de reserva com largura de banda para suportar novas conexões faz a probabilidade de bloqueio ser menor. Com 15 nós monitorados e 8 λ s a maioria dos enlaces com necessidade de ampliação de banda já foi atingida.

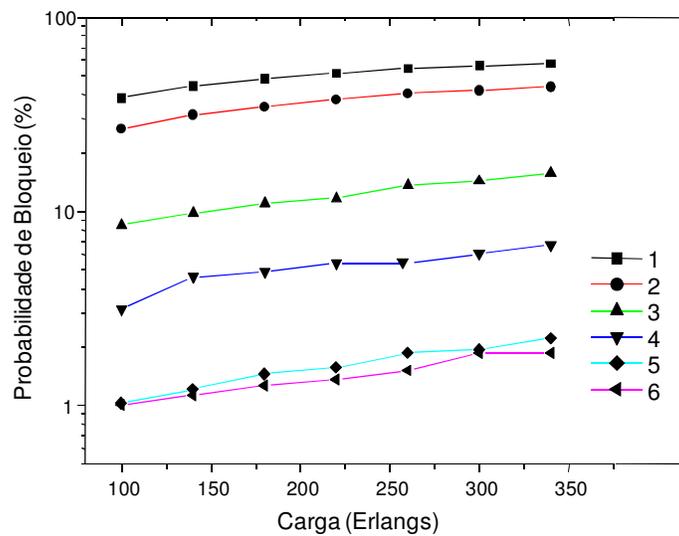


Figura 6.5: Probabilidades de bloqueio com 8 λ s extras disponíveis para efetuar o monitoramento.

Assim, para essa configuração destaca-se a quantidade de λ s utilizados para ampliar a banda em detrimento a quantidade de nós monitorados.

A Figura 6.6 ilustra a comparação da configuração com 20 nós monitorados mostradas na Figuras 6.4 e 6.5. Para uma topologia de rede do tipo sem escala e com 20 nós monitorados não existe uma diferença muito grande. Ocorre que para esse tipo de rede com muitos nós concentradores e com esse intervalo de cargas de tráfego analisadas 1 λ já consegue suprir em grande parte a demanda por mais banda sendo a contribuição com 8 λ s apenas marginal.

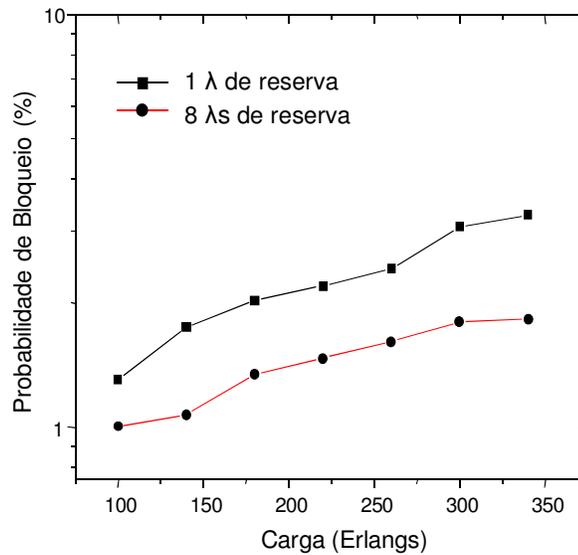


Figura 6.6: Comparação entre as probabilidades de bloqueio com 20 nós monitorados e 1 λ e 20 nós monitorados e 8 λ s.

As Figuras 6.7 e 6.8 mostram a influência do acréscimo de λ s de reserva na rede com 2 e 20 nós monitorados, respectivamente. As configurações simuladas foram com 1 a 8 λ s: 1) 1 λ de reserva; 2) 2 λ s; 3) 3 λ s; 4) 4 λ s; 5) 5 λ s; 6) 6 λ s; 7) 7 λ s e 8) 8 λ s.

Para os dois casos ocorre uma pequena variação da probabilidade de bloqueio à medida que aumenta o número de λ s de reserva na rede. Uma diferença maior ocorre quando se passa de um λ reserva para 2 λ s. A partir daí a contribuição na diminuição da probabilidade de bloqueio é mínima ou não ocorre. Isso acontece devido à característica da rede de possuir muitos nós concentradores que servem de menor caminho para a maioria das conexões com os outros nós e por isso tem seus recursos rapidamente esgotados necessitando fazer uso dessa banda reserva de forma intensa. Dessa forma, para o intervalo de tráfego analisado, com 2 λ s de reserva já se consegue suprir a necessidade em termos de largura de banda para alocação de mais conexões.

Assim, verifica-se que a utilização de 1 ou de 8 λ s de reserva dá apenas um ganho marginal ao desempenho em termos de probabilidade de bloqueio devido à característica da rede e do intervalo de tráfego analisado.

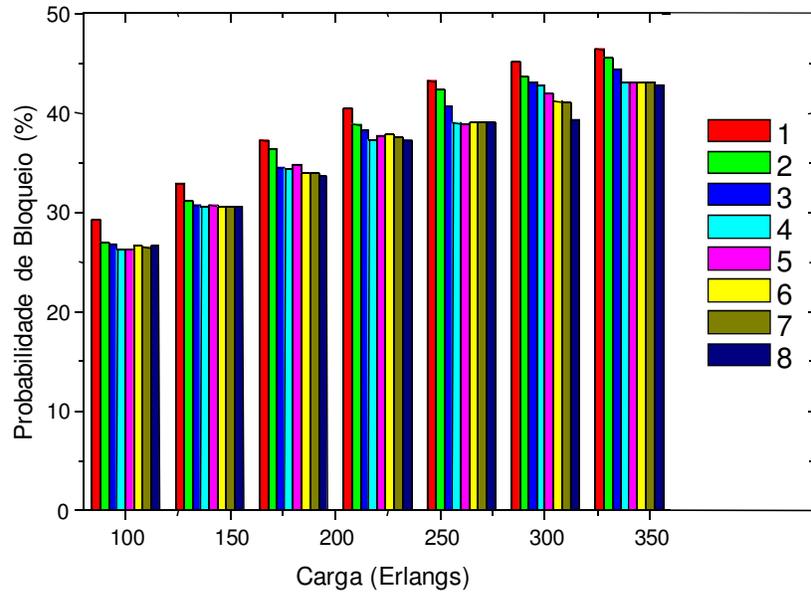


Figura 6.7: Contribuição da inserção de mais λ s em dois nós monitorados.

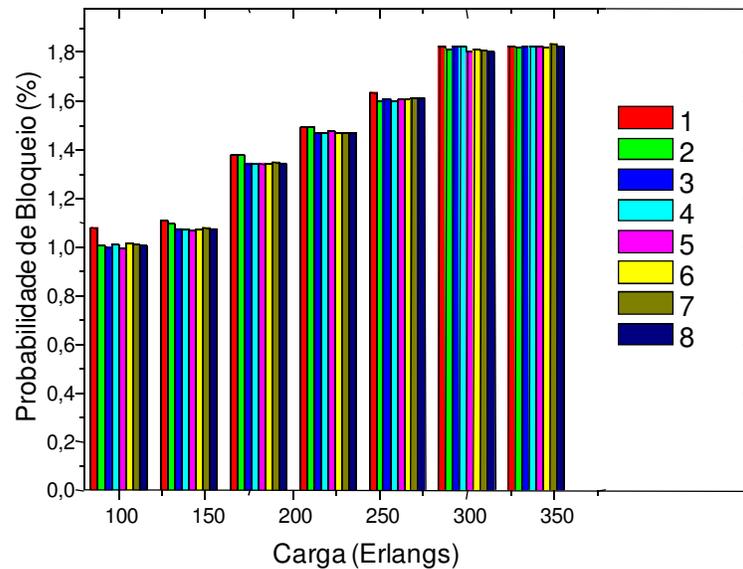


Figura 6.8: Contribuição da inserção de mais λ s em vinte nós monitorados.

A Figura 6.9 ilustra o desempenho da rede com oito e nove λ s em cada enlace sem o sistema de monitoramento ativo e com oito λ s com o sistema de monitoramento ativo sendo dois nós monitorados com oito λ s de reserva. Sem a ativação do sistema de monitoramento para a detecção de congestionamento e efetiva liberação de recursos, a técnica de gerenciamento de mais λ s fica restrita ao método de escolha first-fit, que utiliza de forma mais intensa os λ s iniciais disponíveis ao enlace.

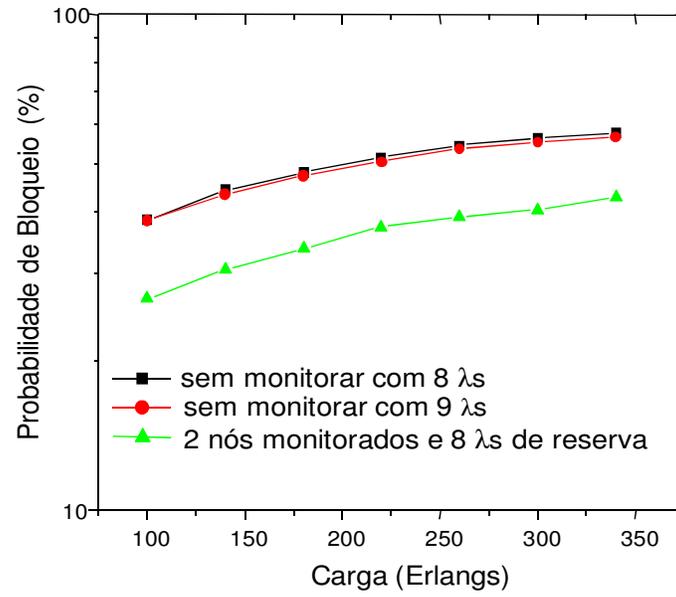


Figura 6.9: Comparação da probabilidade de bloqueio entre oito λ s sem monitorar, 9 λ s sem monitorar e 8 λ s com 2 nós monitorados.

7-Resultados Numéricos

Na primeira parte deste capítulo será feita uma análise da rede considerando a técnica waveband com utilização de agregação uniforme e não uniforme. Será abordado o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio e analisado o custo relativo entre portas. Em seguida será feita a análise do esquema de canal específico proposto em conjunto com a técnica de agregação waveband considerando apenas probabilidade de bloqueio.

Posteriormente, será feita a análise da rede considerando as restrições físicas apresentadas no Capítulo 4, com as redes totalmente ópticas, e com alguns nós com capacidade de conversão OEO. Em seguida, será feita a simulação da técnica waveband incluindo as características físicas na simulação.

Na segunda parte, será feita a análise da técnica waveband em conjunto com o esquema proposto de monitoramento de desempenho baseado na intensidade de tráfego das redes ópticas.

Todas as simulações foram feitas para 100.000 chamadas na rede e geração de tráfego Poissoniana com duração média das chamadas 60 segundos e utilizam as taxas de bits e probabilidades de chegada ilustradas na Tabela 7.1.

Utilizamos maior probabilidade de geração de tráfego com baixas taxas de bit em detrimento a maiores taxas para simular tráfego semelhante ao real.

Tabela 7.1: Classes de serviços e taxas de bit.

Classes de Serviços	Taxa de Bit (Mbps)	Probabilidade de Geração (%)
1	155,2	59
2	622,08	15
3	933,12	10
4	1244	8
5	1866	5
6	2488	3

7.1-Análise do Custo e Probabilidade de Bloqueio dos Nós com Troca de Comprimento de Onda

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a simulação do sistema waveband com quatro λ s agregados e com a inclusão da função de troca de λ . Na Seção 7.1.1 o gerenciamento de conexões realiza apenas as conexões do tipo wb-wb e λ - λ , simulando um nó MG-OXC de uma camada. Na Seção 7.1.2 o gerenciamento de conexões permitirá conexões do tipo wb- λ , λ -wb e λ -wb- λ simulando um MG-OXC de três camadas.

7.1.1-Análise do Custo e Probabilidade de Bloqueio dos Nós com Troca de Comprimento de Onda em nós MG-OXC de Uma Camada

Os nós que realizam agregação waveband são os nós 6, 7, 8, 9, 10 e 13 da rede NSFNet [45], mostrados na Figura 7.1. As simulações foram realizadas com 12 λ s por enlace e 2 wavebands com 4 λ s agregados. Os nós que realizam a agregação waveband foram escolhidos para formar uma seqüência entre os dois extremos da rede, dado que uma conexão waveband somente é estabelecida quando todos os nós participantes são MG-OXC. O método de escolha de λ é o first-fit.

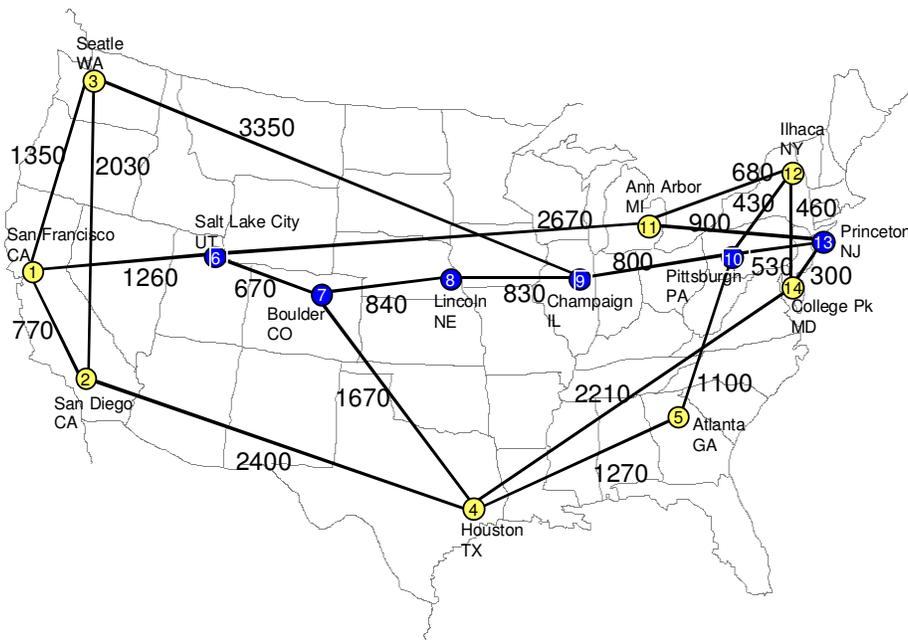


Figura.7.1: Topologia NSFNet 12 λ s por enlace. Os nós 6,7,8,9 10 e 13 são nós com capacidade de agregação waveband. Todos os nós executam agregação de tráfego em portas com λ s isolados ao waveband.

A agregação de tráfego nos λ s é feita em todos os nós OXC e a agregação de tráfego nos λ s isolados é feita nos nós MG-OXC. O fator de agregação é 16.

A troca de λ é realizada no domínio eletrônico e a alocação dos nós 4, 11 e 12 que realizam essa função é feita com base em várias simulações. Esta alocação produz o melhor desempenho da probabilidade de bloqueio global. Quando o nó possui o recurso de agregação waveband as portas de λ s isolados podem ou não realizar a troca de λ s.

Cinco configurações foram simuladas. São elas:

1. Os nós que possuem o recurso de agregação waveband são 6, 7, 8, 9, 10 e 13. Esses nós também possuem o recurso de realizar a troca de λ e agregação de tráfego nos λ s isolados. Os nós 4, 11 e 12 não possuem o recurso de agregação waveband, mas possuem capacidade de troca de λ e agregação de tráfego. O restante dos nós não permitem troca de λ e nem agregação waveband, sendo nós OXC com capacidade de agregação de tráfego;
2. Os nós que possuem o recurso de realizar agregação waveband são os nós 6, 7, 8, 9, 10 e 13. Esses nós não possuem recurso de troca em λ s isolados, mas possuem capacidade de agregação de tráfego. O restante dos nós não permite troca de λ e nem agregação waveband, sendo nós OXCs com capacidade de agregação de tráfego;
3. Os nós da rede não possuem recurso para realizar a agregação waveband. Os nós 4, 11 e 12 possuem recurso de troca de λ e agregação de tráfego, mas não possuem o recurso de agregação waveband. O restante dos nós não possui recurso de agregação waveband e nem de troca de λ , sendo nós OXCs com capacidade de agregação de tráfego;
4. Os nós 6, 7, 8, 9, 10 e 13 possuem recurso de realizar a agregação waveband. Esses nós não possuem recurso de troca em λ s isolados, mas possuem capacidade de agregação de tráfego. Os nós 4, 11 e 12 possuem recurso de troca de λ e agregação de tráfego, mas não possuem o recurso de agregação waveband. O restante dos nós não permite agregação waveband e nem troca de λ , sendo nós OXCs com capacidade de agregação de tráfego;
5. Todos os nós da rede são OXCs possuem apenas recurso de agregação de tráfego.

A Tabela 7.2 mostra as configurações citadas acima.

Tabela 7.2: Configurações da rede simuladas.

Arquitetura dos Nós	Nós da Rede	Recurso do nó
1	6, 7, 8, 9, 10 e 13	WC-MG-OXC
	4, 11 e 12	WC-OXC
	1, 2, 3, 5 e 14	OXC
2	6, 7, 8, 9, 10 e 13	MG-OXC
	1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 e 14	OXC
3	4, 11 e 12	WC-OXC
	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13 e 14	OXC
4	6, 7, 8, 9, 10 e 13	MG-OXC
	4, 11 e 12	WC-OXC
	1, 2, 3, 5 e 14	OXC
5	1 a 21	OXC

A relação custo-benefício é calculada de acordo com (3.1). A Figura 7.2 mostra as probabilidades de bloqueio das 5 configurações simuladas.

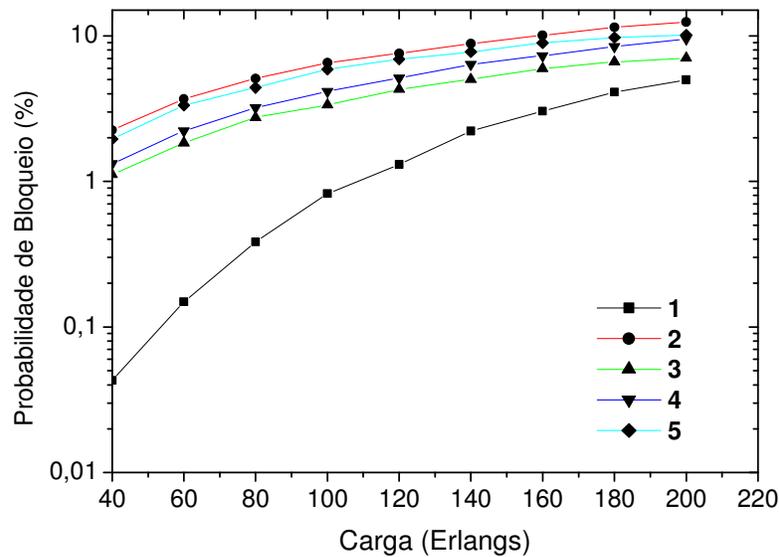


Figura 7.2: Probabilidades de bloqueio das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de uma camada. A descrição das configurações 1 a 5 estão na Tabela 7.2.

A configuração 2 apresenta a maior probabilidade de bloqueio, justamente por não possuir o recurso de troca de λ nos nós e por utilizar wavebands. Nessa

configuração a restrição de continuidade de λ ao longo dos enlaces que servem uma conexão é respeitada e o λ escolhido no primeiro enlace precisa estar com banda disponível em todos os enlaces da conexão para que ela seja alocada. A presença de nós com capacidade de realizar agregação waveband em uma conexão é restrita e a conexão somente pode ser alocada se todos os nós ao longo do caminho óptico são igualmente nós com capacidade de agregação waveband. Portanto, se a conexão é iniciada em um λ agregado ao waveband ela permanece até o seu destino final, quando é novamente desagregada em um λ . Caso a conexão se inicie em um nó waveband, mas em um λ isolado, ela deixa de ser restrita apenas aos λ s reunidos ao waveband e pode trafegar entre os nós OXCs e MG-OXCs.

Em outro extremo, a configuração 1 tem a menor probabilidade de bloqueio por dispor de maior número de recursos como troca de λ nos λ s isolados no nó MG-OXC, e troca de λ nos nós 4, 11 e 12. Assim, nessa configuração, a restrição de continuidade de λ em alguns enlaces não precisa ser respeitada. Por exemplo, uma conexão que se inicia no nó 1 com o λ_1 , mas passa pelos nós 4, 11 ou 12, pode ter o λ_1 convertido, se houver falta de banda, em qualquer outro dos 11 λ s com largura de banda disponível e seguir até seu destino final sem ser bloqueada por falta de banda. Isso ocorre também com os λ s isolados dos nós MG-OXC. A conexão se inicia em algum dos nós em um λ isolado e pode sofrer troca para que a conexão não seja bloqueada por falta de banda. Caso a conexão se inicie em algum nó que possui waveband e em um λ agregado ao waveband ela ficará restrita apenas aos nós que realizam waveband.

As configurações 3 e 5 não possuem recurso waveband, mas a configuração 3 possui troca de λ nos nós 4, 11 e 12, justificando assim seu desempenho melhor em relação à configuração 5. A configuração 4 dispõe do recurso waveband, mas seu desempenho é inferior, em termos de probabilidade de bloqueio, porque não há a função de troca de λ em nenhum de seus nós. As conexões que usam os λ s agregados ao waveband ficam restritas entre os nós com essa característica.

O comportamento da probabilidade de bloqueio global de todas as configurações é típico, aumentando com o tráfego na rede à medida que os recursos vão sendo exauridos.

A Tabela 7.3 mostra o volume de utilização das portas wb, λ e λ com troca utilizados para o cálculo da relação custo-benefício dada por (3.1) para uma carga de 100 erlangs. Devido ao grande número de nós com a função de troca de λ presente na configuração 1, o uso de suas portas se torna alto, diferente das configurações 2, 3 e 4,

nas quais as portas com λs sem a função de troca são as mais utilizadas em função da maior quantidade de nós OXCs na rede. As portas dos nós que realizam waveband ficaram com uma média de utilização 15%. Cerca de 42,85% dos nós da rede são equipados com duas portas waveband que estão restritas a apenas conexões do tipo wb-wb. Essa restrição diminui consideravelmente a utilização das portas waveband, além de aumentar a probabilidade de bloqueio da rede.

Tabela 7.3: Volume de utilização das portas dos nós simulados.

Arquitetura dos Nós	Utilização de portas com waveband (%)	Utilização de portas com λs (%)	Utilização de portas com troca de λs (%)
1	14,67	24,77	60,55
2	15,045	61,45	23,50
3	Não se aplica	76,57	23,42
4	15,54	84,30	Não se aplica
5	Não se aplica	100	Não se aplica

O gráfico da Figura 7.3 ilustra a relação do custo total das configurações com as chamadas aceitas (benefício) pela rede para uma carga de 100 erlangs e para 50.000 conexões. Por meio do cálculo do coeficiente de correlação (r) é possível hierarquizar as configurações, ilustradas na Tabela 7.4, mostrando as escalas das configurações com maior benefício e menor custo e as com pior benefício e maior custo para que, posteriormente, seja calculada a relação custo-benefício por meio de (3.1).

O valor obtido para o coeficiente de correlação foi $r = -0,5149$, indicando uma correlação negativa moderada, ou seja, para essas configurações, em média, valores altos de custo correspondem a valores baixos de benefício.

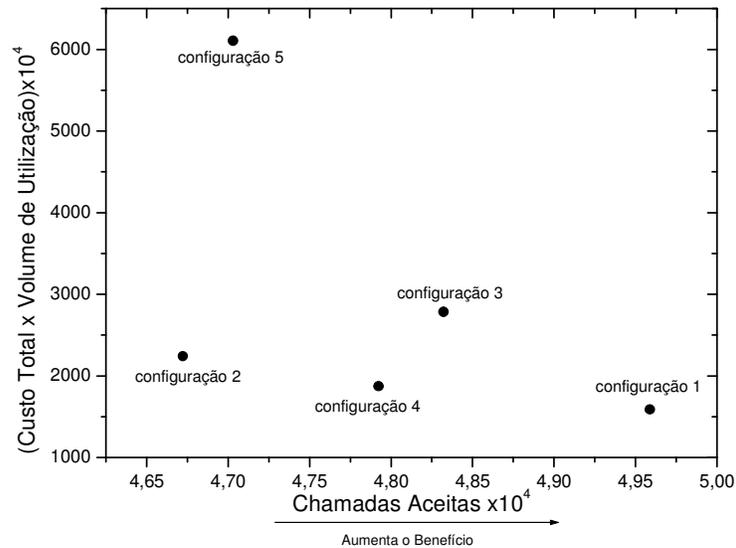


Figura 7.3: Correlação do custo e do benefício das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de uma camada.

Tabela 7.4: Hierarquização das configurações do custo e benefício.

Configurações	Variação do Benefício (Chamadas Aceitas)	Variação do Custo Total x Volume de Utilização
Configuração 2	Pior Benefício	Terceiro Menor Custo
Configuração 5	Quarto Melhor Benefício	Maior Custo
Configuração 4	Terceiro Melhor Benefício	Segundo Menor Custo
Configuração 3	Segundo Melhor Benefício	Quarto Menor Custo
Configuração 1	Melhor Benefício	Menor Custo

A Tabela 7.5 e a Figura 7.4 ilustram o resultado do cálculo da relação custo-benefício dada por (3.1) para as 5 configurações simuladas, para uma carga de 100 erlangs.

Tabela 7.5: Custo-Benefício dos nós MG-OXCs de uma camada.

Arquitetura dos Nós	Custo-Benefício dos Nós
1	320,53
2	479,78
3	576,40
4	391,06
5	1298,88

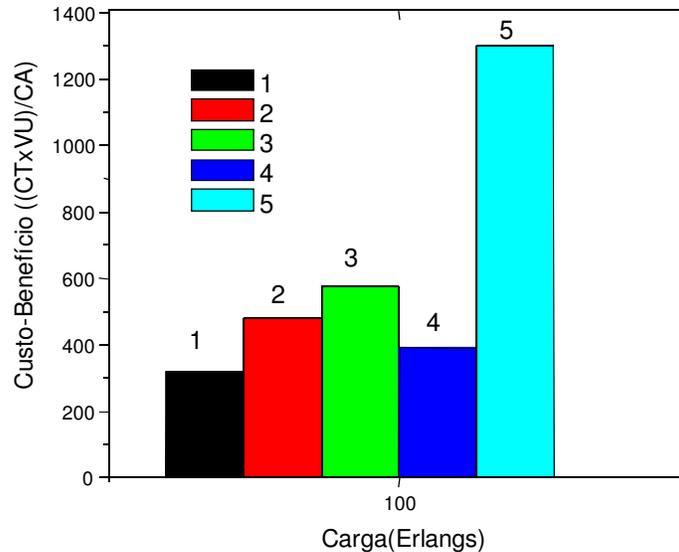


Figura 7.4: Relações custo-benefício das configurações simuladas.

A configuração 5 tem a pior relação custo-benefício, pois não possui wavebands em nenhum de seus nós e o segundo pior desempenho em termos de probabilidade de bloqueio devido aos recursos disponíveis. Assim, a rede que operar utilizando a configuração 5 irá utilizar o número máximo de portas dos nós, pois possui apenas nós OXC.

A configuração 2 apresenta uma relação custo-benefício intermediária, embora apresente a maior probabilidade de bloqueio, não sendo adequada para redes que exigem baixos bloqueios. Essa configuração dispõe de uma rede heterogênea na qual serão usados nós OXC e MG-OXC, sendo que os nós OXC possuem apenas o recurso de agregação de tráfego, enquanto os nós MG-OXC estão restritos às conexões do tipo waveband apenas entre eles.

A configuração 1 apresenta a menor probabilidade de bloqueio e uma baixa relação custo-benefício, viabilizando a implementação dessa configuração sem custo alto. Portanto, a configuração 1 seria ideal em redes que necessitam de alto desempenho em termos de probabilidade de bloqueio. Essa configuração mostrou comportamento destacado em relação às demais, tanto em termos de probabilidade de bloqueio quanto em relação custo-benefício. Ela agrega troca de λ colocados estrategicamente em alguns nós com grande intensidade de tráfego e também conta com a função de troca de λ localizados nos nós MG-OXC.

O custo-benefício da configuração 4 é intermediário entre as configurações 1 e 2, pois possui nós com portas waveband e não possui a função de troca de λ , mas utiliza

um grande número de portas OXC e pode ser aplicado em redes que não podem dispor de grandes receitas para a sua implementação, embora a sua probabilidade de bloqueio não se destaque em relação às configurações 2, 3 e 5. A configuração 3 possui o segundo maior valor de custo-benefício, pois faz uso de um número elevado de portas devido à presença de nós do tipo OXC e de nós do tipo WC-OXC e, assim, possui recurso da agregação de tráfego e, portanto, realizam conversão OEO.

Portanto, para as cinco configurações simuladas na topologia da rede NSFNet verificou-se que o destaque em desempenho e em custo-benefício foi a configuração 1, na qual a combinação das técnicas de comutação waveband em portas totalmente ópticas e comutação e troca de λ em portas com conversão OEO são benéficas se corretamente dimensionadas para funcionar em conjunto. A escolha da quantidade e em quais nós serão inseridos a técnica waveband assim como a dos nós que serão responsáveis por executar a troca de λ influenciam no desempenho e na relação custo-benefício da rede.

As Figuras 7.5, 7.6 e 7.7 mostram as probabilidades de bloqueio das classes de serviços para as configurações 1 e 2 operando sob cargas de 60, 100 e 140 erlangs.

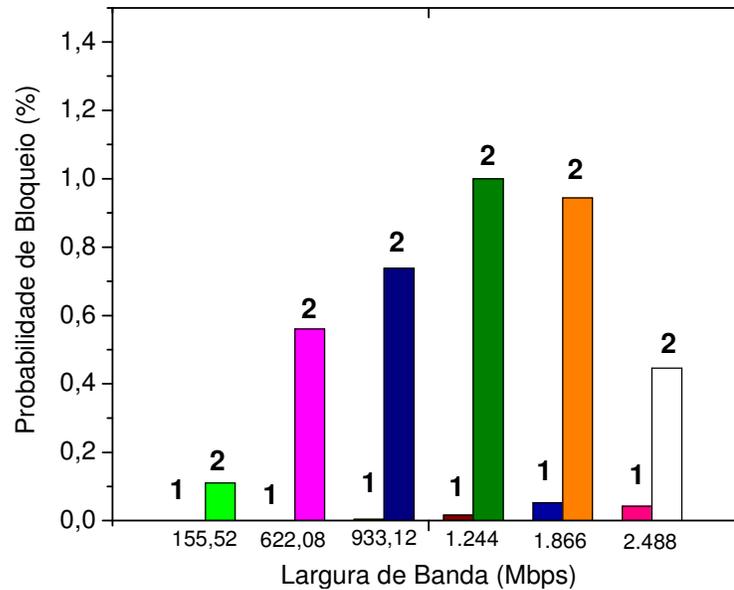


Figura 7.5: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.

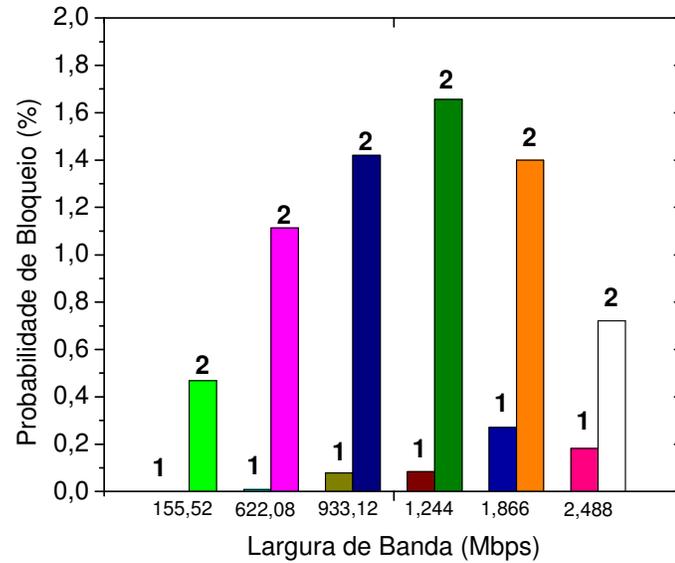


Figura 7.6: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.

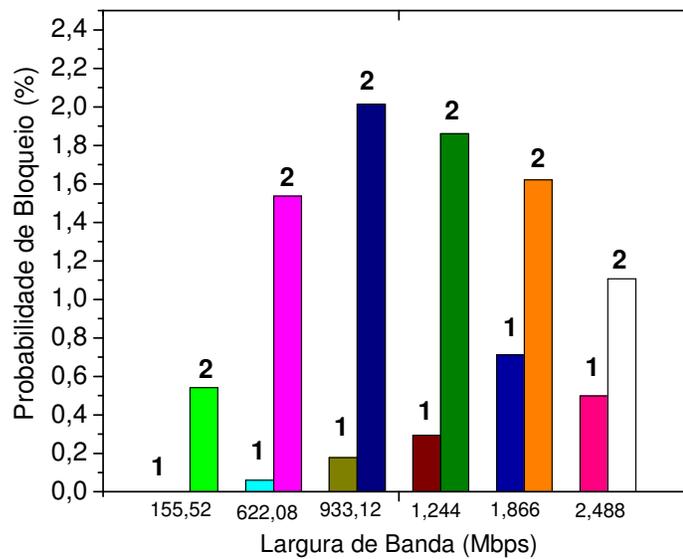


Figura 7.7: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 140 erlangs.

Para todas as cargas a configuração 1 mostra um desempenho bem superior ao da configuração 2, porque a configuração 1 possui recurso de troca em λ s isolados nos nós 4, 11 e 12, enquanto que a configuração 2 possui recurso waveband. As solicitações classe 1 são as que apresentam menor probabilidade de bloqueio, 0,1%, 0,5% e 0,55% para a configuração 2 e 0% para a configuração 1. A probabilidade de ocorrência é alta, mas a banda disponível no waveband e nos λ s pode acomodá-las em grande número. Em 2,5 Gbps podem ser alocadas 16 solicitações classe 1 e 4 solicitações classe 2 nos λ s

e nos wavebands. Com 4 λ s de 2.5 Gbps agrupados podem ser alocadas 64 solicitações classe 1 e 16 solicitações classe 2. No término da conexão, o λ ou o waveband que transporta o tráfego para o nó destino tem a quantidade de banda que transportava liberada e essa banda pode ser reutilizada para transportar tráfego para outro nó. Além disso, o algoritmo first-fit atua alocando o máximo possível de conexões na banda de cada λ antes de selecionar outro.

Depois de atendidas as solicitações de classes mais baixas, as bandas disponíveis passam a ser disputadas pelas classes intermediárias 3, 4 e 5, cujas bandas podem ser compartilhadas com as ocupadas por classes baixas, completando a banda do λ ou do waveband. À medida que a banda solicitada aumenta, a probabilidade de bloqueio aumenta porque as bandas dos λ s ou dos wavebands utilizados vão sendo esgotadas.

O λ que atenderá uma solicitação classe 6 não pode atender nenhuma das classes 1, 2, 3, 4 e 5, porque a banda equivalente superará a banda disponível. Na classe 6, que ocupa 2,5 Gbps, a probabilidade de bloqueio diminui. Os λ s selecionados estão com a capacidade de banda ocupada por classes baixas e intermediárias e os λ s ainda não selecionados dispõem de banda quase intacta, podendo atender a solicitação de classe mais alta. A ocorrência de uma solicitação classe 6 será atendida pela banda total de um λ , tornando-o indisponível para atender qualquer outra solicitação. A classe 6 não disputa banda com outras classes, motivo pela qual a probabilidade de bloqueio é baixa.

Por outro lado, a probabilidade de bloqueio das classes 2, 3, 4 e 5 são maiores do que a de uma classe 6. Por exemplo, a solicitação de classe 5 disputa banda com outras classes e sua probabilidade de bloqueio é maior que a da classe 6. Portanto, à medida que a classe diminui a partir da 6, a classe considerada passa a disputar banda com outras classes e com classes mais baixas e a probabilidade de bloqueio aumenta. Na situação mais crítica, para as cargas consideradas, as probabilidades de bloqueio chegam a 1%, 1,7% e 2,1% na configuração 2 e 0,05%, 0,7% e 0,25% na configuração 1.

No caso do waveband são criados circuitos específicos de 4 λ s de 2,5 Gbps. Esses circuitos podem acomodar um tráfego de até 10 Gbps de banda alocando até 64 solicitações classe 1 e até 16 solicitações classe 2. Para classes de serviço 3, 4, 5, 6 o circuito waveband é também capaz de agrupar várias conexões que ficam restritas aos circuitos.

Assim, o comportamento das classes de serviço é característico das configurações que compõem a rede no momento da simulação, sendo que o pior

desempenho da configuração 2 reflete o conjunto de restrições que são impostas aos nós MG-OXC de uma camada, que não podem realizar conexões entre λ -wb, wb- λ e λ -wb- λ .

7.1.2-Análise do Custo e Probabilidade de Bloqueio dos Nós com Troca de Comprimento de Onda e nós MG-OXC de Três Camadas

A análise do desempenho da rede e da relação custo-benefício será feita utilizando o MG-OXC de três camadas no qual pode haver conexões do tipo wb- λ , λ -wb e λ -wb- λ . As configurações simuladas são as mesmas cinco apresentadas no item 7.1.1 e as probabilidades de bloqueio são mostradas na Figura 7.8. A principal diferença é em relação às configurações 2 e 4 que apresentaram melhor desempenho em relação às configurações 5 e 3, respectivamente. A configuração 1 permaneceu com o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio.

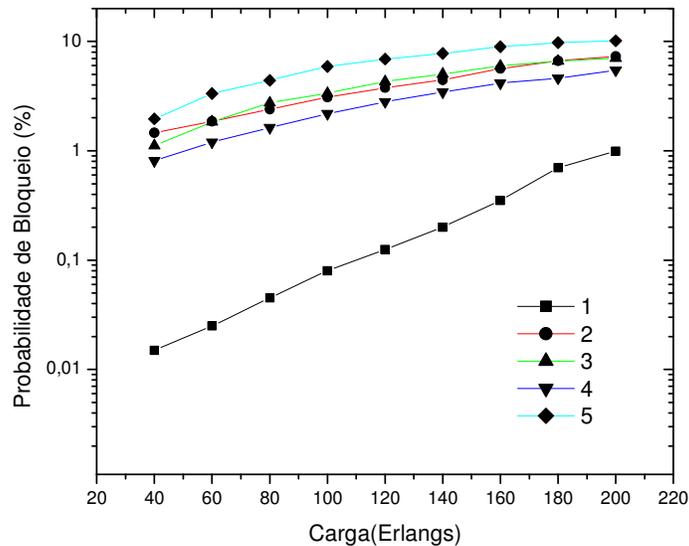


Figura 7.8: Probabilidades de bloqueio das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de três camadas.

Essa melhora do desempenho deve-se à característica de alocação de banda dos nós que possuem capacidade de alocar banda tanto em wavebands como em λ s ao longo dos enlaces. A Figura 7.9 (a-b) ilustra um exemplo de uma conexão entre três nós (A, B e C). Na Figura 7.9 (a) eles formam uma conexão λ - λ na qual o λ_1 é utilizado no enlace A-B para alocar conexão de 155 Mbps e o λ_1 possui 200 Mbps de banda livre podendo alocar a conexão. No enlace B-C a capacidade do λ_1 não é suficiente para alocar a conexão de 155 Mbps, portanto essa conexão será bloqueada.

Para o tipo de conexão que ocorre na Figura 7.9 (b), o gerenciamento de conexão é diferente porque essa conexão é do tipo λ -wb. Inicialmente, no enlace A-B, o λ_1 possui banda suficiente para alocar conexão de 155 Mbps e, ao verificar a disponibilidade de banda do enlace B-C, verifica-se que o waveband wb_1 possui capacidade de alocar essa conexão devido à sua característica de agregar vários λ s e, assim, possui banda suficiente. Essa característica do gerenciamento de conexões é vantajosa nesse tipo de conexão, pois se houvesse a restrição de conexões aos tipos wb-wb ou λ - λ , a conexão de 155 Mbps teria sido bloqueada por ausência de banda, conforme mostra a Figura 7.9 (a). Assim, justifica-se o melhor desempenho das configurações 2 e 4 com nós MG-OXC em relação às configurações 5 e 3 com nós OXC.

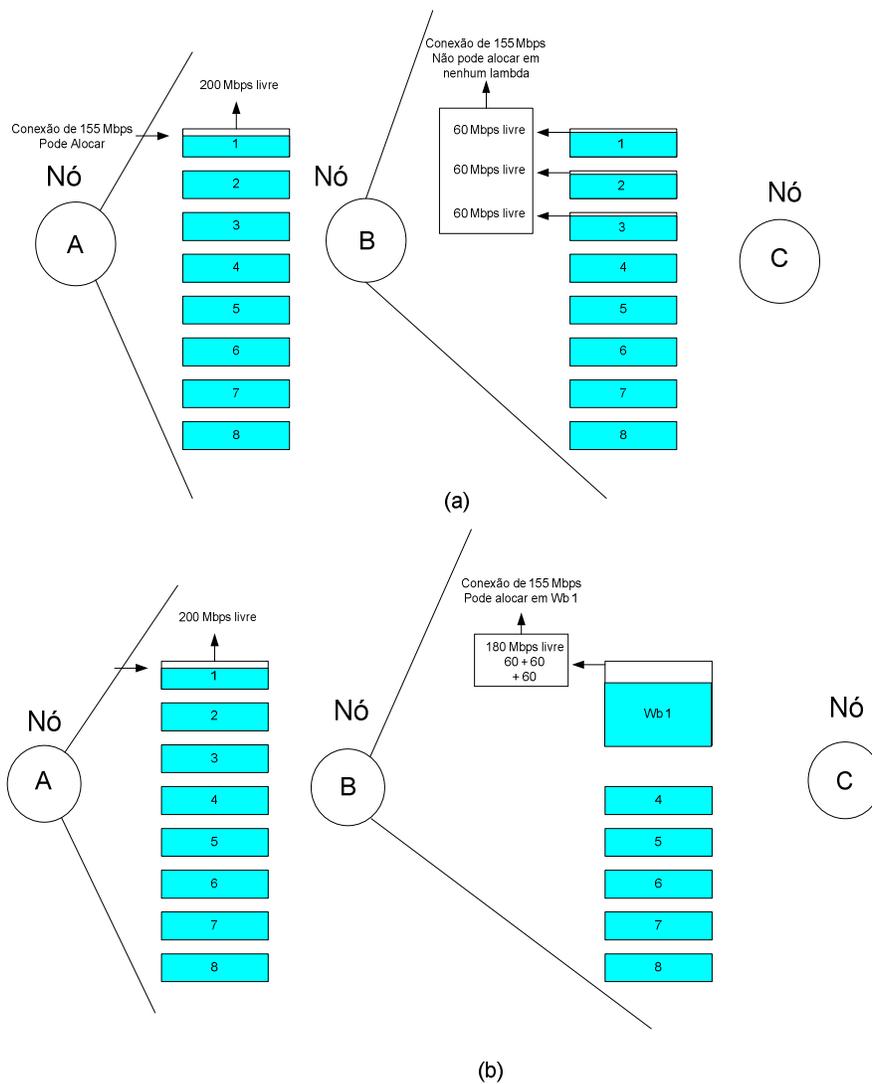


Figura 7.9: (a) Alocação de conexão entre λ - λ (b) Alocação de conexão entre λ -wb.

A tabela 7.6 ilustra o volume de utilização das portas wb , λ e λ com troca de λ para uma carga de 100 erlangs. Uma vez relaxada a restrição da presença de conexões do tipo $wb-wb$ e $\lambda-\lambda$, o volume de utilização das portas wb aumenta significativamente, impactando de forma positiva a probabilidade de bloqueio e também a relação custo-benefício, embora se contabilize os custos das conversões OEO e da agregação de λ s em wavebands e a desagregação de wavebands em λ s.

Tabela 7.6: Volume de utilização das portas dos nós simulados.

Arquitetura dos Nós	Utilização de portas com waveband (%)	Utilização de portas OXC sem troca de λ s (%)	Utilização de portas com troca de λ s (%)	Utilização da Comutação entre waveband e λ s (%)	Utilização da Comutação entre λ s e waveband (%)
1	40,17	23,21	36,62	16,48	16,55
2	41,407	58,59	Não se aplica	23,17	21,80
3	Não se aplica	23,818	76,181	Não se aplica	Não se aplica
4	40,105	39,59	20,302	21,3	23,67
5	Não se aplica	100	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica

O gráfico da Figura 7.10 ilustra a correlação do custo total da configuração com as chamadas aceitas pela rede para uma carga de 100 erlangs. A Tabela 7.7 mostra a hierarquização das configurações evoluindo desde a com maior benefício e menor custo até as com pior benefício e maior custo para que possa ser calculada a relação custo-benefício por meio de (3.2).

O valor do coeficiente de correlação de obtido foi $r = -0,836$, indicando um alto grau de correlação negativa entre as variáveis, ou seja, valores altos de custo estão em correspondência com valores baixos de benefício, mostrando um forte relacionamento entre as variáveis para essas configurações.

Esse novo gráfico de correlação do custo benefício para o MG-OXC de três camadas mostra algumas diferenças para o gráfico do MG-OXC de uma camada. A configuração 1 continua com o melhor benefício, mas possui agora o segundo melhor custo. A configuração 2 deixa de ser a de pior benefício e passa ao quarto melhor benefício, enquanto que a configuração 3 perde a posição de segundo melhor benefício e passa a ser o terceiro melhor benefício. As configurações 4 e 5 se tornam a de menor e maior custo e segundo melhor e pior benefício, respectivamente.

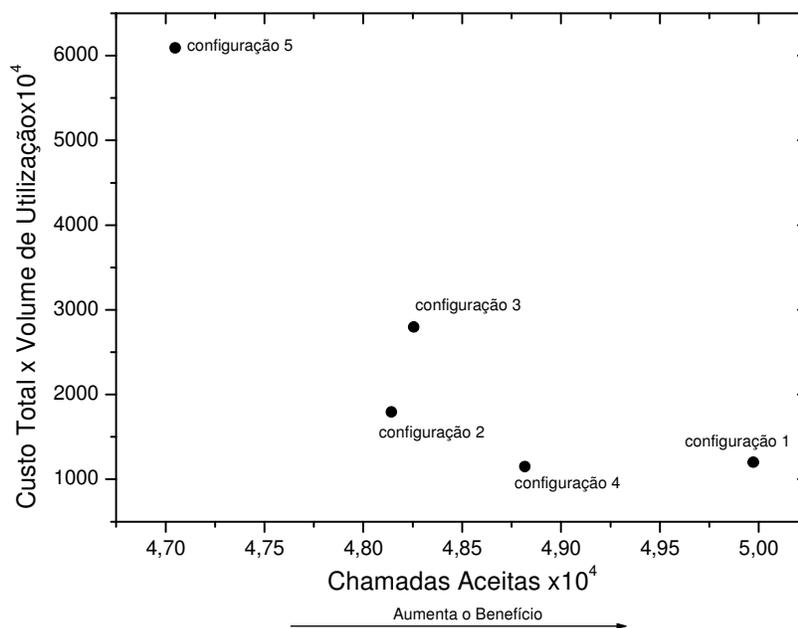


Figura 7.10: Correlação do custo e do benefício das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de três camadas.

Tabela 7.7: Configurações hierarquizadas do custo e benefício.

Configurações	Variação do Benefício (Chamadas Aceitas)	Variação do Custo Total x Volume de Utilização
Configuração 5	Pior Benefício	Maior Custo
Configuração 2	Quarto Melhor Benefício	Terceiro Menor Custo
Configuração 3	Terceiro Melhor Benefício	Quarto Menor Custo
Configuração 4	Segundo Melhor Benefício	Menor Custo
Configuração 1	Melhor Benefício	Segundo Menor Custo

A Tabela 7.8 e a Figura 7.11 mostram a relação custo-benefício para uma carga de 100 erlangs calculada por (3.2).

Tabela 7.8: Custo-Benefício dos nós MG-OCXs de três camadas.

Arquitetura dos Nós	Custo-Benefício dos Nós
1	405,77
2	410,32
3	579,63
4	302,40
5	1298,88

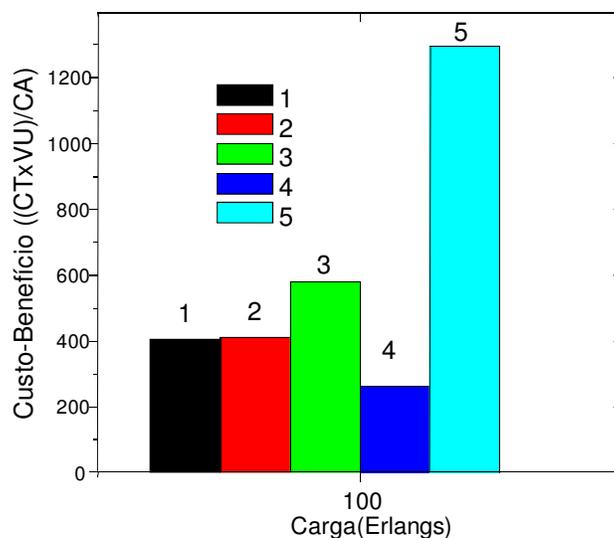


Figura 7.11: Relação custo-benefício para as configurações simuladas em um nó MG-OXC de três camadas.

Devido às características do gerenciamento de conexões, permitindo que as conexões ocorram entre as portas wb e λ , o número de portas wb utilizadas na rede aumentou significativamente, mas o custo associado à comutação entre $wb-\lambda$ e $\lambda-wb$ teve que ser computado. Assim, o custo da configuração 1 aumentou, pois o número de chamadas aceitas devido à adoção da nova configuração de nós foi de apenas 373, não sendo suficiente para diluir o custo das novas operações que os nós MG-OXC de três camadas realizam. A configuração 4 atingiu o menor custo e teve sua probabilidade de bloqueio melhorada devido às novas alternativas de realizar conexões. A quantidade de chamadas aceitas na configuração 4 devido à adoção do MG-OXC de três camadas foi de 987, diluindo assim o custo da realização das operações do MG-OXC de três camadas.

As configurações 3 e 2 mantiveram seus custos intermediários, sendo a configuração 2 a melhor opção em termos de probabilidade de bloqueio com uma relação custo-benefício não muito elevada. O número de chamadas adicionais aceitas para a configuração 2 com adoção dos MG-OXCs de três camadas foi 1731, diluindo de forma expressiva os custos adicionais das novas operações dos nós MG-OXCs. Devido à presença de apenas nós tipo OXC, a configuração 5 continuou apresentando a pior relação custo-benefício e passou a apresentar também a pior probabilidade de bloqueio.

Assim, verificou-se que, com o incremento de conexões do tipo $wb-\lambda$, $\lambda-wb$ e $\lambda-wb-\lambda$, o desempenho das configurações que utilizam os nós MG-OXC aumenta, assim

como o número de portas wavebands utilizadas na rede também aumenta, proporcionando uma melhora na relação custo-benefício devido ao maior número de portas waveband utilizadas.

As Figuras 7.12, 7.13 e 7.14 mostram as probabilidades de bloqueio das classes de serviços para as configurações 1 e 2 operando sob cargas de 60, 100 e 140 erlangs.

O comportamento das configurações 1 e 2 são semelhantes ao comportamento mostrado nas Figuras 7.5, 7.6 e 7.7, com a diferença de que a configuração 2 apresenta uma probabilidade de bloqueio menor devido aos recursos que dispõem e ao novo gerenciamento de conexões. O bloqueio ocorre apenas em valores de banda maiores devido à impossibilidade dessas bandas de, em uma determinada conexão, compartilharem um λ com as outras bandas disponíveis.

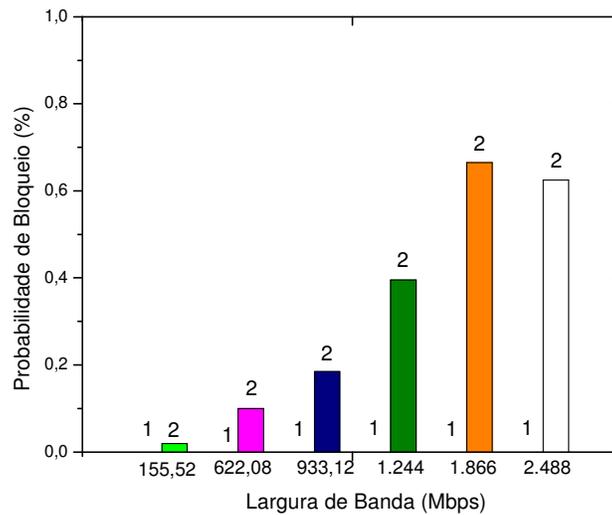


Figura 7.12: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.

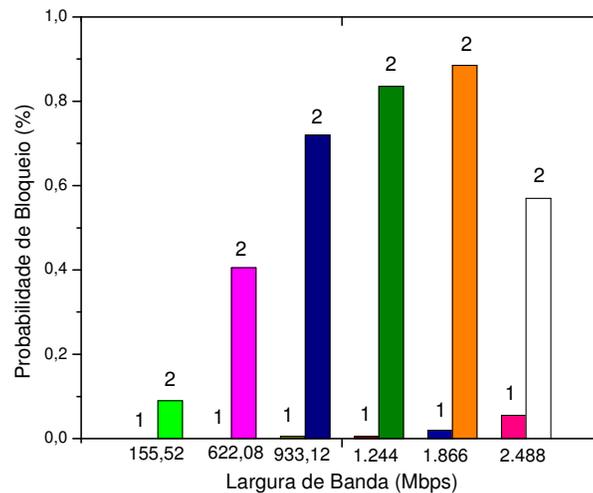


Figura 7.13: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.

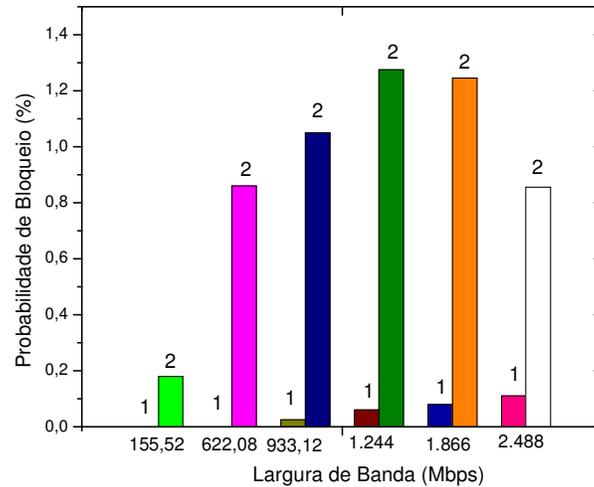


Figura 7.14: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 140 erlangs.

7.1.3-Comparação entre o Desempenho e Custo das Configurações de MG-OXC de Uma Camada e de Três Camadas

Nesse item será feita uma comparação entre o desempenho das configurações 2, 3 e 4 utilizando nós MG-OXC, mas com diferentes gerenciamentos de conexão. A Figura 7.15 (a, b e c) ilustra os gráficos com as comparações entre os tipos de nós. Como os nós MG-OXCs de três camadas possuem capacidade de gerenciar conexões entre λ e wb , o seu desempenho em termos de probabilidade de bloqueio supera a dos MG-OXCs de uma camada no qual o gerenciamento de conexões só permite que ocorram conexões $wb-wb$ e $\lambda-\lambda$. A Figura 7.15 (a) mostra que, com MG-OXC de uma camada, a configuração 2 já possui um bom desempenho em termos de probabilidade de bloqueio, mas esse desempenho é superado com a adoção do MG-OXC de três camadas, que gerencia a banda alocada pelas conexões de forma mais eficiente, como ilustra a Figura 7.9. As configurações 3 e 4 seguem a mesma tendência, com o seu desempenho aumentando à medida que se faz mais uso de portas com capacidade de realizar agregação waveband.

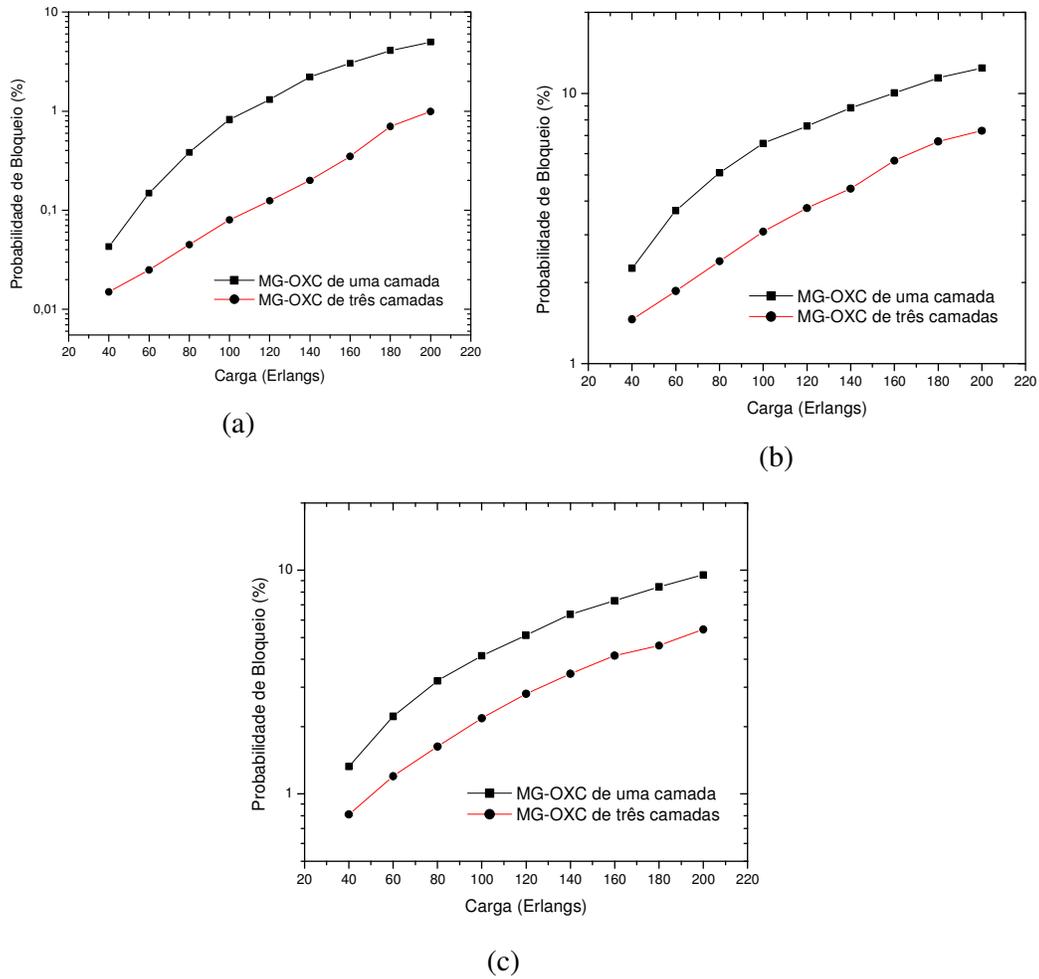


Figura 7.15: Comparação do desempenho do MG-OXC de uma camada e de três camadas para as configurações (a) 1; (b) 2 e (c) 4.

A Figura 7.16 mostra a comparação da relação custo-benefício entre as configurações 1, 2 e 4. O MG-OXC de três camadas provocou um pior desempenho na relação custo-benefício para a configuração 1, pois o número de chamadas aceitas adotando a nova configuração de nó não foi muito expressivo, sem obter a diluição de custos das novas operações realizadas pelos nós MG-OXCs. As configurações 2 e 4 conseguiram uma relação custo benefício melhor para o MG-OXC de três camadas devido ao expressivo aumento das chamadas aceitas em função da adoção das conexões do tipo λ -wb, wb- λ e λ -wb- λ .

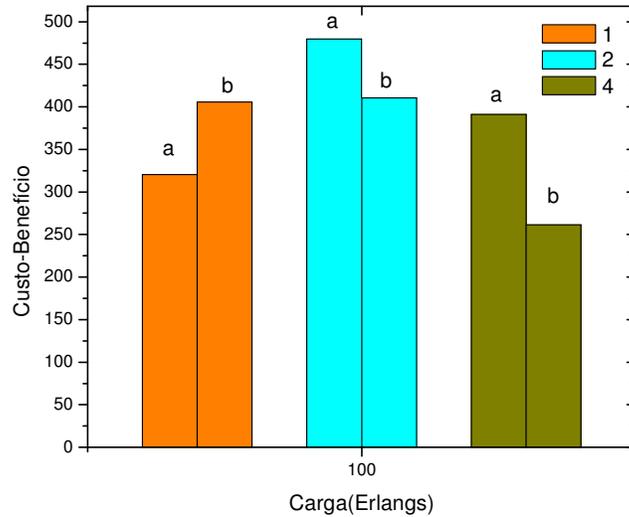


Figura 7.16: Comparação da relação do MG-OXC de uma camada e de três camadas para as configurações (a) MG-OXC de uma camada; (b) MG-OXC de três camadas.

7.2-Análise do Custo e Probabilidade de Bloqueio dos Nós com Wavebands de “Granularidades” Diferentes

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a simulação do sistema de agregação waveband com “granularidades” diferentes nos nós. Na Seção 7.2.1, o gerenciamento de conexões realiza apenas as conexões do tipo wb-wb e λ - λ , simulando um nó MG-OXC de uma camada. Na Seção 7.2.2, o gerenciamento de conexões permitirá conexões do tipo wb- λ , λ -wb e λ -wb- λ simulando um MG-OXC de três camadas.

7.2.1-Análise dos Custos e Probabilidade de Bloqueio em Nós MG-OXC de Uma Camada com Diferentes Comprimentos de Onda Agregados ao Waveband.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio de simulações, sem considerar nós com troca de λ , com diferentes λ s agregados aos wavebands e considerando a agregação de tráfego nos nós OXCs e a agregação de tráfego nos λ s isolados ao waveband quando o nó for MG-OXC. O fator de agregação de tráfego é 16 e o método de escolha de λ utilizado é o first-fit.

Quatro configurações com 2 wavebands foram simuladas:

1. Nós que possuem o recurso de agregação waveband são 6, 7, 8, 9, 10 e 13. Esses nós possuem capacidade de agregação em todos os nós (configuração uniforme), ou seja, MG-OXC4 e com capacidade de agregação de tráfego nos λ s isolados. O restante dos nós não possui agregação waveband sendo nós OXCs com capacidade de agregação de tráfego;
2. Nós OXCs com capacidade de agregação de tráfego;
3. Nós que possuem o recurso de agregação waveband são 6, 7, 8, 9, 10 e 13. Esses nós possuem as seguintes capacidades de agregação: MG-OXC4 nos nós 6, 7, 9 e 13, MG-OXC5 no nó 8, MG-OXC3 no nó 10 e agregação de tráfego nos λ s isolados. O restante dos nós não possui agregação waveband sendo nós OXCs com capacidade de agregação de tráfego;
4. Nós que possuem o recurso de agregação waveband são 6, 7, 8, 9, 10 e 13. Esses nós possuem as seguintes capacidades de agregação: MG-OXC4 nos nós 6, 7, 9 e 13, MG-OXC6 no nó 8 e MG-OXC2 no nó 10 e agregação de tráfego nos λ s isolados. O restante dos nós não possui agregação waveband, sendo nós OXCs com capacidade de agregação de tráfego;

A Tabela 7.9 mostra as configurações simuladas.

Tabela 7.9: Configurações da rede simulada.

Arquitetura de Rede	Nós da Rede	Recurso do nó
1	6, 7, 8, 9, 10 e 13	MG-OXC4
	1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 e 14	OXC
2	Todos	OXC
3	6, 7, 9 e 13	MG-OXC4
	8	MG-OXC5
	10	MG-OXC3
	1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 e 14	OXC
4	6, 7, 9, e 13	MG-OXC4
	8	MG-OXC6
	10	MG-OXC2
	1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 e 14	OXC

A relação custo-benefício é calculada por (3.1) e a Figura 7.17 mostra as probabilidades de bloqueio das diferentes configurações.

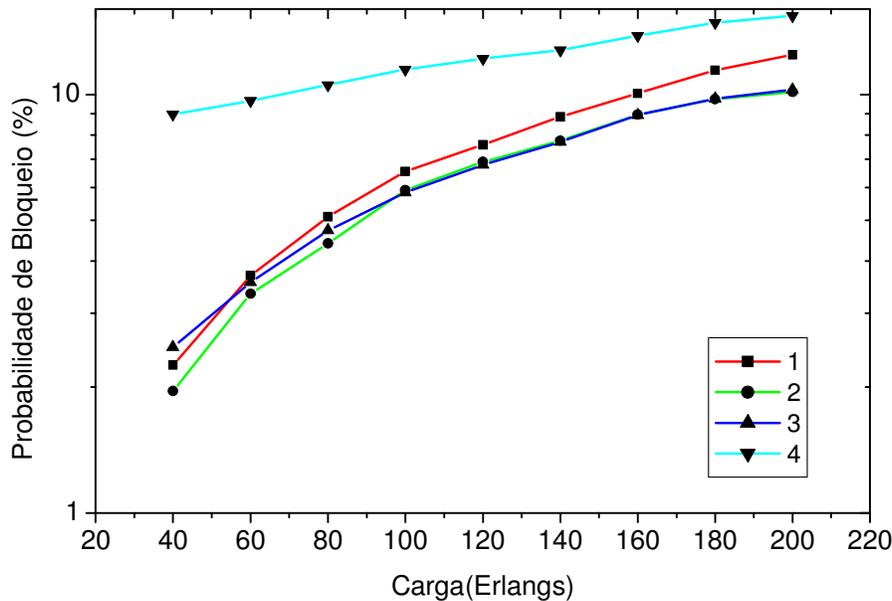


Figura 7.17: Probabilidade de bloqueio das configurações simuladas com MG-OXcs de uma camada. As configurações 1 e 4 estão detalhadas na Tabela 7.9.

A configuração 4 apresenta a maior probabilidade de bloqueio, pois além de 4 λ s agregados ao waveband nos nós 6, 7, 9 e 13 e 2 λ s agregados ao waveband no nó 10, ela reúne no nó 8 todos os λ s agregados ao waveband, ou seja, não há λ disponível para realizar outro tipo de conexão a não ser waveband, o que limita sua capacidade de conexão com outros nós que disponham de λ s isolados. Portanto, uma conexão que passe pelo nó 8 só poderá ser alocada se estiver em um λ agrupado ao waveband, ou seja, esse nó só suporta conexões do tipo wb-wb.

No outro extremo, a arquitetura 2 apresenta a menor probabilidade de bloqueio. Esse comportamento ocorre porque a arquitetura 2 não possui nenhum λ agregado ao waveband e, portanto, nenhum nó possui a restrição de conexão apenas entre wavebands sendo possível nessa arquitetura apenas conexões λ - λ .

A configuração 3 possui 4 λ s agregados ao waveband nos nós 6, 7, 9 e 13, 3 λ s agregados ao waveband no nó 10 e 5 λ s agregados ao waveband no nó 8 e sua probabilidade de bloqueio tem valor um pouco mais alto que as arquiteturas 1 e 2 para a carga de 40 erlangs e valor semelhante à arquitetura 2 para cargas mais altas. Comparando a configuração 3 com a 1, observa-se que a diminuição do número de λ s agregados ao waveband no nó 10 foi benéfica para a configuração, pois quando a carga

da rede aumentou essa configuração foi superior a 1 e alcançou a 2 em desempenho. Assim, conclui-se que a configuração 3 possui uma distribuição de λ s reunidos ao waveband que a habilita a competir com a configuração 2 em termos de probabilidade de bloqueio, mesmo tendo restrição de conexões wb-wb em alguns nós.

A arquitetura 1 mostrou-se pior que as 2 e 3 com relação aos valores das probabilidades de bloqueio porque no nó 10 existem mais λ s agregados ao waveband do que na configuração 3. Assim, o nó 10 se mostra mais sensível do que os outros à diminuição do número de λ s que estão disponíveis para conexões não waveband. É porque há maior número de enlaces no nó 10 em relação aos outros nós waveband.

Portanto, a configuração 1 e 3 são as que mais se aproximam da configuração 2 em termos de desempenho. Assim, a adoção de diferentes λ s agregados aos wavebands em diferentes nós se mostra viável para tornar o desempenho da rede semelhante àquela que não usa wavebands, configuração 2, e não possui restrições quanto aos nós que podem alocar uma conexão.

A Tabela 7.10 mostra o volume de utilização das portas wb com diferentes λ s agregados e das portas λ utilizado para o cálculo da relação custo-benefício por (3.1) para uma carga de 100 erlangs. O baixo volume de utilização das portas waveband é devido à restrição de somente poder haver conexões do tipo waveband entre portas wb-wb. Devido ao uso de nós com diferentes graus de agregação waveband, o volume de utilização ficou distribuído entre as portas waveband, sendo a porta com grau de agregação 4 a mais utilizada, já que ocupa o maior número de nós, seguida pela porta com grau de agregação 6, pois agrega todos os λ s nesse nó e a conexão por wavebands torna-se a única alternativa. O restante das portas com grau de agregação 2, 3 e 5 possuem baixo volume de utilização.

A Figura 7.18 mostra o grau de relação entre custo e benefício para carga de 100 erlangs e 50000 chamadas. O coeficiente de correlação de Person para essas variáveis nessas configurações foi positivo, $r = 0,329$, mostrando um baixo grau de correlação linear positivo entre as variáveis, mas indicando que, de forma diferente das configurações anteriores, agora um baixo custo equivale a um baixo benefício e essa relação direta segue até que o maior custo corresponda ao melhor benefício. A Tabela 7.11 mostra a hierarquização das configurações variando da configuração 4 com o pior benefício até a configuração 2, com o melhor benefício.

Tabela 7.10: Volume de utilização das portas dos nós simulados.

Arquitetura dos Nós	Utilização de portas com waveband com 6 λ s agregados (%)	Utilização de portas com waveband com 5 λ s agregados (%)	Utilização de portas com waveband com 4 λ s agregados (%)	Utilização de portas com waveband com 3 λ s agregados (%)	Utilização de portas com waveband com 2 λ s agregados (%)	Utilização de portas com λ s (%)
1	Não se aplica	Não se aplica	15,54	Não se aplica	Não se aplica	84,276
2	Não se aplica	100				
3	Não se aplica	3,98	9,078	3	Não se aplica	83,93
4	6,80	Não se aplica	15,97	Não se aplica	5,27	71,94

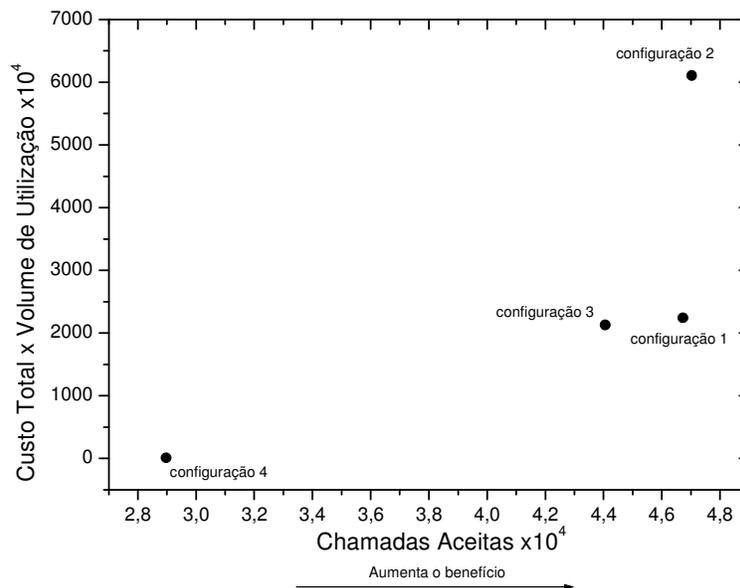


Figura 7.18: Correlação entre custo e benefício das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de uma camada.

Tabela 7.11: Configurações hierarquizadas do custo e benefício.

Configurações	Varição do Benefício (Chamadas Aceitas)	Varição do Custo Total x Volume de Utilização
Configuração 4	Pior Benefício	Menor Custo
Configuração 3	Terceiro Melhor Benefício	Terceiro Menor Custo
Configuração 1	Segundo Melhor Benefício	Segundo Menor Custo
Configuração 2	Melhor Benefício	Maior Custo

A Tabela 7.12 e a Figura 7.19 mostram a relação custo-benefício para uma carga de 100 erlangs calculada por (3.2).

Tabela 7.12: Custo-benefício dos nós MG-OXCs de uma camada.

Arquitetura dos Nós	Custo-Benefício dos Nós
1	479,78
2	1298,88
3	483,45
4	407,85

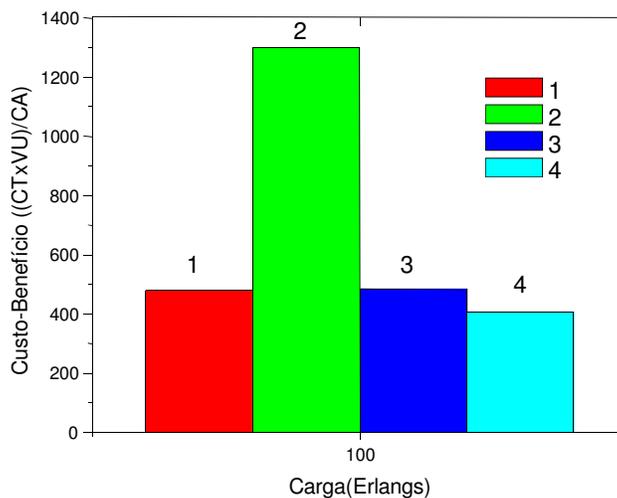


Figura 7.19: Relação custo-benefício das configurações simuladas.

A configuração 2 tem a pior relação custo-benefício, pois não possui wavebands em nenhum de seus nós e o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio devido aos recursos disponíveis. Assim, a rede que operar utilizando a configuração 5 irá utilizar o número máximo de portas dos nós, pois possui apenas nós comutadores OXC.

As configurações 1 e 3 apresentam uma relação custo-benefício intermediária entre as configurações 2 e 4. Essas configurações dispõem de redes heterogêneas nas quais são utilizados nós OXC e MG-OXC, sendo que os nós OXC possuem apenas o recurso de agregação de tráfego, enquanto os nós MG-OXC estão restritos às conexões do tipo waveband apenas entre eles. A configuração 2 possui quatro λ s agregados ao waveband em seus nós MG-OXC, enquanto que a configuração 3 possui nós com 6 e 2 λ s agregados. Essa menor agregação de λ s favoreceu a relação custo-benefício da

configuração 3 devido ao seu melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio.

A configuração 4 apresenta a maior probabilidade de bloqueio e a menor relação custo-benefício. A configuração 4 possui o nó 8 com todos os λ s agregados ao waveband, restringindo assim sua capacidade de conexão com todos os nós e elevando sua probabilidade de bloqueio, mas diminuindo o uso de portas nas conexões que passam pelo nó 8.

Essas conclusões mostram que se pode ter um desempenho semelhante à menor probabilidade de bloqueio, configuração 2, com uma relação custo-benefício semelhante se o número de λ s reunidos para compor o waveband for diferente para cada nó.

As Figuras 7.20, 7.21 e 7.22 ilustram as probabilidades de bloqueio das classes de serviços das arquiteturas 2 e 3 para as cargas de 60, 100 e 140 erlangs, respectivamente.

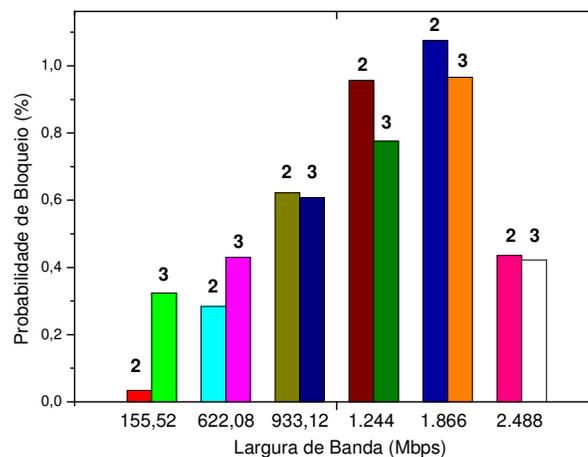


Figura 7.20: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.

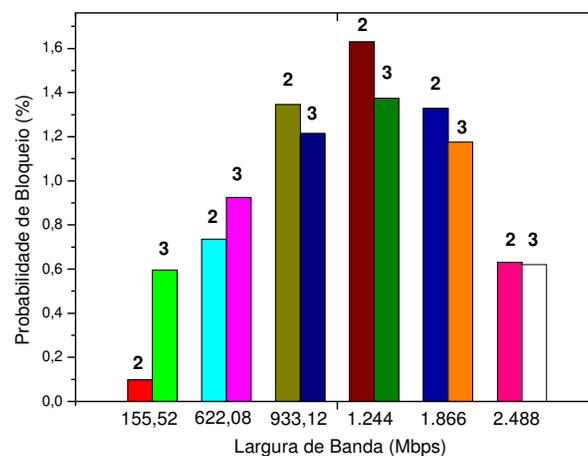


Figura 7.21: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.

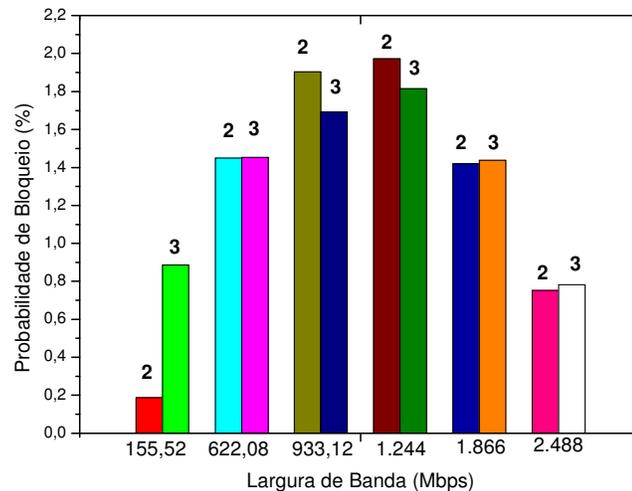


Figura 7.22: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 140 erlangs.

Para todas as cargas analisadas nota-se que a classe de serviço 1 exibe um melhor desempenho para a configuração 2. Essa característica se deve à probabilidade de chegada da classe de serviço 1 ser 59%, ou seja, a probabilidade de ocorrer chamadas entre os nós com essa classe é maior. Assim, o impacto que a técnica waveband exerce sobre este tipo de classe de serviço é maior, pois há um número elevado de conexões em que nós fim a fim são do tipo OXC e, portanto, a técnica waveband limita os λ s que podem ser utilizados entre nós MG-OXC, no momento da computação do caminho.

Ao mesmo tempo, para as classes de serviço com menores probabilidades de chegada e com larguras de banda maiores, a configuração 3 apresenta os melhores resultados. A agregação de λ s em wavebands cria canais únicos com larguras de faixa de até 10 Gbps (no caso de granularidade 4 e 2,5 Gbps de largura de banda por λ). Desta maneira, há um menor número de conexões com larguras de faixa maiores e, portanto, há equivalência entre número de conexões em que nós fim a fim são OXCs e conexões em que todos os nós do caminho óptico são MG-OXCs e que podem utilizar os canais waveband para a alocação. Com a utilização de canais waveband para essas classes de serviço, há um melhor aproveitamento de banda entre nós MG-OXC, já que muitas conexões com grandes larguras de faixa podem usufruir de um único canal de 10 Gbps e serem alocadas. Exemplificando, no caso de 4 λ s de 2,5 Gbps que estão utilizando 1,6 Gbps cada, há uma largura de banda disponível de 900 Mbps em cada λ , totalizando 3,6 Gbps nos 4 λ s. Assim uma conexão de 2,5 Gbps não pode ser alocada em nenhum λ . Quando os 4 λ s são agrupados em um waveband, a largura de banda disponível de 3,6

Gbps poderá ser utilizada e, desta maneira, uma conexão de 2,5 Gbps pode ser alocada no waveband.

Na situação mais crítica para as cargas consideradas, as probabilidades de bloqueio alcançam a 1,1%, 1,65% e 2,0% na configuração 2 e 0,95%, 1,4% e 1,8% na configuração 3.

7.2.2- Análise dos Custos e Probabilidade de Bloqueio em Nós MG-OXC de Três Camadas com Diferentes Comprimentos de Onda Agregados ao Waveband

Nessa sessão serão mostrados os resultados das simulações utilizando os nós MG-OXCs de três camadas. As configurações simuladas são as mesmas da seção 7.2.1 e suas probabilidades de bloqueio são mostradas na Figura 7.23. As configurações 1 e 3 sofreram a maior diferença em relação às simulações com MG-OXC de uma camada.

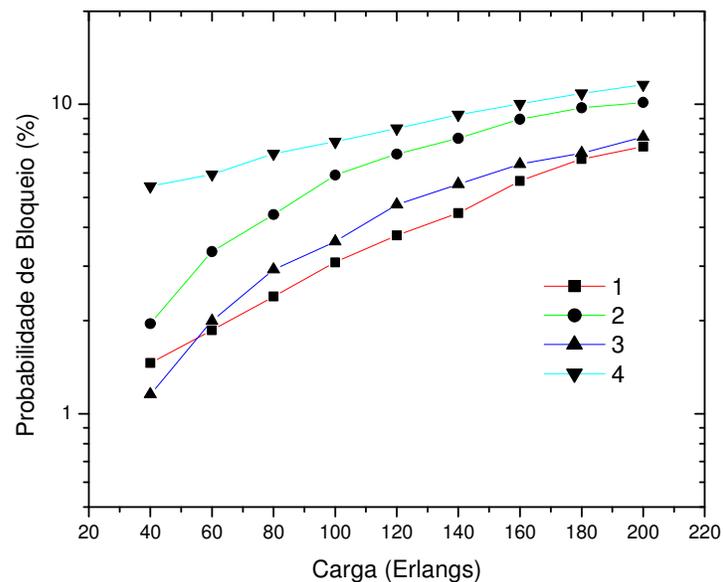


Figura 7.23: Probabilidade de bloqueio das configurações simuladas com MG-OXCs de três camadas.

A melhora de desempenho das configurações 1 e 3 em relação à configuração 2 ocorreu porque o gerenciamento de conexões permite conexões $wb-\lambda$, $\lambda-wb$ e $\lambda-wb-\lambda$. Essas conexões extras do MG-OXC de três camadas permitem o melhor aproveitamento das bandas dos λ s que estão reunidos para formar o waveband. A Figura 7.24 mostra como é feito o aproveitamento da banda nos novos tipos de conexão.

Embora tenha sofrido uma melhora no desempenho, a configuração 4 continua com o pior desempenho de probabilidade de bloqueio. O maior número de λ s reunidos ao waveband no nó 8 da configuração 4 deixa os enlaces que ligam esse nó ao restante da rede com grande capacidade de alocação de banda. Essa grande capacidade de alocação de banda não é correspondida pelo restante dos enlaces que não conseguem alocar o grande volume de banda do tráfego que vem do nó 8, bloqueando a conexão. Essa indisponibilidade de banda em sua vizinhança causa uma deterioração da rede em termos de probabilidade de bloqueio.

Os nós que possuem em seus enlaces menor número de λ s reunidos ao waveband conseguem corresponder ao volume de banda do tráfego que chega de seus vizinhos e, assim, permitir a conexão siga até o seu destino final.

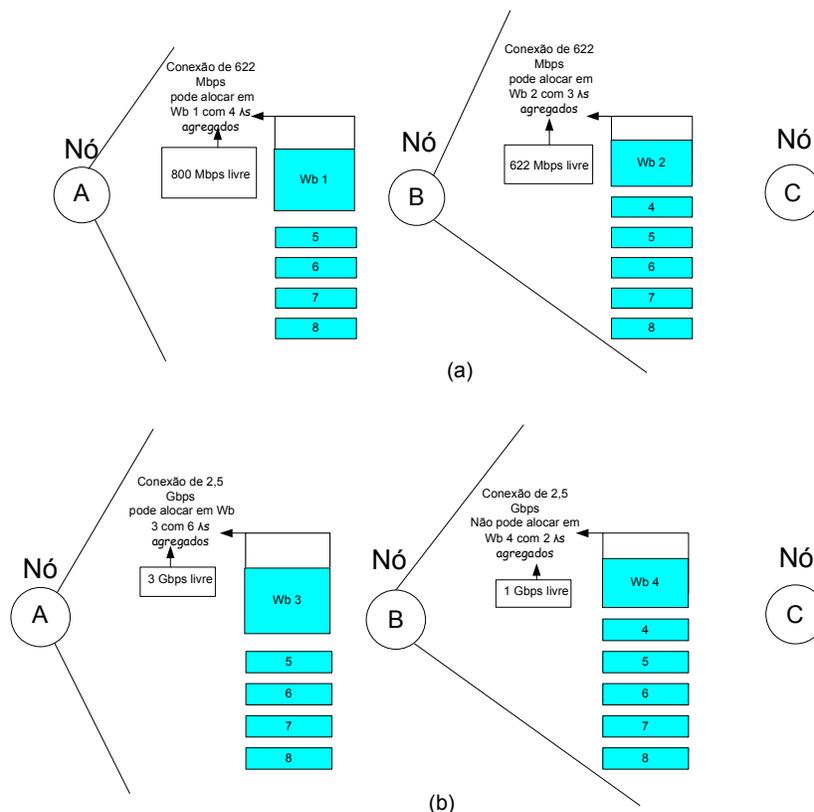


Figura 7.24: (a) Alocação de conexão entre nós MG-OXC4 e MG-OXC3 (b) Alocação de conexão entre MG-OXC6 e MG-OXC2.

A Tabela 7.13 ilustra o volume de utilização das portas wb , λ e λ com troca de λ para uma carga de 100 erlangs. O volume de utilização das portas waveband aumenta

devido às características de conexão do MG-OXC de três camadas.

A Figura 7.25 mostra o grau de relação entre as variáveis custo e benefício para uma carga de 100 erlangs e 50000 chamadas. O coeficiente de correlação de Person para essas variáveis nessas configurações foi novamente negativo, $r = -0,2132$, mostrando baixo grau de correlação linear entre as variáveis e indicando que maiores custos não necessariamente equivalem a melhores benefícios.

Tabela 7.13: Volume de utilização das portas dos nós simulados.

Arquitetura dos Nós	Utilização de portas com waveband com 6 λ s agregados (%)	Utilização de portas com waveband com 5 λ s agregados (%)	Utilização de portas com waveband com 4 λ s agregados (%)	Utilização de portas com waveband com 3 λ s agregados (%)	Utilização de portas com waveband com 2 λ s agregados (%)	Utilização de portas com λ s (%)	Utilização da Comutação entre waveband e λ s (%)	Utilização da Comutação entre λ s waveband (%)
1	Não se aplica	Não se aplica	41,40	Não se aplica	Não se aplica	58,59	16,47	16,55
2	Não se aplica	100	Não se aplica	Não se aplica				
3	Não se aplica	8,07	24,04	8,88	Não se aplica	59	21	22,75
4	5,29	Não se aplica	22,04	Não se aplica	8,51	64,15	18,10	20,56

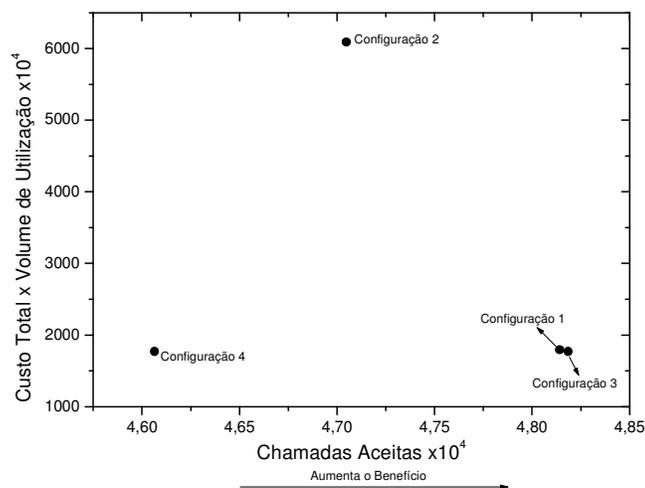


Figura 7.25: Correlação entre custo e benefício das diferentes configurações simuladas para o MG-OXC de três camadas.

A Tabela 7.14 mostra a hierarquização das configurações variando da configuração 4 com o pior benefício até a configuração 3, com o melhor benefício.

Tabela 7.14: Configurações hierarquizadas do custo e benefício.

Configurações	Varição do Benefício (Chamadas Aceitas)	Varição do Custo Total x Volume de Utilização
Configuração 4	Pior Benefício	Menor Custo
Configuração 2	Terceiro Melhor Benefício	Maior Custo
Configuração 1	Segundo Melhor Benefício	Terceiro Menor Custo
Configuração 3	Melhor Benefício	Segundo Menor Custo

A Tabela 7.15 e a Figura 7.26 mostram a relação custo-benefício para uma carga de 100 erlangs.

Tabela 7.15: Custo-Benefício dos nós MG-OXC de três camadas.

Arquitetura dos Nós	Custo-Benefício dos Nós
1	395,23
2	1298,88
3	382,15
4	386,02

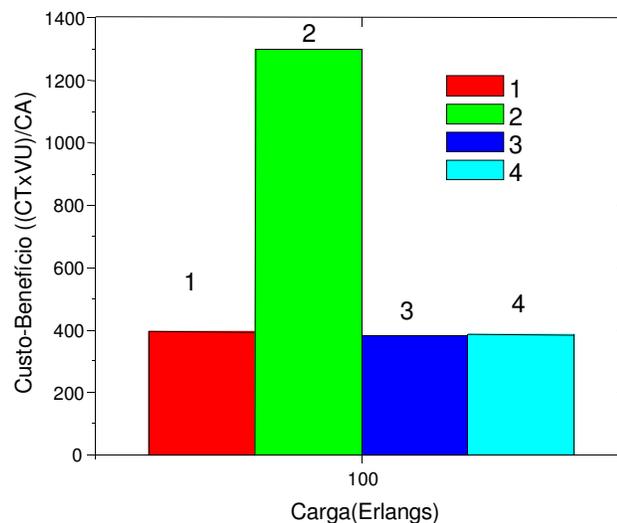


Figura 7.26: Relação custo-benefício das configurações simuladas.

Devido ao maior uso de portas waveband, a relação custo-benefício das configurações 1, 3 e 4 sofreram uma redução em relação às configurações com MG-OXC de uma camada, mesmo com a computação dos custos da comutação das portas $wb-\lambda$ e $\lambda-wb$. Esses custos adicionais foram diluídos no número de chamadas aceitas nas simulações das configurações, sendo que na configuração 1 a adoção do MG-OXC de

três camadas provocou aumento de 2825 chamadas aceitas, na configuração 2 o aumento foi 4126 chamadas aceitas e na configuração 6 foi 17088 chamadas aceitas. Esse grande volume de chamadas aceitas da configuração 6 do MG-OXC de três camadas em relação ao MG-OXC de uma camada ressalta o melhor desempenho da adoção do gerenciamento de chamadas em que podem ocorrer conexões entre λ s e wavebands.

As configurações 1 e 2 continuam com as maiores relações custo benefício, mas a configuração 3 passa a ser a configuração com a melhor relação custo benefício superando a configuração 4 devido ao maior uso de portas wb. Essa inversão é importante porque uma configuração com bom desempenho em termos de probabilidade de bloqueio pode ser implementada com uma relação custo-benefício baixa.

As Figuras 7.27, 7.28 e 7.29 ilustram as probabilidades de bloqueio das classes de serviços das arquiteturas 2 e 3 para as cargas de 60, 100 e 140 erlangs, respectivamente.

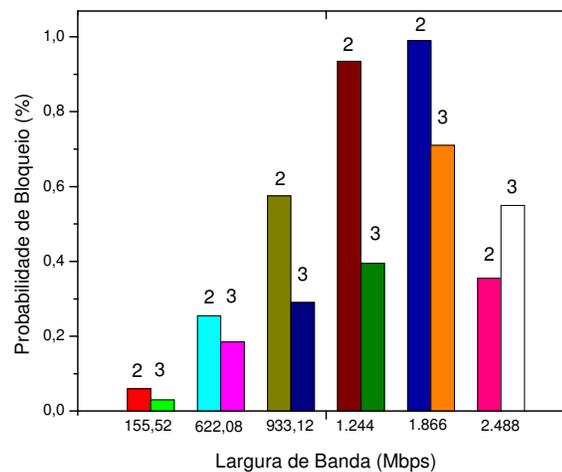


Figura 7.27: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.

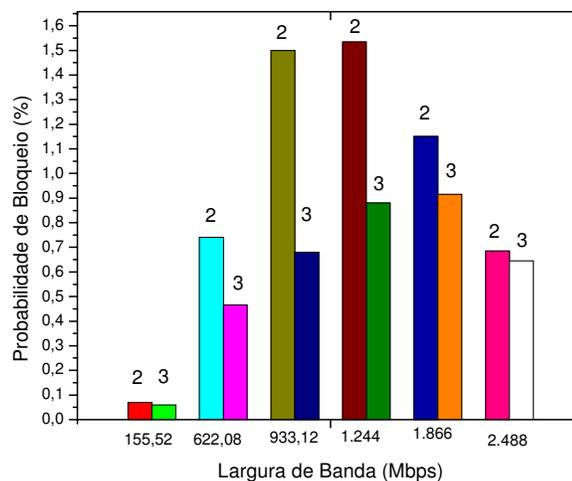


Figura 7.28: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.

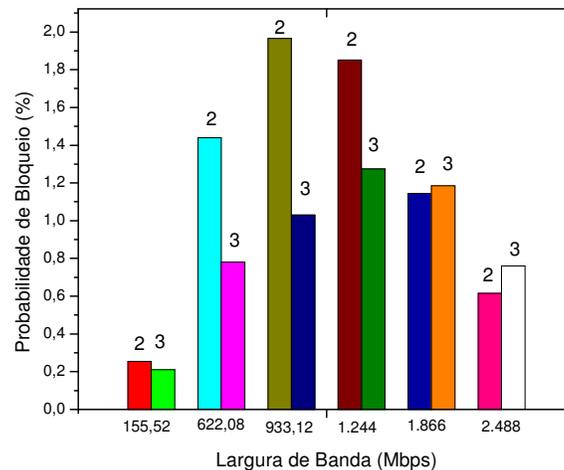


Figura 7.29: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 140 erlangs.

Para todas as cargas analisadas nota-se que existe uma pequena diferença de desempenho da classe 1 para as configurações 2 e 3. Diferentemente dos MG-OXC de uma camada, que não permitem que ocorram conexões entre wb e λ , os MG-OXC de três camadas permitem esse tipo de conexão e, portanto, ocorre maior utilização das portas wb , conforme pode ser visto na Tabela 7.13 Assim, sem essa restrição de conexões do MG-OXC de uma camada, o impacto que a técnica waveband exerce sobre este tipo de classe de serviço é menor.

Para as classes de serviço com menores probabilidades de chegada e com larguras de faixa maiores, a configuração 3 apresenta os melhores resultados. Além dos canais únicos com larguras de banda diferenciadas que a agregação waveband proporciona, as conexões entre λ e wb melhoram o desempenho das classes de serviço com larguras de banda maiores. Portanto, com a utilização de canais waveband para essas classes de serviço e das conexões entre nós λ e wb , há um melhor aproveitamento de banda entre nós MG-OXC e OXC.

Para a classe de serviço 6, uma chamada que ocorre entre os nós OXC não disputa banda com nenhuma outra classe de serviço, pois ocupa toda a banda do λ , favorecendo a configuração 3 em relação à configuração 2. Assim, o desempenho da configuração 3 supera o da configuração 2 para as cargas de 60 e 140 erlangs e é praticamente igual ao da configuração 3 para a carga de 100 erlangs.

7.2.3-Comparação Entre o Desempenho e Custo das Configurações de MG-OXC de Uma Camada e de Três Camadas

A Figura 7.30 (a, b e c) ilustra a comparação entre os MG-OXCs de uma e três camadas para as configurações 1, 3 e 4. A visível melhoria de desempenho das configurações que utilizam os MG-OXCs de três camadas ocorre devido às características do gerenciamento de conexões permitirem que nesse tipo de nó ocorram conexões entre λ s e wbs. Portanto, todas as configurações sofrem uma diminuição na sua probabilidade de bloqueio com destaque para a configuração 4 na qual no nó 8 todos os λ s são agregados ao waveband.

No MG-OXC de camada simples essa configuração sofre um aumento expressivo da probabilidade de bloqueio, pois só podem ocorrer conexões do tipo λ - λ ou wb-wb, enquanto que no MG-OXC de três camadas esse aumento é compensado pela possibilidade de se alocar chamadas que começam em λ s em wbs ao longo do caminho.

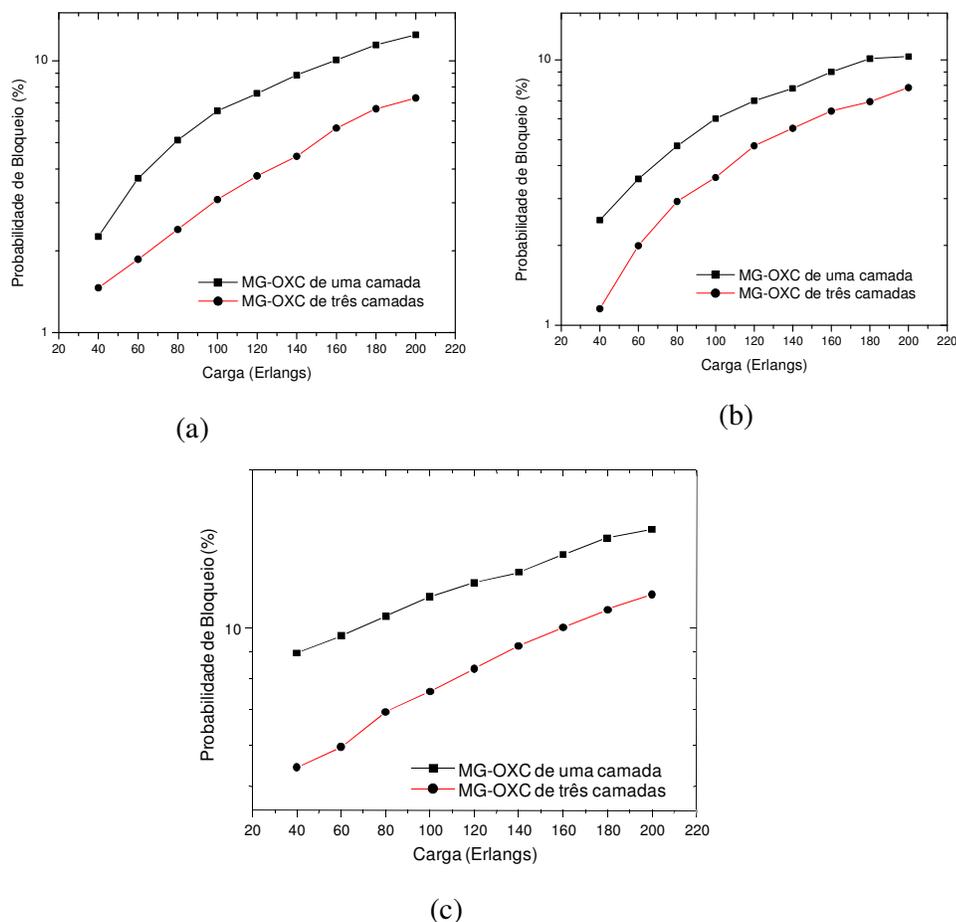


Figura 7.30: Comparação do desempenho do MG-OXC de uma camada e de três camadas para as configurações (a) 2; (b) 3 e (c) 4.

A Figura 7.31 mostra a comparação da relação custo-benefício entre as configurações 1, 3 e 4. A adoção do MG-OXC de três camadas não provoca um aumento na relação custo-benefício para a configuração 1,3 e 4, pois o número de chamadas aceitas adotando a nova configuração de foi muito expressivo devido à adoção das conexões do tipo λ -wb, wb- λ e λ -wb- λ .

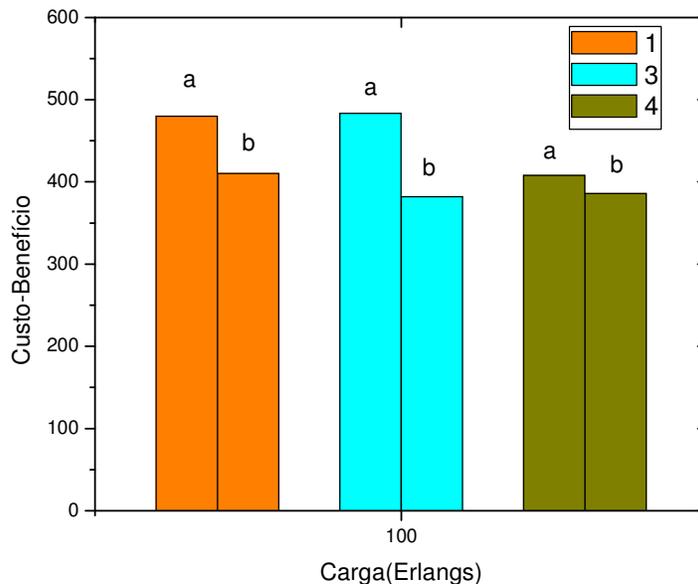


Figura 7.31: Comparação da relação do MG-OXC de uma camada e de três camadas para as configurações (a) MG-OXC de uma camada; (b) MG-OXC de três camadas.

7.3-Implementação da Técnica Waveband Utilizando o Método do Canal Específico

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos para as configurações utilizando o método do canal específico (CE). Os nós que realizam waveband são 6, 7, 8, 9, 10 e 13 da rede NSFNet. As simulações foram feitas com 12 λ s por enlace, sendo 4 λ s agregados a cada um dos 2 wavebands, agregação de tráfego dos λ s isolados e troca de λ , realizado na camada eletrônica. Os 12 λ s para os nós OXCs foram distribuídos no CE conforme mostra a Figura 7.32.

Os nós MG-OXC utilizados na simulação são de uma camada, portanto, o gerenciamento de conexões permite apenas conexões do tipo λ - λ e wb-wb.

λ_1	→	155 Mbps
λ_2	→	622 Mbps
λ_3	→	933 Mbps
λ_4	→	1224 Mbps
λ_5	→	1866 Mbps
λ_6	→	2488 Mbps
λ_7	→	933 Mbps
λ_8	→	Redundância
λ_9	→	Redundância
λ_{10}	→	Redundância
λ_{11}	→	Redundância
λ_{12}	→	Redundância

Figura 7.32: Comprimentos de onda e larguras de faixa designadas.

As cinco configurações simuladas foram:

1. Nós que possuem o recurso de agregação waveband são 6, 7, 8, 9, 10 e 13. Esses nós também possuem recurso de realizar a troca de λ e agregação de tráfego nos λ s não agregados ao waveband. Os nós 4, 11 e 12 não possuem recurso de agregação waveband, mas possuem capacidade de troca de λ e agregação de tráfego. O restante dos nós não possui a função de troca de λ nem agregação waveband, mas podem realizar agregação de tráfego.
2. Nós que realizam agregação waveband são os nós 6, 7, 8, 9, 10 e 13. Esses nós não realizam troca de λ nos λ s isolados, mas realizam agregação de tráfego. O restante dos nós não possui troca de λ nem realizam agregação waveband, mas possuem o recurso de agregar tráfego.
3. Os nós da rede realizam agregação waveband. Os nós 4, 11 e 12 realizam troca de λ e agregação de tráfego, mas não agregação waveband. O restante dos nós possui apenas o recurso de agregar tráfego.
4. Nós 6, 7, 8, 9, 10 e 13 possuem recurso de realizar agregação waveband. Esses nós não realizam troca de λ nos λ s isolados, mas realizam agregação de tráfego. Os nós 4, 11 e 12 realizam troca de λ , mas não

agregação waveband. O restante dos nós possui apenas recurso de agregar tráfego.

5. Todos os nós da rede possuem apenas recurso de agregar tráfego.

A Tabela 7.16 resume as arquiteturas simuladas.

Tabela 7.16: Arquiteturas da rede simulada.

Arquitetura de Rede	Nós da Rede	Recurso do nó
1	6, 7, 8, 9, 10 e 13	WC-MG-OXC
	4,11 e 12	WC-OXC
	1, 2, 3,5 e 14	OXC
2	6, 7, 8, 9,10 e 13	MG-OXC
	1, 2, 3, 4, 5, 11,12 e 14	OXC
3	4,11 e 12	WC-OXC
	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13 e 14	OXC
4	6, 7, 9,10 e 13	MG-OXC
	4,11 e 12	WC-OXC
	1, 2, 3, 5 e 14	OXC
5	1 a 21	OXC

A Figura 7.33 mostra a probabilidade de bloqueio global das 5 configurações.

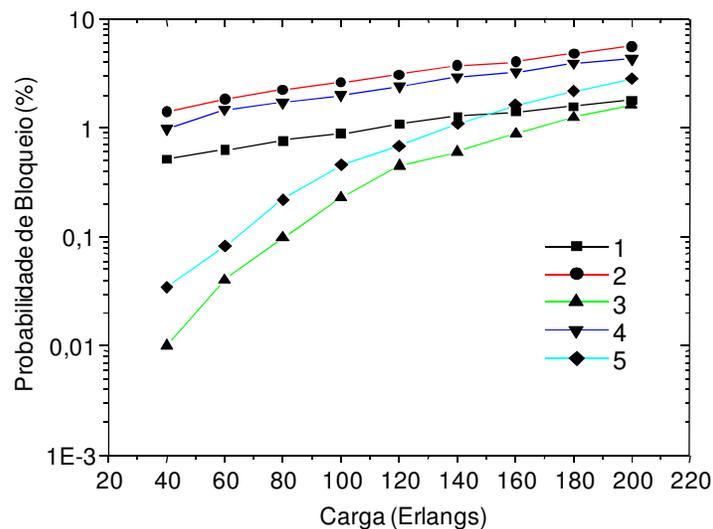


Figura 7.33: Probabilidade de bloqueio global das configurações mostradas na Tabela 7.15.

A configuração 3 apresenta o melhor desempenho por contar com mais recursos, como troca de λ e não dispor de nós MG-OXC nos quais existe a restrição de ocorrer

conexões do tipo wb-wb. Na configuração 3 o esquema do canal específico pode ser usado em sua plenitude com os λ s distribuídos para as classes de serviço, conforme ilustra a Figura 7.32.

Quando a conexão passa pelos nós 4, 11 e 12, que contêm troca de λ e esse mecanismo de troca foi ativado por ausência de banda no λ original da conexão, ela é convertida para outro λ do canal específico que possui banda suficiente para receber a conexão ou convertida para algum λ de redundância com largura de banda disponível.

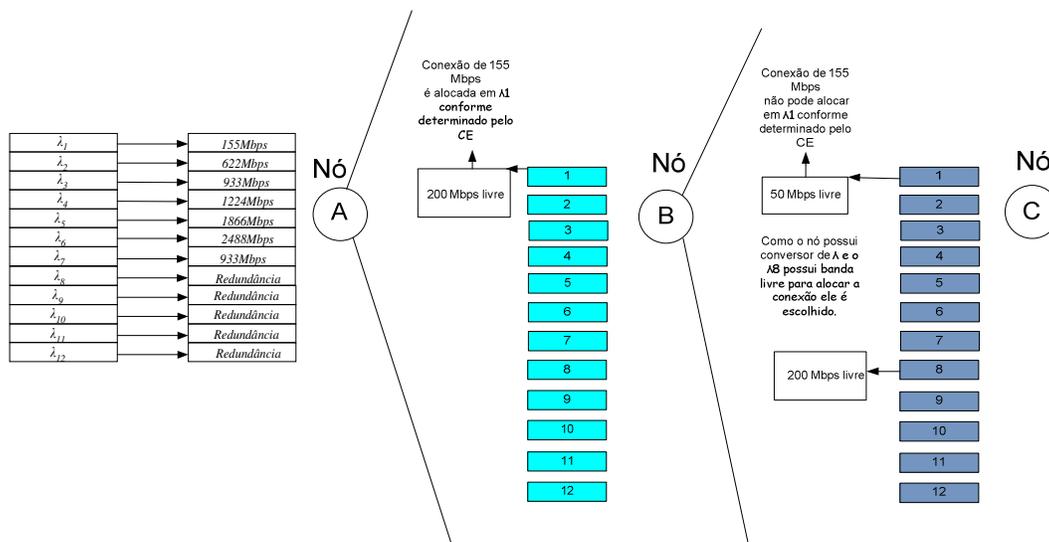


Figura 7.34: Comprimento de onda 8 sendo usado para a troca, pois possui banda disponível para essa operação.

Tomando como exemplo a Figura 7.34 a conexão de 155 Mbps se inicia no nó A e é alocada no λ_1 como determina o CE. O tráfego chega ao nó B, que realiza troca de λ , mas o λ_1 não possui largura de banda suficiente para alocar a conexão de 155 Mbps até o nó C. Os λ s restantes são verificados e a conexão é alocada no λ_8 que, apesar de ser um λ de redundância, possui banda suficiente para alocar a conexão até o seu destino.

A configuração 5 é a segunda melhor em termos de desempenho, pois utiliza apenas nós OXCs nos quais os λ s do CE podem ser utilizados na distribuição mostrada na Figura 7.32. Conforme a carga da rede aumenta, a configuração 5 é superada pela configuração 1.

A configuração 1 possui duas restrições que são as conexões do tipo waveband, que podem ocorrer apenas entre portas waveband, e o esquema do CE limitado a apenas 4 λ s de redundância nos nós MG-OXCs. A Figura 7.35 ilustra como fica a distribuição

de λ_s no canal específico quando são utilizados wavebands ao longo de uma conexão formada pelos nós A, B e C. Os λ_s 1 a 8 são utilizados unicamente pelas portas waveband, sobrando os λ_s 9 a 12 para serem utilizados pelo canal específico para alocar as conexões de todas as classes de serviço. Portanto, uma conexão que iniciar em um λ isolado terá que disputar a banda dos λ_s com outras conexões com outras classes de serviço.

Embora com essas restrições, essa configuração conta com os benefícios dos nós com a função de troca λ_s tanto nos nós que possuem λ_s isolados como nos nós 4, 11 e 12, que utilizam a largura de banda livre dos λ_s do canal específico e também a largura de banda livre dos λ_s de redundância, conforme ilustra a Figura 7.36.

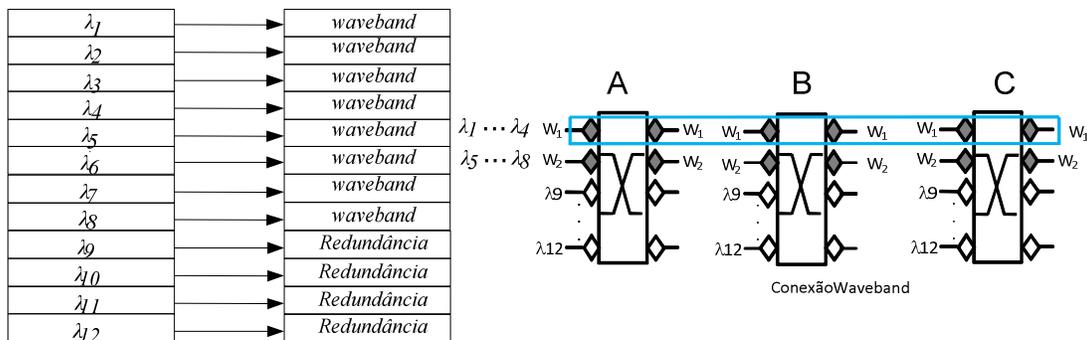


Figura 7.35: Comprimentos de onda e larguras de faixa designadas para os nós MG-OXC. Nessa configuração apenas os λ_s de redundância estão disponíveis para alocar conexões fora do waveband.

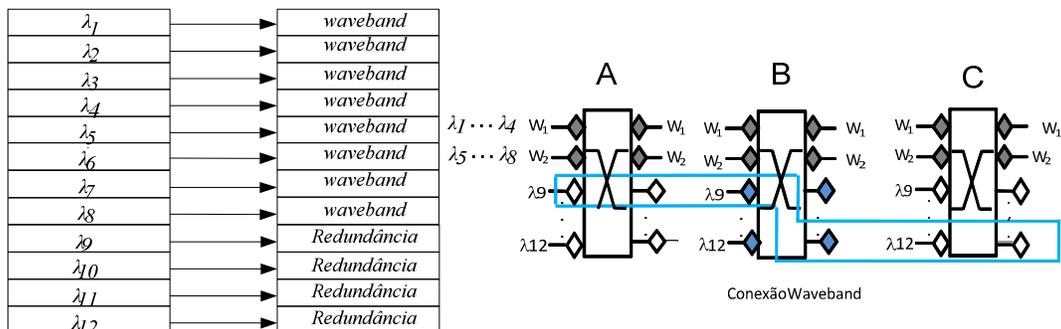


Figura 7.36: Comprimentos de onda e larguras de faixa designadas para os nós MG-OXC. Nessa configuração os λ_s de redundância estão disponíveis para realizar a troca de λ .

As configurações 2 e 4 apresentam o pior desempenho devido à presença de wavebands que limitam a utilização de λ_s para o CE e restringem as conexões apenas entre os wavebands. Outro fator é a ausência de recursos adicionais como troca de λ nos λ_s isolados.

A Figura 7.37 mostra, em termos de probabilidade de bloqueio, a comparação entre a técnica first-fit (FF) utilizada na simulação da Seção 5.1 e a técnica CE utilizada na simulação das configurações dessa seção.

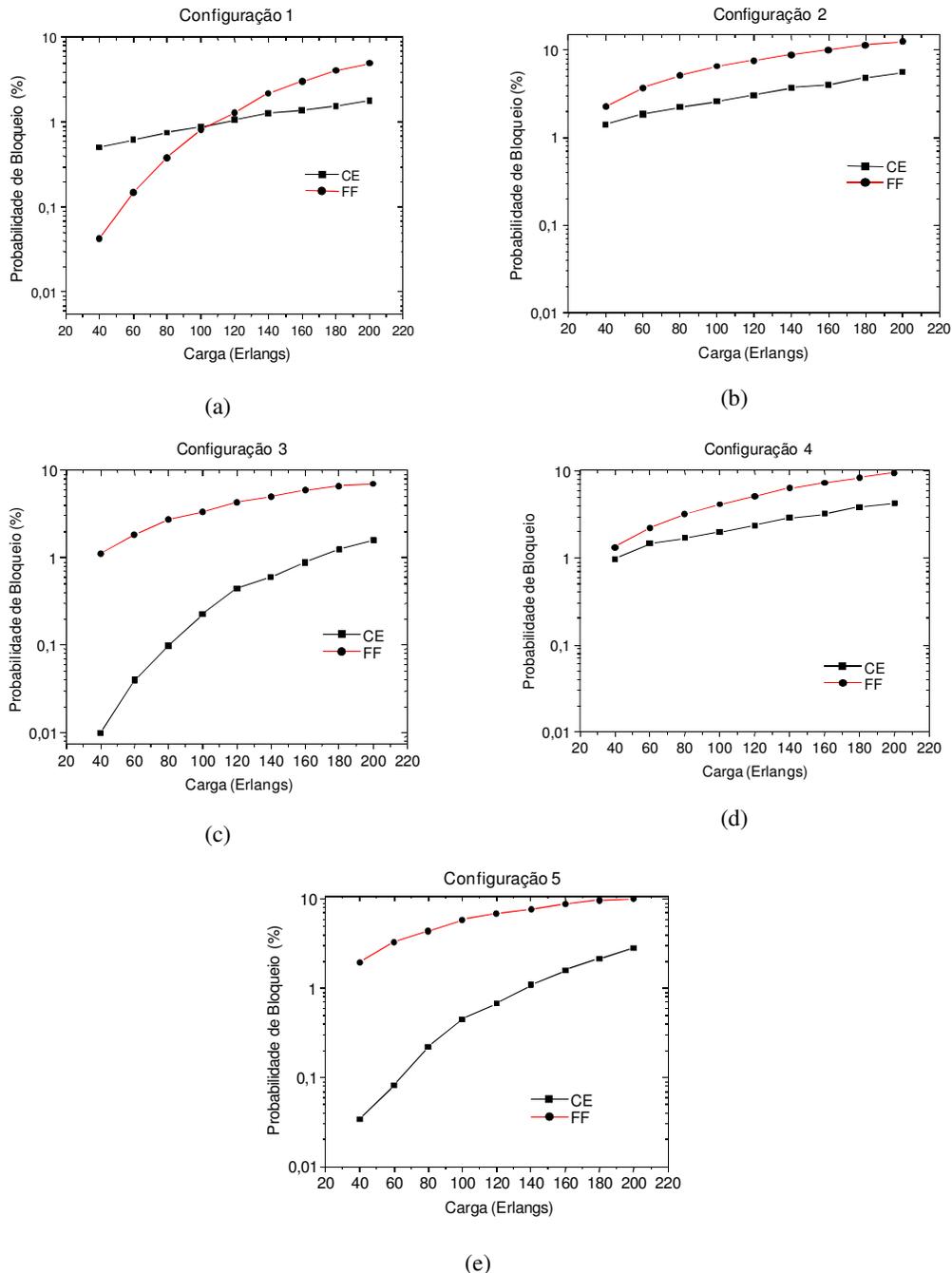


Figura 7.37: Comparação entre os métodos CE e FF (a) configuração 1; (b) configuração 2; (c) configuração 3; (d) configuração 4; (e) configuração 5.

Para a configuração 1 a técnica FF é melhor até aproximadamente 90 erlangs de carga. Após esse valor a técnica CE torna-se mais eficiente. Essa característica se deve a presença da função de troca de λ nos λ_s isolados e nos nós 4, 11 e 12. Neste caso, em

baixas cargas, com a presença de muitos nós com a função de troca de λ s, a técnica FF aloca mais conexões em relação à técnica CE porque a escolha do λ varia conforme a banda disponível de cada λ e, desta maneira, a troca de λ aumenta a disponibilidade de caminhos ópticos com recursos disponíveis, o que facilita a alocação de λ para a técnica FF. Para cargas elevadas, o principal fator das melhores probabilidades de bloqueio da técnica CE é a disponibilidade de λ específico para cada classe de serviço, o que não ocorre para a técnica FF.

Na configuração 2 a técnica CE é mais eficiente que a técnica FF para as cargas analisadas. Os λ s reunidos ao waveband não podem ser usados pelo CE, portanto a restrição de conexões do tipo wb-wb limita a técnica do CE. Assim, os nós que possuem 8 λ s reunidos ao waveband dispõem apenas de 4 λ s para serem usados pelo CE para alocar as conexões λ - λ nos nós MG-OXC. Desta maneira, como mostra a Figura 7.37, todos os λ s são de redundância e ficam com a tarefa de administrar mais de uma classe de serviço.

No restante dos nós, os λ s específicos dedicados às classes de serviço utilizam a banda disponível para alocar conexões. Em baixas cargas a diferença entre o CE e o FF não é tão expressiva, pois os λ s estão com pouca banda ocupada e conseguem alocar as conexões. Mas, à medida que se exige mais desempenho na rede a diferença se acentua e a técnica CE mostra probabilidade de bloqueio mais baixa, 1,39% para o CE e 2,25% para o FF. Para 180 erlangs a diferença da probabilidade de bloqueio entre os dois métodos é 4,8% para CE e 11,43% para o FF. Assim, à medida que a carga da rede aumenta, e conseqüentemente mais chamadas chegam em menor intervalo de tempo, a técnica do CE se destaca em relação ao FF.

As configurações 3 e 5 são as que mais evidenciam a diferença entre os dois métodos. Essas configurações não possuem nós com waveband, mas apenas nós OXC e, portanto, só há conexões do tipo λ - λ . A designação de um λ para cada classe de serviço mostra-se bastante eficiente no uso da banda do λ nessas duas configurações. Para a carga de 180 erlangs, a probabilidade de bloqueio da configuração 3 para o CE é 1,24% e para o FF é 6,61%. Na configuração 5 é 2,15% para o CE e 9,74% para o FF. O número de nós com troca de λ na configuração 3 é insuficiente para dar ao FF uma vantagem em relação ao CE em termos de probabilidade de bloqueio. Para que o FF se destaque em relação ao CE seriam necessários mais nós com capacidade de realizar troca de λ .

Na configuração 4, devido ao recurso do waveband em alguns nós, a diferença entre os métodos CE e FF fica menos evidenciada devido à limitação que a técnica waveband impõe ao CE em relação à disponibilidade de λ s disponíveis para as classes de serviço. Para a carga de 180 erlangs, a probabilidade de bloqueio da configuração 4 para o CE é 3,87% e para o FF é 8,431%. Assim, na presença da técnica waveband, um λ gerenciando mais de uma classe de serviço torna o esquema do CE mais limitado, uma vez que a banda desses λ s passa a ser utilizada para alocar conexões das classes de serviço 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

A Figura 7.38 ilustra a comparação das probabilidades de bloqueio das 5 configurações simuladas para uma carga de 120 erlangs.

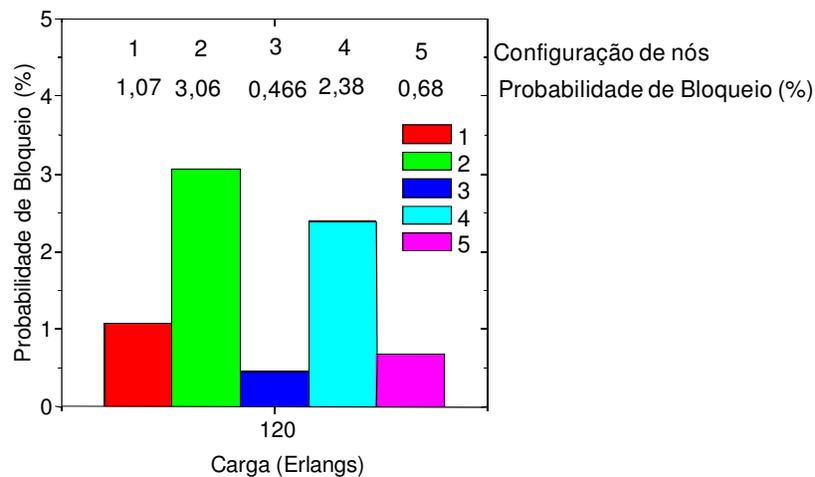


Figura 7.38: Probabilidade de bloqueio para uma carga de 120 erlangs.

As Figuras 7.39 a 7.41 ilustram as probabilidades de bloqueio das classes de serviço para as configurações 3 e 2 que correspondem ao pior e melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio das configurações simuladas.

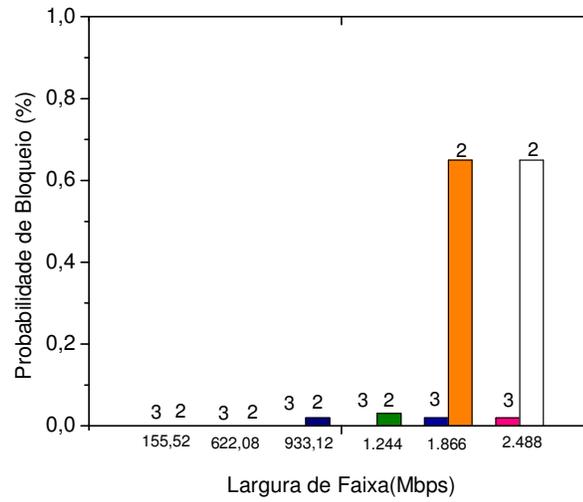


Figura 7.39: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 60 erlangs.

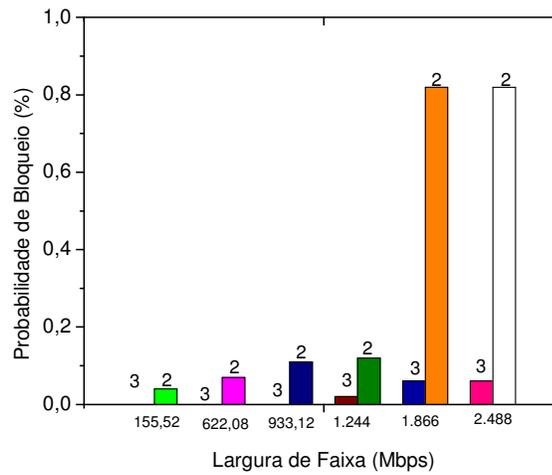


Figura 7.40: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.

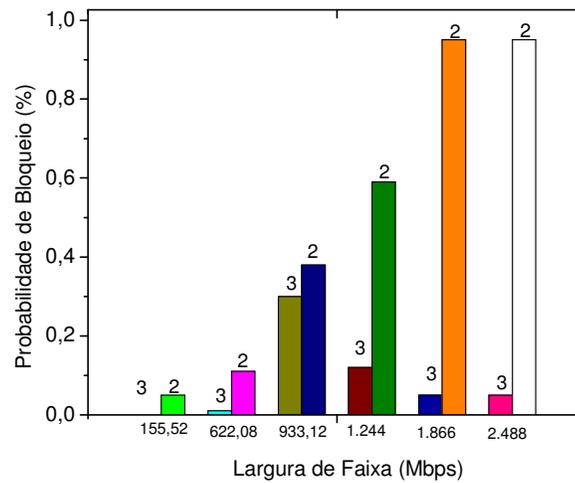


Figura 7.41: Probabilidade de bloqueio das classes de serviço para 100 erlangs.

A configuração 3 mostrou-se superior à 2 em todas as classes de serviço. O λ_1 , destinado à classe de serviço 1, pode alocar até 16 conexões totalizando 2,5 Gbps. Apesar da alta probabilidade de geração, a probabilidade de bloqueio é nula para os três valores de carga analisados. O λ_2 , responsável pela classe de serviço 2, pode alocar até 4 conexões e na situação mais crítica a probabilidade de bloqueio é 0,01%. O λ_3 e o λ_7 são responsáveis pela classe de serviço 3 e podem agrupar no máximo duas conexões em sua banda total. Sua probabilidade de bloqueio é 0% nas cargas de 40 e 100 erlangs, mas para a carga de 140 erlangs a probabilidade de bloqueio é 0,3%. Esse aumento é causado pelo maior número de conexões que chegam em um menor intervalo de tempo e ao alto valor de banda restante nos λ s quando alocam o máximo de conexões de 933,12 Mbps. Exemplificando, em um λ de 2,5 Gbps podem ser alocadas no máximo duas conexões de 933,12 Mbps, totalizando 1866,24 Mbps, ficando o λ com 614 Mbps de banda disponível para utilização, utilizando troca de λ .

As classes de serviço 4, 5 e 6 são as de mais alto valor de banda e podem ser alocadas nos λ_3 , λ_4 e λ_5 . Um menor número de conexões com essa banda é alocada nos λ s. Por isso, a probabilidade de bloqueio aumenta nessas classes. Na classe 4 é possível alocar no máximo 2 conexões, na classe 5 no máximo 1 conexão e na classe 6 no máximo 1 conexão em 2,5 Gbps. Apesar de serem classes de serviço com banda muito larga, a probabilidade de geração é baixa, não afetando o desempenho global da rede. Na situação mais crítica para as cargas consideradas a probabilidade de bloqueio é 0,15% na configuração 2 para a classe de serviço 4.

A configuração 2 possui λ s agregados aos wavebands e por isso limita os λ s que podem ser usados pelo canal específico nos nós MG-OXC. Por exemplo, o nó 6 possui 8 λ s reunidos ao waveband e conta com apenas 4 λ s para serem usados no canal específico. Desta maneira, os 4 λ s restantes serão alocados para as classes de serviço 1 a 6 sendo que um λ será responsável por mais de uma classe de serviço. Em termos de probabilidade de bloqueio, para a classe de serviço 1 a condição mais crítica ocorre com carga de 140 erlangs e seu valor é 0,15%. O restante das classes de serviço apresenta condição crítica de bloqueio para 140 erlangs.

Essa diminuição de desempenho da rede na configuração 2 é causada pela restrição de conexões do tipo wb-wb que os nós tipo MG-OXC impõem e à quantidade menor de λ s que estão disponíveis nos nós MG-OXC para o canal específico alocar as conexões.

7.4-Restrições Físicas

Nessa seção serão apresentados os resultados numéricos das simulações realizadas utilizando os quatro tipos de nós descritos no Capítulo 4. Consideramos camada física com três arquiteturas de rede: (a) totalmente ópticas sem a capacidade de agregação de tráfego e troca de λ ; (b) com alguns nós com conversão OEO que possuem apenas o recurso de regeneração do sinal óptico e (c) com alguns nós OEO com capacidade de regeneração do sinal óptico, agregação de tráfego e troca de λ . O desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio para as três configurações diferentes será exibido. A rede simulada é a NSFNet.

7.4.1-Parâmetros do Sistema

A Tabela 7.17 resume os parâmetros do sistema óptico usados na simulação.

Tabela 7.17: Parâmetros do sistema óptico usado no modelo [59].

Parâmetros	Valores
Comprimentos de onda (em nm)	1546,99~1552,60 com 0,8nm de espaçamento de canal
Taxa de bit de cada canal	10 Gbps
Largura de banda óptica (B_o)	70 GHz
Potência do sinal por canal	1 mW
Valor do ruído crosstalk da chave (X_{sw})	25 dB
Perda do multiplexador/demultiplexador(L_{mx}/L_{dm})	4 dB
Perda da chave (L_{sw})	8 dB
Perda devido ao conector (L_{tap})	1 dB
Ganho do EDFA no OXC (G_{in}, G_{out})	12 dB, 6 dB
Fator ASE do EDFA no nó (n_{sp})	1,2
Ganho desejado do DRA	20 dB
Comprimentos de onda de bombeio (em nm)	1410, 1450, e 1500
Potências de bombeio (em W)	0,607, 0,209 e 0,01
Limiar tolerável da OSNR	7,4dB (para BER = 10^{-9})
Fator de polarização (K_{eff})	2
Perda da fibra nos comprimentos de onda de bombeio (α_p)	0,3 db/km
Coeficiente de espalhamento (S_c)	0,0022

A Tabela 7.18 mostra as classes de serviços, as respectivas taxas de bit e as probabilidades de chegada de cada solicitação de conexão.

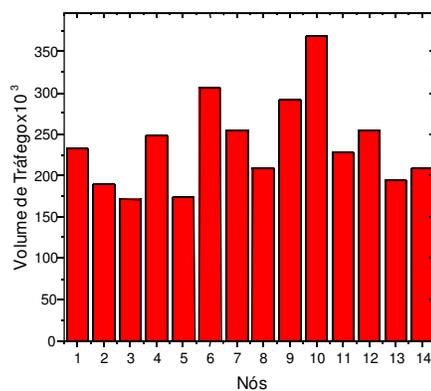
Tabela 7.18: Classes de Serviços e Taxa de bit

Classe de Serviços	Taxa de Bit (Mbps)	Probabilidade de Chegada
1	155,52	59%
2	622,08	15%
3	933,12	10%
4	1.244	8%
5	2.488	5%
6	10.000	3%

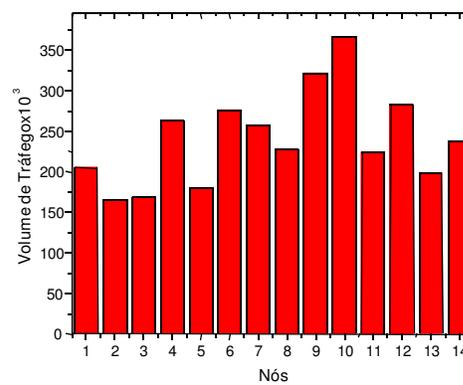
7.4.2-Nós com Capacidade de Regeneração do Sinal Óptico

A escolha dos nós em que o sinal passará pelo processo de regeneração do sinal óptico foi realizada utilizando o algoritmo descrito na Seção 4.4.1 do Capítulo 4. Os nós com maior intensidade de tráfego foram 6, 7, 9, 10 e 12. A Figura 7.42 exemplifica a intensidade de tráfego em quatro simulações diferentes.

Esses nós são os que mais concentram tráfego devido a sua conectividade na rede. O nó 10 possui 4 enlaces de fibras bidirecionais, sendo o nó que mais concentra intensidade de tráfego na rede NSFNet.



(a)



(b)

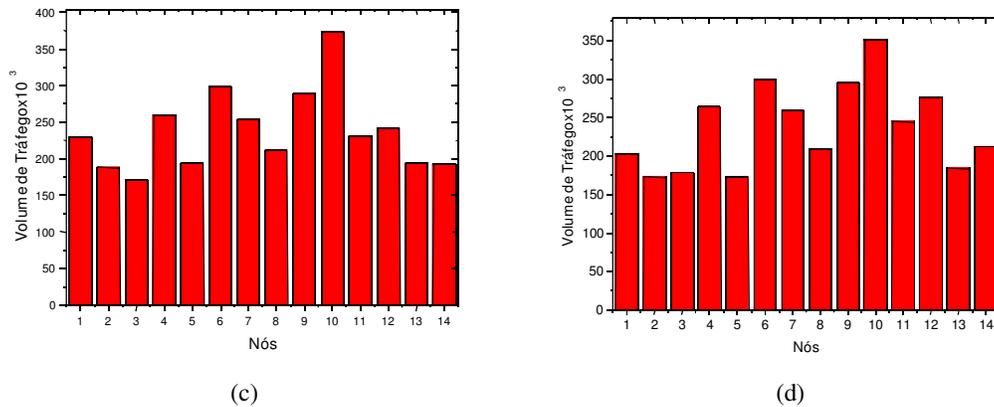


Figura 7.42: Intensidade de tráfego para os diferentes nós da rede NSFNet equipada apenas com nós OXCs. Sendo (a) Simulação 1, (b) Simulação 2, (c) Simulação 3 e (d) Simulação 4.

7.4.3-Comparação entre Redes Totalmente Ópticas e Redes com Conversão OEO em Nós Escolhidos Previamente

Na Figura 7.43 são exibidas as probabilidades de bloqueio dos dois tipos de configuração de rede, considerando as restrições físicas descritas no Capítulo 4 para o cálculo da OSNR.

As configurações simuladas são:

1. Rede totalmente óptica;
2. Rede na qual os nós 6, 7, 9, 10 e 12 realizam conversão OEO e possuem capacidade de regeneração do sinal óptico.

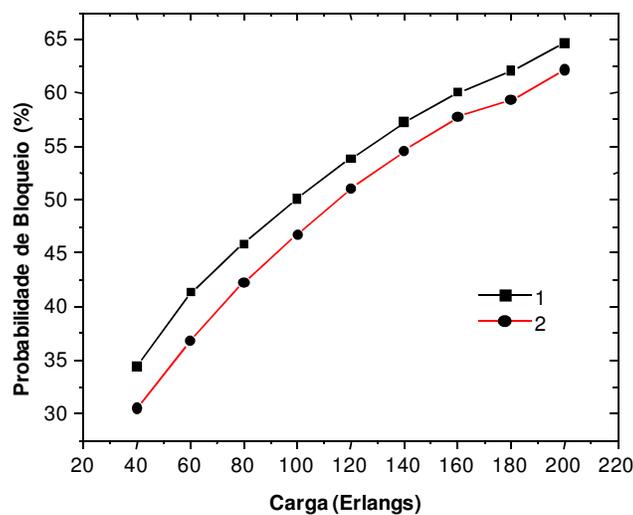


Figura 7.43: Comparação de desempenho da rede totalmente óptica e rede com nós com capacidade de regeneração do sinal óptico.

A rede totalmente óptica, configuração 1, apresenta desempenho ruim na camada física porque ocorre um acúmulo de penalidades ao longo do caminho óptico. Esse acúmulo não é compensado por nós com capacidade de regeneração. Como optamos por equipar os nós com troca de λ apenas no domínio eletrônico, a restrição de continuidade de λ é imposta à rede totalmente óptica e é mais um fator que contribui para o aumento de sua probabilidade de bloqueio. Assim, o caminho óptico é muito mais suscetível aos efeitos que degradam a BER.

Na camada de rede a falta de recurso como agregação de tráfego, que é realizado no domínio eletrônico penalizam também o desempenho da rede totalmente óptica. Por exemplo, uma conexão de 155,52 Mbps ocupa completamente um λ com capacidade 10 Gbps e, assim, uma grande capacidade de alocar tráfego não é utilizada. Sem a disponibilidade desses recursos, a probabilidade de bloqueio de uma rede totalmente óptica pode chegar até 65% de chamadas bloqueadas em uma rede com 200 erlangs de carga.

Já a rede na qual os nós 6, 7, 9, 10 e 12 possuem o recurso de conversão OEO e regeneração do sinal óptico na camada física ocorre uma diminuição no número de chamadas bloqueadas, pois, nesses nós, de acordo com o algoritmo da Figura 4.9 a BER é zerada.

Para uma comparação mais justa com a rede totalmente óptica, os nós que realizam conversão OEO possuem apenas a capacidade de regenerar o sinal e não possuem recursos adicionais, como troca de λ . O grau de agregação de tráfego continua sendo 1.

Para uma carga de 200 erlangs, o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de uma rede sem recursos adicionais para os nós que realizam a regeneração do sinal óptico pode chegar a 60% das conexões geradas.

A Figura 7.44 mostra a comparação entre três configurações de rede, incluindo o recurso da troca de λ na rede com capacidade de conversão OEO em alguns nós. As configurações de rede simuladas são:

1. Rede totalmente óptica;
2. Rede com os nós 6, 7, 9, 10 e 12 com capacidade de conversão OEO, regeneração do sinal e com grau de agregação de tráfego 1;
3. Rede com os nós 6, 7, 9, 10 e 12 com capacidade de conversão OEO, regeneração do sinal e de troca de λ com grau de agregação de tráfego 1.

Nota-se que o relaxamento da restrição de continuidade de λ nos nós que possibilitam a conversão OEO e a regeneração do sinal reduz a probabilidade de bloqueio global da rede. Assim, o tráfego da rede alocado em um determinado λ e que passa pelos nós 6, 7, 9, 10 e 12 poderá ser alocado em algum dos sete λ s disponíveis para troca.

Assim, verificamos que o desempenho de rede melhora, sendo que a condição mais crítica ocorre para a carga de 200 erlangs, na qual aproximadamente 50% das chamadas geradas são bloqueadas.

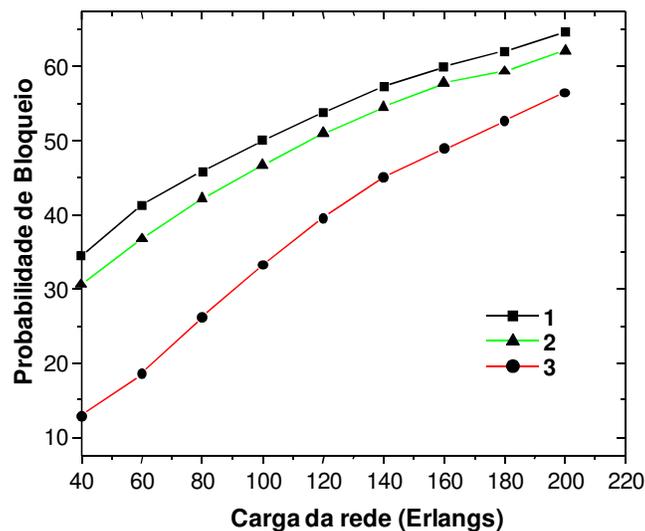


Figura 7.44: Comparação de desempenho das configurações de rede 1, 2 e 3 simuladas.

7.4.4-Probabilidade de Bloqueio Devido à Falta de Comprimentos de Onda com Banda Disponível na Camada de Rede e de Restrições Físicas

Nessa seção serão detalhados os bloqueios que ocorrem devido à ausência de λ s com banda disponível na rede e às restrições físicas

As configurações simuladas são:

1. Rede totalmente óptica com grau de agregação de tráfego 1;
2. Rede com os nós 6, 7, 9, 10 e 12 com capacidade de conversão OEO, regeneração do sinal e troca de λ com grau de agregação de tráfego 1;
3. Rede com os nós 6, 7, 9, 10 e 12 com capacidade de conversão OEO, regeneração do sinal e grau de agregação de tráfego 1.

7.4.4.1-Bloqueio por Banda Insuficiente nos Comprimentos de Onda Disponíveis na Rede

Na Figura 7.45 é ilustrado o desempenho das configurações de rede 1, 2 e 3 simuladas. Nota-se que à medida que a carga da rede aumenta a falta de banda dos λ s ou o gerenciamento ineficiente da banda disponível nos λ s torna-se um problema crítico para o desempenho. À medida que a carga de rede aumenta, mais conexões são geradas em um menor intervalo de tempo e, assim, a disputa pela banda aumenta.

A configuração 2 se diferencia das configurações 1 e 3, pois possui a função de troca λ s alocados nos nós 6, 7, 9, 10 e 12 que, ao realizar a troca de λ s, disponibilizam mais caminhos ópticos para a conexão em andamento.

Para 60 erlangs com uma média de duração das chamadas de 60 segundos, a rede recebe 1 conexão por segundo e os λ s não estão sobrecarregados. No pior caso, a probabilidade de bloqueio atinge cerca de 30% das conexões. No caso de 200 erlangs a rede recebe cerca de 4 conexões por segundo e os λ s, utilizando a técnica de alocação de banda first-fit, começam a utilizar toda sua banda disponível para atender a demanda, aumentando a probabilidade de bloqueio. No pior caso, a probabilidade de bloqueio atinge cerca de 60% das conexões.

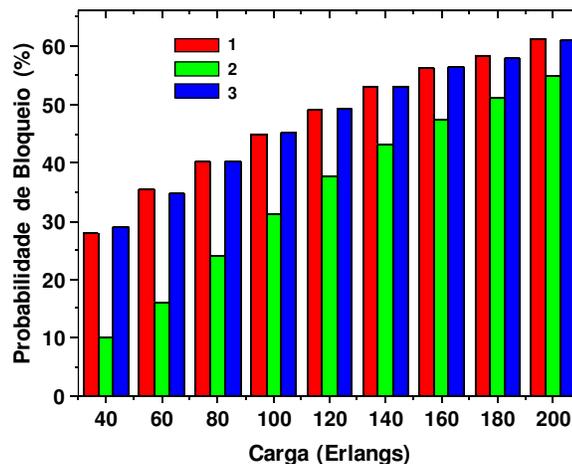


Figura 7.45: Comparação de desempenho das três configurações de rede simuladas.

7.4.4.2-Restrições Físicas

Na camada física a análise das causas de bloqueio foi feita utilizando a BER definida no Capítulo 4.

7.4.4.2.1-Bloqueio por BER

O bloqueio por BER é mostrado na Figura 7.46. Observa-se que a rede totalmente óptica mostra probabilidade de bloqueio maior que as outras duas configurações de rede. Este comportamento é devido à ausência de regeneração de sinal, sendo mais penalizada em relação à degradação do sinal óptico. As configurações 2 e 3 mostram probabilidade de bloqueio baixa devido à capacidade de regeneração do sinal óptico nos nós com maior intensidade de tráfego.

Observamos que a localização mais adequada dos nós que realizam a conversão OEO e regeneração de sinal mantém a probabilidade de bloqueio baixa nas configurações de rede com capacidade de conversão OEO e sem troca de λ . À medida que a carga aumenta, a probabilidade de bloqueio diminui porque o bloqueio passa a ocorrer de forma mais acentuada pela falta de banda nos λ s do que pelas restrições físicas.

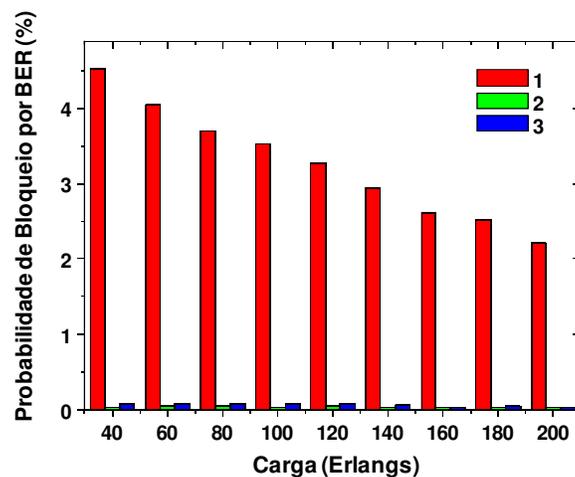


Figura 7.46: Comparação de desempenho das configurações 1, 2 e 3 para o bloqueio por BER.

7.5-Adicionando Recursos à Rede

Foram adicionados aos nós 6, 7, 9, 10 e 12 capacidade de agregação de mais

conexões na banda disponível nos λ s, além de troca de λ s. Assim, o fator de agregação de tráfego que antes era restrito a 1 conexão agora pode chegar até a 64 conexões em um λ com largura de banda de 10 Gbps.

Por exemplo, um λ de largura de banda máxima igual a 2,5 Gbps e um fator de agregação, g_a , igual a 16 pode agregar no máximo 16 conexões de largura de banda de 155,52 Mbps e um λ de largura de banda máxima igual a 10 Gbps e um fator de agregação, g_a , igual a 64 pode agregar no máximo 64 conexões de 155,52 Mbps. Portanto, o fator pode variar de 1 a 64 para as situações relacionadas na Tabela 6.7.

As configurações simuladas foram:

1. Rede totalmente óptica;
2. Rede com os nós 6, 7, 9, 10 e 12 com capacidade de conversão OEO, regeneração de sinal e fator de agregação de tráfego igual a 1;
3. Rede com os nós 6, 7, 9, 10 e 12 com capacidade de conversão OEO, regeneração de sinal, troca de λ e fator de agregação de tráfego igual a 1;
4. Rede com os nós 6, 7, 9, 10 e 12 com capacidade de conversão OEO, regeneração de sinal, troca de λ e fator de agregação de tráfego igual a 64.

Na Figura 7.47 é ilustrada a comparação da probabilidade de bloqueio das redes simuladas. A configuração 4 se destaca em relação às outras três configurações simuladas porque faz uso dos recursos disponíveis na camada eletrônica. Em sua situação mais crítica, que ocorre em 200 erlangs, a configuração 1 registra aproximadamente 65% de bloqueio enquanto na configuração 4 esse número cai para aproximadamente 45% de bloqueio.

Com essa melhoria de desempenho, podemos verificar que o uso de alguns nós com capacidade de conversão OEO, aliado aos recursos de troca de λ e agregação de tráfego é benéfica para uma rede que não pode dispor dessas tecnologias no domínio óptico, mas também não pode contar com investimentos para implementar uma grande quantidade de nós com os recursos citados.

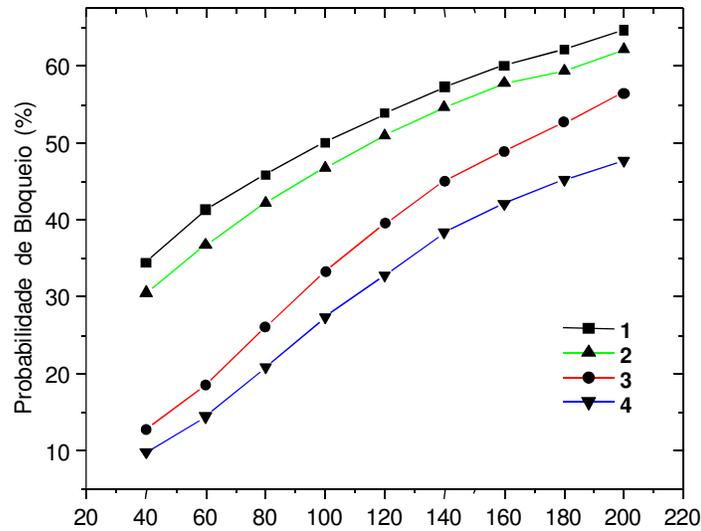


Figura 7.47: Probabilidades de Bloqueio das redes simuladas.

Na Figura 7.48 é apresentada curva de probabilidade de bloqueio, número de nós com capacidade de conversão OEO e número de λ s com capacidade de realizar conversão OEO. Para esse gráfico, devido ao tempo de processamento, foram simuladas 10.000 chamadas. Com tais simulações, já é possível notar a influência do número de λ s que realizam conversão OEO e regeneração de sinal sobre probabilidade de bloqueio.

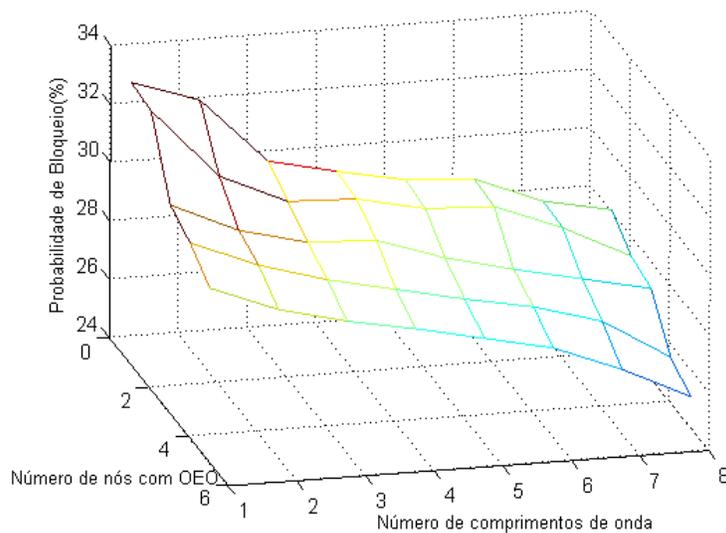


Figura 7.48: Relação entre número de nós com conversão OEO, número de λ s que realizam conversão OEO e probabilidade de bloqueio.

7.6-Influência das Restrições Físicas na Técnica de Agregação Waveband

Nessa seção será apresentada a técnica de agregação waveband em nós MG-OXC de uma camada com a inclusão das restrições físicas. Será apresentado o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio de duas configurações:

1. Rede totalmente óptica com agregação waveband;
2. Rede com capacidade de conversão OEO com agregação waveband.

Os nós que realizam waveband são 6, 7, 8, 9, 10 e 12. As simulações foram feitas com 8 λ s por enlace e 2 wavebands com granularidade 2.

A Figura 7.49 mostra a comparação entre os efeitos da BER em uma rede com capacidade de realizar conversão OEO com e sem agregação waveband. Observamos que a rede com agregação waveband apresenta probabilidade de bloqueio por BER maior para todas as cargas. É porque os 4 λ s que foram agregados aos 2 wavebands permanecem no domínio óptico e não sofrem regeneração ao longo de todo o percurso, sendo mais suscetíveis às degradações físicas do sinal óptico. A Figura 6.32 ilustra o que ocorre em uma conexão wb-wb e em uma conexão λ - λ .

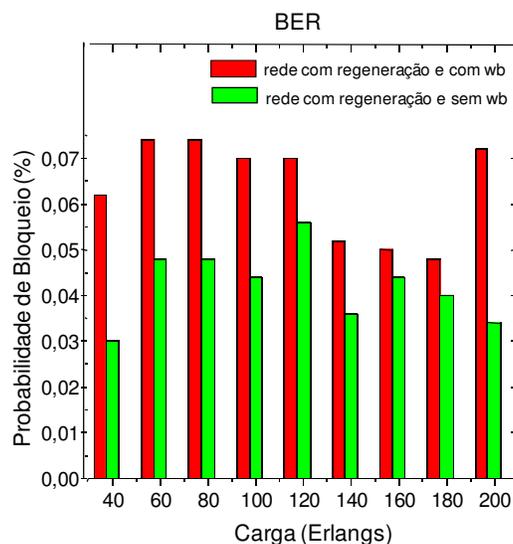


Figura 7.49: Comparação entre os efeitos da BER nas arquiteturas 1 e 2.

As Figuras 7.50 e 7.51 mostram a comparação da rede com as configurações 1 e 2, respectivamente, com e sem a aplicação da técnica de agregação waveband. Os nós com agregação waveband são capazes de otimizar o uso da banda melhorando o

desempenho da rede totalmente óptica. Por exemplo, um waveband com granularidade 2 significa que 2 λ s com uma determinada banda vão ser agregados e tratados como único. Assim, em uma conexão waveband fim-a-fim consegue-se agregar mais de uma banda e transmitir várias conexões de bandas diferentes sob uma mesma agregação waveband fim-a-fim, utilizando de forma mais eficiente a banda disponível em uma rede.

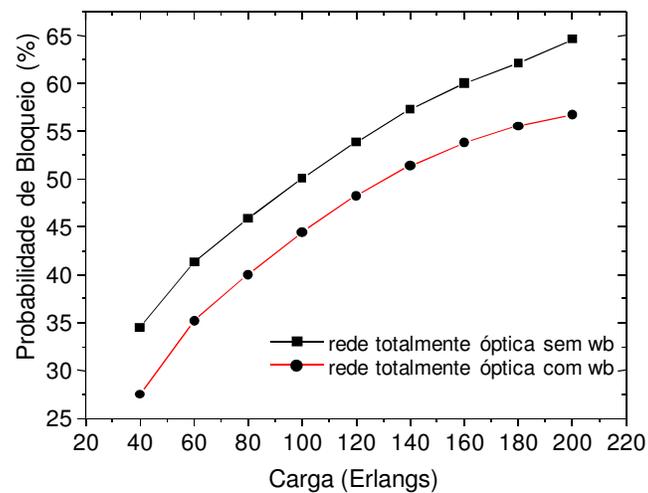


Figura 7.50: Comparação da configuração 1 com e sem a técnica de agregação waveband.

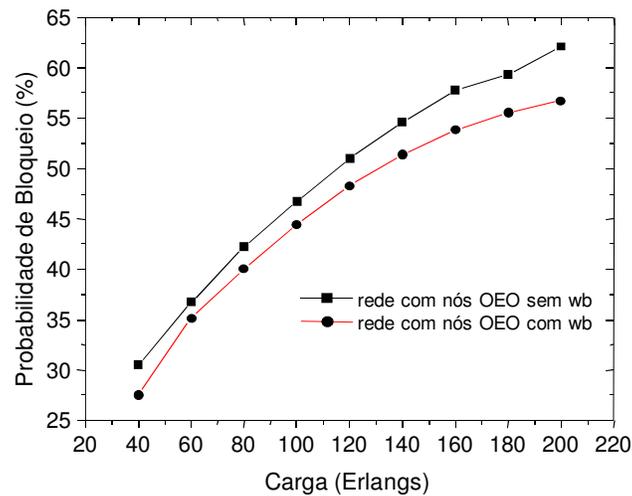


Figura 7.51: Comparação da configuração 2 com e sem a técnica de agregação waveband.

7.7-Análise do Esquema de Monitoramento de Redes Ópticas WDM em Conjunto com a Técnica Waveband

Nessa segunda parte dos resultados numéricos, será feita a análise da técnica waveband em conjunto com o esquema proposto de monitoramento de desempenho baseado na intensidade de tráfego das redes ópticas.

As simulações foram feitas utilizando a topologia da rede nacional italiana, Figura 7.52, formada por 21 nós e 72 enlaces bidirecionais, cada um destes dispondo de 12 λ s com taxa de bit máxima 2,5 Gbps. A disposição dos nós MG-OXC de uma camada e OXC que produz os menores valores de probabilidade de bloqueio para a rede foi escolhida após série exaustiva de simulações. Sendo assim, os nós 8, 11, 13, 15, 18, 19, 20 e 21 são equipados com MG-OXC de uma camada ou WC-MG-OXC de uma camada.

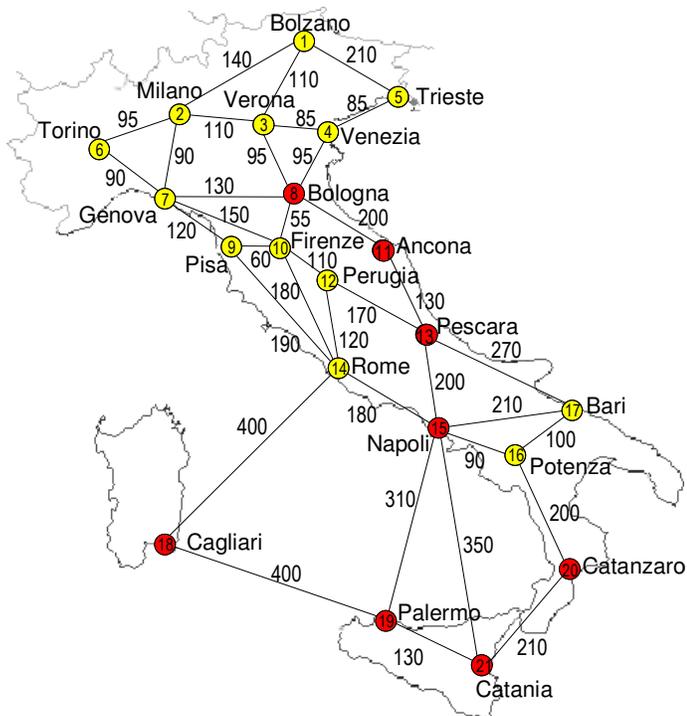


Figura 7.52: Rede nacional italiana [65].

O tráfego gerado é uniforme em todos os nós e as solicitações de conexão são classificadas em 6 classes de banda, com base no padrão SONET, conforme mostra a Tabela 7.1. A agregação de tráfego é realizada com $g = 16$. Utilizamos probabilidade de

geração de taxa de bit baixa maior do que a de taxa de bit alta para simular tráfego semelhante ao real.

Total de 100.000 solicitações de conexão foi gerada nos nós das configurações de rede. O tempo de espera da conexão é distribuído exponencialmente com média 60 segundos. Excedido o tempo de espera, a conexão é desfeita e a banda que foi utilizada em waveband ou λ isolado fica à disposição para atender novas solicitações.

Após uma série de simulações escolhemos limiar, $L = 10^{-6}$. Se o resultado de (6.3) for maior que L o nó será monitorado e banda será liberada para a alocação de mais conexões. À medida que o nó é escolhido pelo processo de monitoramento, 2,5 Gbps de banda são acrescentados aos enlaces que atendem esse nó e, assim, ele é capaz de alocar mais conexões.

A Tabela 7.19 mostra as 13 arquiteturas de rede formadas pelas configurações de nós mostradas na Figura 1.

O grau de conectividade dos nós é uniformemente distribuído com média 3,4. Da intensidade de tráfego da rede italiana, 34% ocorrem em 5 nós, 50% em 10 nós, 73% em 15 nós e 96% em 20 nós.

Tabela 7.19: Arquitetura da rede e recurso dos nós.

Arquitetura de Rede	Número de nós	Recurso do nó	Granularidade (g) ou Multigranularidade (Mg)	Monitora?/ N° de nós
1	1 a 21	OXC	16	Não
2	1 a 21	OXC	16	Sim/5
3	1 a 21	OXC	16	Sim/10
4	1 a 21	OXC	16	Sim/15
5	1 a 21	OXC	16	Sim/20
6	8,11,13,15,18,19,20,21	MG-OXC	4	Não
	Outros nós	OXC	16	
7	8,11,13,15,18,19,20,21	MG-OXC	4	Sim/5
	Outros nós	OXC	16	
8	8,11,13,15,18,19,20,21	MG-OXC	4	Sim/10
	Outros nós	OXC	16	
9	8,11,13,15,18,19,20,21	MG-OXC	4	Sim/15

	Outros nós	OXC	16	
10	8,11,13,15,18, 19,20,21	MG-OXC	4	Sim/20
	Outros nós	OXC	16	
11	8,11,13,15,18,19, 20,21	WC-MG-OXC	4	Não
	Outros nós	OXC	16	
12	8,11,13,18, 19,20,21	WC-MG-OXC	4	Sim/15
	Outros nós	OXC	16	
13	8,11,13,18, 19,20,21	WC-MG-OXC	4	Sim/20
	Outros nós	OXC	16	

A Figura 7.53 mostra os resultados das probabilidades de bloqueio das cinco primeiras configurações, todas com nós OXC.

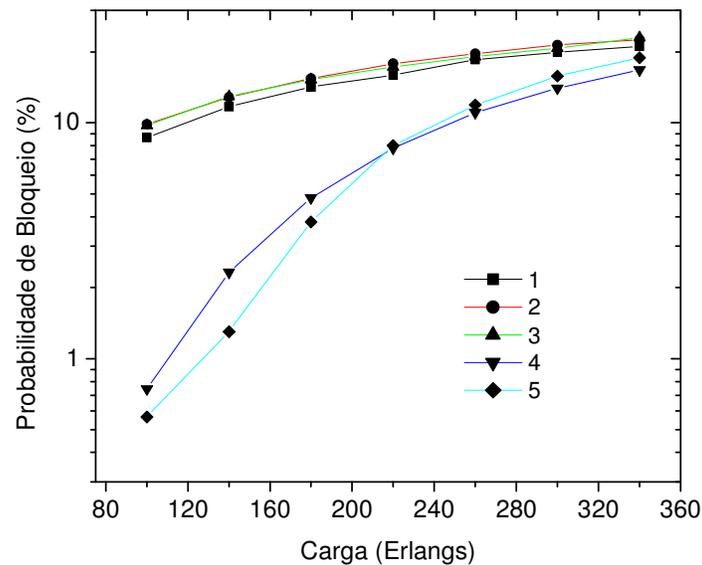


Figura 7.53: Probabilidade de bloqueio para as configurações 1 a 5.

Apesar de monitorar os nós com maior intensidade de tráfego, uma quantidade mínima de nós monitorados é necessária para que se configure um número de enlaces consecutivos. Assim um maior número de conexões pode ser atendido com as bandas aumentadas e a efetiva atuação da liberação de recursos.

Pela Figura 7.54 observamos que a partir de 15 nós monitorados, 73% do tráfego, o número de enlaces com uma seqüência de aumento de banda se torna mais atuante para alocação de mais conexões. Com 5 e 10 nós, 34% e 50% do tráfego, respectivamente, não há enlaces suficientes com aumento de banda para a conseqüente alocação de mais conexões, ou seja, os enlaces dos nós monitorados ficam dispersos, formando uma distribuição desconexa e que não atua de forma positiva no desempenho da rede.

Não há diferença significativa entre o monitoramento com 15 ou 20 nós, pois quando se monitora 15 nós, 73% do tráfego, a maioria dos enlaces contínuos da rede com maior intensidade de tráfego e que atendem esses nós já sofreram o acréscimo de banda e, desta maneira, o acréscimo de mais 5 nós não atua de maneira significante no desempenho da rede.

A Figura 7.55 ilustra a resposta das configurações 1, 2, 3, 4 e 5 para as cargas exibidas na Tabela 7.20 em determinado intervalo de eventos. Observa-se uma diferença significativa de 10 para 15 nós monitorados devido à presença de mais enlaces contínuos para completar as conexões. Com a mudança de 15 para 20 nós não há diferença de desempenho, pois os nós com maior intensidade de tráfego já estão monitorados na configuração 4.

Tabela 7.20: Número de eventos e cargas atribuídas.

Número de Eventos	Carga da Rede (erlangs)
1 a 5000	80
5000 a 15000	120
15000 a 20000	200
20000 a 30000	320
30000 a 50000	500

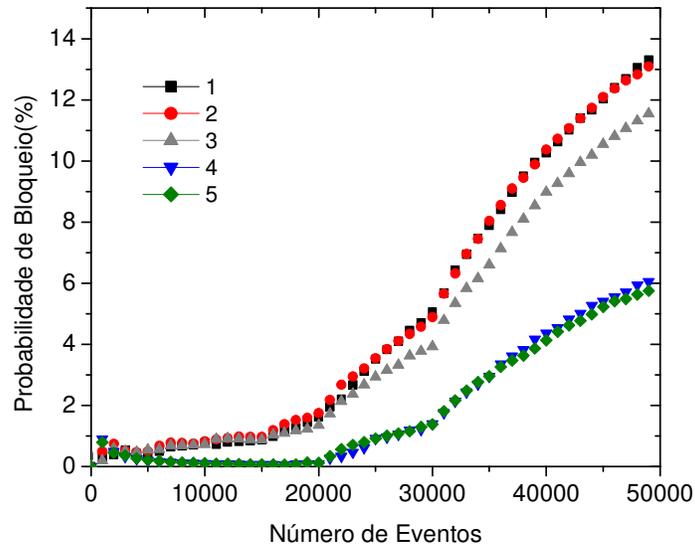


Figura 7.54: Probabilidade de bloqueio ao longo dos eventos da simulação da rede para as configurações 1 a 5.

A Figura 7.55 exibe os resultados da probabilidade de bloqueio para as configurações 6 a 11. As configurações 6 a 10 incluem nós com arquitetura MG-OXC. Na configuração 6 há nós MG-OXC e, desta maneira, a probabilidade de bloqueio aumenta, pois as conexões do tipo waveband só podem ocorrer entre este tipo de nó. As configurações 7 e 8 possuem 5 e 10 nós monitorados, respectivamente, e não apresentam mudanças significativas em desempenho. A atuação do monitoramento dos nós se torna efetiva a partir da configuração 9, com 15 nós monitorados. A configuração 11 ilustra o melhor desempenho por apresentar nós que realizam troca de λ aliada à presença do monitoramento.

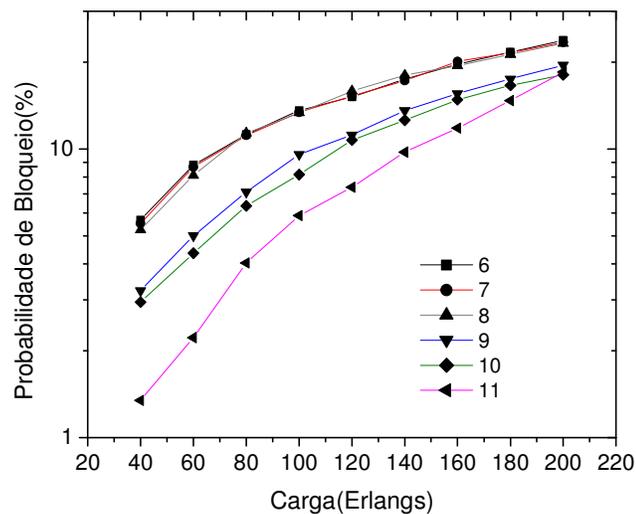


Figura 7.55: Probabilidade de bloqueio ao longo dos eventos da simulação da rede para as configurações 6 a 11.

A Figura 7.56 mostra as duas melhores configurações simuladas com presença de waveband. Nessas configurações foram combinados os efeitos positivos do monitoramento em 15 e 20 nós e a troca de λ . Verificamos que as configurações 12 e 13 são as que apresentam o melhor desempenho da probabilidade de bloqueio entre todas as configurações da rede que utilizam nós MG-OXC, mas para isso os seus nós têm que possuir pelo menos 15 nós monitorados e possuir nós do tipo WC-MG-OXC.

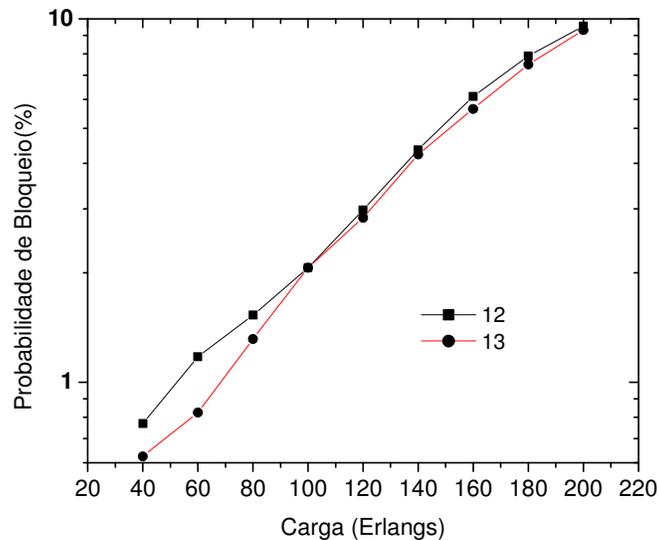


Figura 7.56: Probabilidade de bloqueio ao longo dos eventos da simulação da rede para as configurações 12 e 11.

A vantagem da técnica é o monitoramento em tempo real da rede, utilizando parâmetros para a escolha de nós cujos enlaces demandam mais recursos. Desta maneira, há diminuição da probabilidade de bloqueio.

A técnica de monitoramento foi utilizada em uma rede óptica com nós do tipo OXC, MG-OXC e WC-MG-OXC e se mostrou promissora na melhora do desempenho de uma rede equipada com tipos de nós com essas funções.

As configurações 12 e 13 foram as que apresentaram melhor desempenho na rede, mas também contam com mais recursos uma vez que alguns nós são do tipo WC-MG-OXC e, no mínimo, 15 nós são monitorados pelo esquema de monitoramento.

8- Conclusões

Nesse capítulo são relacionadas as conclusões desse trabalho. É apresentado o problema tratado, a abordagem para a solução, os resultados das simulações computacionais e a proposta para trabalhos futuros.

8.1- Problema

O vertiginoso avanço tecnológico exibido pelo setor de telecomunicações nos últimos tempos tem exigido das redes o aumento, cada vez mais acentuado, das taxas de transmissão. Este aumento é consequência da necessidade das redes suportarem aplicações que exigem elevada largura de banda. Também, o número de usuários tem crescido exponencialmente.

Por outro lado, as recorrentes crises financeiras que têm atingido o nos últimos anos tornam a solução convencional de expansão de recursos físicos arriscada para as operadoras. Assim, para conseguir garantir qualidade de serviço e reduzir custos, o gerenciamento eficaz dos recursos torna-se uma das condições mais importantes para a sobrevivência das operadoras.

Atualmente, as atenções têm se voltado para a arquitetura dos nós e gerenciamento do tráfego, pois a inclusão de dispositivos versáteis de comutação e o uso de algoritmos eficientes de alocação de recursos são soluções primordiais para o atendimento da demanda como largura de banda. A rede óptica deve estar provida de esquemas para gerenciar largura de banda lidando com características como alocação, comutação e troca de comprimentos de onda, agregação de tráfego e comutação waveband.

8.2- Abordagem

A abordagem utilizando comprimento de onda (λ) agregados em wavebands (wb) tem despertado grande interesse, em decorrência da redução da complexidade do nó comutador, de custos de operação da rede e economia no consumo de energia elétrica devido à diminuição do *hardware*.

Neste trabalho, apresentamos nós MG-OXCs capazes de comutar tanto comprimentos de onda como wavebands. Foram propostos nós MG-OXCs de uma e três camadas que incluem as funções de agregação de tráfego e troca de λ . Foram propostas métricas para avaliar o custo dos nós MG-OXCs de uma e três camadas de acordo com a tecnologia de comutação e com os recursos disponíveis em cada nó. Além disso, para melhorar o gerenciamento dos recursos, foi proposto o método do canal específico para a escolha de λ para cada tipo de conexão e um esquema de monitoramento de desempenho baseado na intensidade de tráfego da rede.

Várias arquiteturas de comutadores equipando os nós das redes foram analisadas para determinar a eficiência das técnicas. O objetivo foi fazer o melhor uso da alocação dos recursos disponíveis atendendo as características e restrições de cada configuração e reduzindo o bloqueio das solicitações de conexão.

8.3- Resultados

Neste trabalho, foram utilizadas duas figuras de méritos para avaliar o desempenho das redes de telecomunicações em função da demanda de tráfego oferecido à rede: a probabilidade de bloqueio e os custos das arquiteturas de nós. Os resultados estão apresentados em gráficos e em tabelas, ilustrando as arquiteturas simuladas, os custos e as relações com os benefícios.

8.3.1- MG-OXCs de uma e três camadas

Inicialmente, foram analisados e simulados os nós MG-OXCs de uma camada nos quais o gerenciamento de conexões permite conexões do tipo wb-wb e λ - λ e nós MG-OXCs de três camadas em que são permitidas as conexões wb-wb, λ - λ , wb- λ , λ -wb e λ -wb- λ . Foi feita uma análise em termos de custo benefício desses nós.

Para o cálculo do custo dos nós MG-OXC de uma e de três camadas foram atribuídos pesos diferenciados para as portas de acordo com a tecnologia de comutação e a funcionalidade da porta. Também é computado o volume de utilização das portas e o custo da multiplexação de λ s em wavebands e de wavebands em λ s. No cálculo do benefício foi utilizado o número de chamadas aceitas nas simulações das diferentes arquiteturas de rede. Com esses cálculos determinamos o valor do custo benefício de cada nó em diferentes arquiteturas de rede simuladas.

As configurações em que foram incluídos os recursos de troca de λ s e agregação de tráfego nos nós MG-OXCs de uma camada exibiram desempenho superior ao das configurações sem esses recursos ou ao das configurações equipadas apenas com nós OXCs. Exemplificando, para a carga de 200 erlangs, a configuração 1 (com nós equipados com troca de comprimento de onda e agregação de tráfego) equipada com nós MG-OXC e com recursos de troca de λ e agregação de tráfego apresentou aproximadamente 4% de probabilidade de bloqueio e a configuração 5 (equipada apenas com OXCs e com capacidade de agregação de tráfego), apresentou aproximadamente 9% de probabilidade de bloqueio. Em termos de custo-benefício, a configuração 1 se destaca por ter o melhor benefício e o menor custo.

Para o MG-OXC de três camadas, devido ao seu gerenciamento de conexões, as probabilidades de bloqueio foram menores em relação ao de uma camada. Para uma carga de 200 erlangs, a configuração 1 apresentou uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente 1% enquanto que a configuração 5, equipada com nós OXCs, possui uma probabilidade de bloqueio de 10%. Em função das novas operações realizadas pelos nós MG-OXC de três camadas, o custo das configurações sofreu um aumento que foi diluído devido ao aumento do benefício em termos de chamadas aceitas. Assim, a configuração 1 continuou apresentando uma relação custo-benefício viável e a configuração 5 manteve a mesma relação custo-benefício.

Devido ao seu gerenciamento de conexões, as configurações equipadas com nós MG-OXCs de três camadas apresentaram desempenho médio de aproximadamente 5% melhor do que o das equipadas com nó MG-OXC de uma camada.

Para os nós MG-OXCs de uma camada com diferentes λ s agregados ao waveband, as configurações em que todos os λ s foram reunidos ao waveband apresentaram o pior desempenho devido à restrição das conexões apenas entre wavebands nesses nós. As outras arquiteturas apresentaram desempenho semelhante à ao da configuração com nós OXCs, sendo que a configuração 3 foi a que apresentou desempenho superior entre as que continham MG-OXC em sua composição. Isso ocorreu devido à distribuição mais equilibrada de λ s agregados ao waveband nos nós MG-OXCs. Em relação ao custo-benefício, as configurações 1 e 3 se destacaram em relação às demais devido a sua distribuição mais equilibrada de λ s agregados ao waveband.

Os nós MG-OXCs de três camadas foram capazes de diminuir a probabilidade de bloqueio em relação aos MG-OXCs de uma camada em cerca de 3%. Esse aumento

do benefício diluiu os custos adicionais devido às novas operações, mantendo a relação custo-benefício do MG-OXC de três camadas semelhante ao de uma camada.

Portanto, apesar dos nós MG-OXCs de três camadas serem mais complexos em termos de gerenciamento e de apresentarem custos maiores, seus benefícios em termos de chamadas aceitas diluíram os custos adicionais e tornando seu uso mais vantajoso que o do MG-OXC de uma camada.

8.3.2- Heurística do Canal Específico Para a Escolha do Comprimento de Onda

As análises dos itens 8.3.1 foram feitas utilizando o método first-fit para a escolha do λ com banda utilizada para trafegar as conexões. Entretanto, foram propostas outras técnicas de escolha mais eficientes do que a first-fit para o perfil de tráfego utilizado nas simulações. Assim, foi desenvolvida uma heurística para escolha de λ denominada canal específico.

De acordo com esta técnica, cada taxa de bit simulada dispõe de λ dedicado e os restantes são de redundância, sendo utilizados quando falta banda nos dedicados. Os resultados apresentados mostraram melhor desempenho da técnica em relação às técnicas first-fit e λ menos utilizado. O canal específico apresentou um desempenho de aproximadamente 1% melhor do que o do comprimento de onda menos utilizado e 7,5% melhor do que o do first-fit.

Após a validação da técnica foram incluídos na rede alguns nós MG-OXC de uma camada e foram feitas comparações de diferentes arquiteturas de rede utilizando o first-fit e o canal específico.

O canal específico apresentou desempenho melhor que o first-fit utilizado na simulação inicial e propiciou um ganho de desempenho na rede simulada com MG-OXCs de uma camada. O desempenho das arquiteturas simuladas com o canal específico foi de aproximadamente 7,5% melhor do que o das arquiteturas com o first-fit para uma carga de 200 erlangs.

Portanto, concluímos que o uso eficiente dos recursos que a rede possui pode aumentar o seu desempenho sem a necessidade de equipamentos adicionais.

8.3.3- Restrições da camada física nas simulações dos nós MG-OXCs

Posteriormente, foram adicionadas restrições físicas ao controle e admissão de chamadas. Foram analisados diversos tipos de nós com diferentes tecnologias de comutação, incluindo nós com comutação totalmente óptica, com comutação eletrônica e com comutação híbrida, incluindo wavebands e λ s. O motivo principal dessa análise foi verificar qual o impacto que a técnica waveband tem sobre a degradação do sinal óptico. Verificamos que para uma rede óptica com capacidade de regeneração do sinal óptico em alguns nós, mas com comutação waveband, o bloqueio por BER sofreu aumento. Isso ocorre em função do caminho óptico que transporta o waveband nunca estar sujeito a conversão OEO para ser regenerado. Assim, uma conexão do tipo wb-wb se inicia, é transportada e comutada no domínio óptico até alcançar o seu destino.

Outra conclusão interessante é que utilizando nós MG-OXCs, a técnica waveband agregou mais conexões do que uma rede totalmente óptica sem waveband. Se em uma conexão wb-wb houver 4 λ s de 10 Gbps agregados em um waveband e o total de banda disponível é 40 Gbps para receber as conexões que só são comutadas através do caminho waveband quando o waveband atinge a sua máxima granularidade, ou seja 40 Gb/s. Por sua vez, um λ de 10 Gbps pode ter toda sua banda ocupada por uma conexão de 155 Mbps porque o nó não dispõe de capacidade de agregação de tráfego.

8.3.4- Esquema de Monitoramento de Desempenho Baseado no Intensidade de Tráfego

Por fim, foi proposto um sistema de monitoramento de nós baseado na intensidade de tráfego da rede. Esse sistema monitora o tráfego que passa através dos nós durante a simulação (ou operação) da rede e verifica se esses nós estão sobrecarregados de conexões. Caso eles estejam sobrecarregados, recursos são liberados para que eles possam alocar mais conexões.

Nesse trabalho, o recurso escolhido para ser liberado foi a largura de banda. Assim, quando se detecta, por meio da comparação da média das diferenças com um limiar preestabelecido, que esse nó está congestionado, mais largura de banda é

fornecida aos enlaces que atendem esse nó congestionado e, assim, a rede aloca mais conexões.

Para validar o método simulamos uma rede sem escala. Para redes com essas características a diferença da probabilidade de bloqueio entre a arquitetura sem monitoramento e a arquitetura com todos os nós monitorados alcançou aproximadamente 57% para a carga de 350 erlangs.

Validado o método, simulamos 13 configurações de rede diferentes com a inclusão de nós MG-OXCs de uma camada. O desempenho das configurações com nós MG-OXCs, mas com o sistema de monitoramento ativo, foi superior ao das redes equipadas com nós MG-OXCs, mas sem o sistema de monitoramento em aproximadamente 5% para uma carga de 200 erlangs.

8.4 Propostas para Trabalhos Futuros

Os seguintes assuntos podem ser abordados no futuro:

1. Estudar a viabilidade da implementação de um preditor para detectar variações bruscas de aumento de tráfego em uma rede para não permitir que a probabilidade de bloqueio ultrapasse um limiar preestabelecido por meio da liberação de recursos disponíveis pela rede;
2. Estudar uma métrica de roteamento que possibilite a inclusão de sistemas eficientes de proteção e restauração na rede;
3. Estudar técnicas para integrar a agregação waveband, agregação de tráfego e troca de λ com uma técnica de imparcialidade na distribuição de solicitação de conexão visando garantir uma homogeneidade na distribuição de chamadas;
4. Estudar uma abordagem mais criteriosa da camada física que leve em consideração efeitos não lineares e a PMD dos enlaces ópticos.

9-Referências

- [1] Ericsson AB Public, dezembro de 2008 “100 Gb Ethernet transport: preparing the highway for high bandwidth services”. Disponível em: www.ericsson.com/100gb-ethernet-transport-high-bandwidth-services-white-paper.pdf (Acessado em junho de 2009).
- [2] M. Scheutzom, M.Maier, M. Reisslein, and A.Wolisz, “Wavelength reuse for efficient packet-switched transport in an AWG-based metro WDM network”. *Journal of Lightwave Technology*, vol.21, n.6, pp.1435-1455, junho 2003.
- [3] R.E. Wagner, L.Nederlof, M Vaughn, S.De Maesschalck, D.Cotter, and B.Hemenway, “Interconnection of metropolitan and backbone networks”. Em *Proc. Optical Fiber Communication (OFC) 2003*, vol.2, pp.479-481, abril 2003.
- [4] R. Parthiban, R.S.Tucker, “Waveband grooming and IP aggregation in optical networks”. *Journal of Lightwave Technology*, vol.21, n.11, pp.2476-2488, novembro 2003.
- [5] A. Jajszczyk, “Automatically Switched Optical Networks: Benefits and Requeriments”. Em *IEEE Communications Magazine*, vol.43, n.2, pp.S10-S15, fevereiro de 2005.
- [6] P.B.Chu,S.S.Lee, and S.Park, “Overview of high capacity optical cross-conect”. *LEOS*,vol.1, pp. 80-87, março 2002.
- [7] A.Richter, W.Fischler, A.Buchwieser, T.Buchberger, B.Stilling, and B.Lankl, “Field trial of an ASON in the metropolitan area”. Em *Proc.Optical Fiber Communication (OFC) 2002*, pp.43-45, março 2002.
- [8] L.Raptis,G.Chatzilias,A.Manzalini,C.Cavazzoni,G.Ricucci,G.Lehr,U.Hartmer,R.Gerdsen,M.Jaeger,A.Gladisch,D.Colle,S.De Maesschalk,I Lievens, P.Demeester and L.Piergiovanni,”Design and experiments of an automatic switched optical network (ASON)”. Em *Proc.ECOC 2001*, vol.3, pp. 256-257, outubro de 2001.
- [9] J.Robadey,C.Mas,E.Zoganeli and D.Rodellar, “Implementing ASON:Interest and critical issues for the operator”. *EURESCOM Project Report*, 2001.

- [10] J.S.Vardakas, V.G.Vassilakis and M.D. Logothethis, "Calculating Blocking Probabilities in Single Hop WDM Traffic Groomed Optical Networks". ICTON, vol.4, pp.109-112, julho 2007.
- [11] G.Zrvas, R.Nejabati, D.Simeonidou, A.Tzanakaki, S. Azodolmolky and I. Tomkos, "A Hybrid Optical Burst/Circuit Switched Ingress Edge Router for Grid-enabled Optical Networks". BROADNETS, pp.1-11, outubro 2006.
- [12] E.Iannone, R.Sabella, S.Binetti, "Granularity in All-Optical WDM Networks". Journal of Lightwave Technology, vol.16, n.12, dezembro 2009.
- [13] N.S.C.Correia, J.Coimbra e M.C.R.Medeiros, "Sparse traffic grooming in WDM networks using coarse granularity OXCs". Photonic Network Communications, vol.17, n.1, pp. 49-62, fevereiro 2009.
- [14] N.Bouabdallah, G.Pujolle, "A Practical Traffic Grooming Scheme in All Optical-Networks". OFC, pp. 1-3, junho 2003.
- [15] N Beheshti, Y.Ganjali, R. Rajaduray, D.Blumenthal and N.McKeown, "Buffer Size in All Optical Networks". OFC, pp.1-3, março 2006.
- [16] M. Enachescu, Y. Ganjali, A. Goel, N. McKeown, and T. Roughgarden, "Part III: Routers with very small buffers". ACM/SIGCOMM Computer Communication Review, vol.35, n.3, pp. 83-90, julho 2005 .
- [17] Ye. Yabin, H. Woesner, I. Chlamtac, "Traffic Grooming Techniques in Optical Networks". BROADNETS, pp.1-9, outubro 2006.
- [18] H. Tsushima, "Development of optical-path cross-connect systems to create scalable and reliable optical networks". LEOS, vol.2, pp.707-708, novembro 2004.
- [19] X. Cao, Y. Xiong, V. Anand, e C. Qiao, "Wavelength band switching in multi-granular all-optical networks". Proc. Spie, vol. 4874, pp. 198-210, julho 2002.
- [20] P. H. Ho e H. T. Mouftah, "Routing and wavelength assignment with multi-granularity traffic in optical networks". J.Lightwave Technol., vol. 20, n. 8, pp. 1292–1303, agosto 2002.

- [21] M.Li e B.Ramamurthy, "Autonomous clustering-based heterogeneous waveband switching in WDM networks". ICC, vol. 6, pp. 2587-2592, junho 2006.
- [22] L. Noirie, C. Blaizot e E. Dotaro, "Multi-granularity optical crossconnect". Proc. European Conf. Optical Communications (ECOC), Munich, Alemanha, setembro 2000, artigo 9.2.4.
- [23] A.R.B.Billah, B.Wang e A.A.S.Awwal, "Effective traffic grooming in WDM networks". Globecom, vol. 3, pp. 2726-2730, novembro 2002.
- [24] P.B.CHU, S.S LEE e S. PARK, "MEMS:The path to large Optical Crossconnects". IEEE Communications Magazine, vol.40, n.3, pp.80-87, março 2002.
- [25] H.Zang, J.P.Zue e B.Mukherjee, "Review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks". Optical Network Magazine, vol.1, n.1, pp-47-60, agosto 2000.
- [26] X. Cao, V. Anand, Y. Xiong, e C. Qiao, "A study of waveband switching with multi-layer multi-granular optical cross-connects". IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, n. 7, pp. 1081-1095, setembro 2003.
- [27] S.Yao e B.Mukherjee, "Design of hybrid waveband-switched networks with OEO traffic grooming". Em Proc OFC, vol.1, pp.357-358, março 2003.
- [28] X. Cao, Y. Xiong, V. Anand, e C. Qiao, "Wavelength band switching in multi-granular all-optical networks". Em Proc. SPIE OptiComm, Boston, MA, vol. 4874, pp. 198-210, julho 2002.
- [29] M.Li e B.Ramamurthy, "A graph model for dynamic waveband switching in WDM mesh networks". ICC, vol.3, pp.1821-1825, junho 2004.
- [30] A.Kolarov e B.Sengupta, "A study of waveband routing and wavelength assignment in multi-granular hybrid optical networks". ICC, vol.1, pp-239-243, maio 2005.
- [31] M.Li, W.Yao e B.Ramamurthy, "Same-destination-intermediate grouping vs. end-to-end grouping for waveband switching in WDM mesh networks". Em Proc. IEEE ICC, pp.1807-1812, maio 2005.

- [32] R.Izmailov, S.Ganguly, V.Kleptsyn e A.Varsou, "Non-uniform waveband hierarchy in hybrid optical networks". Em Proc. IEEE Infocom, vol.II, pp.1344-1354, março 2003.
- [33] P. Bullock, C. Ward, e Q. Wang, "Optimizing wavelength grouping granularity for optical add-drop network architectures". Em Proc. OFC, vol.1, pp. 355-357, março 2003.
- [34] M. Li e B. Ramamurthy, "Dynamic waveband switching in WDM mesh networks based on a generic auxiliary graph model". IEEE International Conference on Communications, vol. 3, pp.1821-1825, junho 2004.
- [35] X.Cao, V.Anand e C.Quiao, "Waveband switching in optical networks". IEEE Commun. Mag. ,vol.41, n.4, pp.105-112, abril 2003.
- [36] K. Zhu, H. Zang, e B. Mukherjee, "A comprehensive study on next generation optical grooming switches". IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, n. 7, pp. 1173-1186, setembro 2003.
- [37] M. Lee, J. Yu, Y. Kim, C. Kang, e J. Park, "Design of hierarchical crossconnect WDM networks employing a two-stage multiplexing scheme of waveband and wavelength". IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 20, n. 1, pp. 166-171, janeiro 2002.
- [38] G. Huiban, S. Perennes, e M. Syska, "Traffic grooming in WDM networks with multi-layer switches". IEEE ICC, vol.5, pp.2896-2901, outubro 2002.
- [39] M.Li e B.Ramamurthy, "Survivable waveband switching in WDM mesh networks under dedicated path protection". Globecom, vol.4, pp.1878-1882, dezembro 2005.
- [40] R. Douville, "Extensions to generalized MPLS in support of waveband switching", Draft-Douville-Ccamp-GMPLS-Waveband-Extensions- 03.txt, fevereiro 2003.
- [41] E. Dotaro, "Optical multi-granularity architectural framework," Draft-Dotaro-IPO-Multi-Granularity-02.txt, agosto 2002.
- [42] L.Paraschis, G.Nicholl, M.Nowell e L.McAdams, "Very short reach (VSR) parallel optics OC-192/STM-64 interface, optimized for network intra-PoP interconnections". OFC, vol.3, pp.1-3, 2001.

- [43] O.Gerstel, "Optical networking: a practical perspective (tutorial)". IEEE Hot Interconnects, agosto 2000.
- [44] X.Quin, Y.Yang, "Optical crossconnect architectures for wavelength-routed WDM networks". Optical Network Magazine, vol.4, n.4, pp.50-63, julho 2003.
- [45] B. Mukherjee, "Optical WDM Networks". McGraw-Hill: New York, pp.973, 2006.
- [46] R.Parthiban, "Modeling and analysis of optical backbone networks". Tese de doutorado, Universidade de Melbourne Austrália, 325p, abril 2004.
- [47] R.Parthiban e R.S.Tucker, "Waveband grooming and IP aggregation in optical networks". JLT, vol.21, n.11, pp.2476-2488, novembro 2003.
- [48] M. Li e B. Ramamurthy, "Heterogeneous waveband switching in wavelength division multiplexed networks based on autonomus clustering architecture (Invited)". Journal of Optical Networking, v.5, n.9, pp.667-679, setembro 2006.
- [49] Y.Suemura, I.Nishioka, Y.Maeno, S.Araki, R.Izmailov e S.Ganguly, "Hierarchical routing in layered ring and mesh optical networks". ICC, vol. 5, pp. 2727 –2733, agosto 2002.
- [50] S.Melle, J.Ruhmann, "Large-scale photonic circuits become practical reality". Photonik International, pp.6-9, maio 2006.
- [51] G.A.Martins, "Estatística Geral Aplicada". Atlas, pp.420, 2001.
- [52] J.Banks, S.J.Carson, L.B.Nelson, "Discrete-Event System Simulation" 2^a ed. Prentice Hall, 1995.
- [53] I. Chlamtac, A. Farago, T. Zhang, "Lightpath (wavelength) routing in large WDM networks". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14, n. 5, pp. 909–913, junho 1996.
- [54] J. Strand, A. L. Chiu, R. Tkach, "Issues for routing in the optical layer". IEEE Communications Magazine, vol. 39, n. 2, pp. 89–97, fevereiro 2001.

- [55] J. Strand, A. Chiu, "Impairments and other constraints on optical layer routing". IETF Draft, draft-ietf-ipo-impairments-05.txt, maio 2003.
- [56] C. A. Brackett, et al., "A scalable multiwavelength multihop optical network: A proposal for research on all-optical networks". IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 11, n. 5, pp. 736–753, maio/junho 1993.
- [57] B. Ramamurthy et al., "Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks". Optical Fiber Communication Conference (OFC 1999) Technical Digest, (Washington DC, USA), vol. 1, pp. 59–61, março 1999.
- [58] X. Zhou, C. Lu, P. Shum, and T. H. Cheng, "A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier". IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, n. 9, pp. 945–947, setembro 2001.
- [59] Y. Huang, J. P. Heritage, e B. Mukherjee, "Connetion Provisioning with transmission impairment consideration in optical WDM networks with high speed channels ". IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 23, n.3, pp.982-993, março 2005.
- [60] R. Ramaswami and K. Sivarajan, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks,". IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 3, pp. 489–500, junho. 1995.
- [61] R. Mewanou. "Heuristic Algorithms for Dynamic Optical Routing". Workshop on Optimization of Optical Networks, março 2004.
- [62] H. Zmg, J. P. he, and B. Mukherjee. "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks". SPIWBallzer Optical Networks Magazine (ONM), vol. I, n.I, janeiro 2000.
- [63] Xiao Fan Wang, and Guanrong Chen, "Complex Networks: Small Word, Scale-Free and Beyond," IEEE Circuits and System Magazine, vol.3, pp 6-20, 2003.
- [64] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11947>.
- [65] M.Ali, D.E.D Cosaqui, L.Ttancevski, "Network optimization with transmission impairments-based routing". ECOC 01 Amsterdam, pp.1-3 (CD-ROM), 2001.

- [66] E.J.Aloia, “Contribuições para a análise e simulação de redes ópticas”, tese de doutorado 173p, fevereiro 2009.
- [67] G.J.Ockenfuss, N.A.OBrien, and E.Williams, “Ultra-Low stress coating process: an enabling technology for extreme performance thin film interference filters”. Em Optical Fiber Communication Conference, vol.70, pp.FA8-1-FA8-3, março 2002.
- [68] C.X.Yu, D.T.Neilson,C.R.Doerr, and M.Zirngibl, “Dispersion-free De(Mux) with record figure of merit,” IEEE Photon. Technol. Lett.,vol.14, n.9, pp.1300-1302, setembro 2002.
- [69] Y.P.Li, C.H.Henry, E.J.Laskowski, H.H.Yaffe,and R.L.Sweatt, “Monolithic optical waveguide 1.31/1.55 μm WDM with -50dB crosstalk over 100nm bandwidth”. Electron. Lett, vol.31, n.24, pp.2100-2101, novembro 1995.
- [70] R. Inoue, M.Oguma, T.Kitoh, M.Ishii,T.Shibata, and Y.Hibino, “Low-crosstalk 4-channel coarse WDM filter using silica-based planar lightwave circuit,” in Optical Fiber Communication Conference, vol.70, pp.75-76, março 2002.
- [71] C.R.Doerr, R.Pafchek, and L.W.Stulz, “Integrated band demultiplexer using waveguide grating routers”. IEEE Photon.Technol.Lett, vol.15, n.8, pp.1088-1090, agosto 2003.
- [72] R. Izmailov, S. Ganguly,V. Kleptsyn, and A.C.Varsou “Non-Uniform Waveband Hierarchy in Hybrid Optical Networks ”. IEEE INFOCOM, vol.2, pp.1344-1354, abril 2003.
- [73] Y.Tze-Wei, K.L.Eddie, A.Goldenberg, “Mems Optical Switches”. IEEE Communications Magazine, vol.39, n.11, pp.158-163, novembro 2001.
- [74] P.B.Chu, S.S.Lee, S.Park, “MEMS: The path to large Optical Crossconnects”. IEEE Communications Magazine, vol.40, n.3, pp.80-87, março 2002.
- [75] G. P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”. 3rd ed. New York: Wiley Interscience, 2002.

- [76] H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarijaona, "Pump interactions in a 100 nm bandwidth Raman amplifier". *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, n. 5, pp. 530–532, maio 1999.
- [77] A. R. Chraplyvy, "Optical power limits in multichannel wavelength-division-multiplexed systems due to stimulated Raman scattering". *Electron. Lett.*, vol. 20, pp. 58–59, 1984.
- [78] D. Dahan and G. Eisenstein, "Numerical comparison between distributed and discrete amplification in a point-to-point 40 Gb/s 40-WDM-based transmission system with three different modulation forms". *J. Lightw. Technol.*, vol. 20, n. 3, pp. 379–388, março 2002.
- [79] X. Zhou, C. Lu, P. Shum, and T. H. Cheng, "A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier". *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, n. 9, pp. 945–947, setembro 2001.
- [80] C. R. S. Fludger and R. J. Mears, "Electrical measurements of multipath interference in distributed Raman amplifiers". *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, n. 4, pp. 536–545, abril. 2001.
- [81] L. Helczynski and A. Berntson, "Comparison of EDFA and bidirectionally pumped Raman amplifier in a 40 Gb/s RZ transmission system". *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, n. 7, pp. 669–761, julho. 2002.
- [82] P. B. Hansen *et al.*, "Rayleigh scattering limitation in distributed Raman pre-amplifiers". *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, n. 1, pp. 159–161, janeiro 1999.

I.Apêndice- Geração dos Eventos, Matriz de Enlace e Cálculo da Probabilidade de Bloqueio

I.1 – Geração dos Eventos de Alocação e Desalocação [66]

A Tabela I.1 apresenta a técnica de simulação por evento discreto para cinco conexões.

Tabela I.1: Técnica de simulação por evento discreto.

ID Evento	Tempo Exponencial	Tempo de Duração	Tempo do Evento	Tipo do Evento	Conexão
1	0,412513	120,187497	0,412513	Alocação	1
2			120,60001	Desalocação	1
3	3,19333	3,703988	3,60584	Alocação	2
4			7,309828	Desalocação	2
5	0,88908	43,456578	4,49492	Alocação	3
6			47,851498	Desalocação	3
7	1,77229	67,427391	6,26721	Alocação	4
8			73,694601	Desalocação	4
9	1,31232	35,611037	7,57953	Alocação	5
10			43,190567	Desalocação	5

As solicitações de conexões são divididas em eventos, para cada uma há um evento de Alocação e Desalocação apresentados na Tabela I.1, na coluna denominada Tipo de Evento. O Tempo Exponencial é calculado pela Equação I.1, utilizando a carga da rede em erlangs e um número aleatoriamente gerado. O Tempo de Duração de uma conexão é calculado pela Equação I.2. Convém ressaltar que o cálculo do Tempo Exponencial e o Tempo de Duração para cada conexão possui uma variável aleatória na geração de ambos. Esta variável assume valores no intervalo de $0 < \text{variável aleatória} \leq 1$.

$$\text{Tempo Exponencial} = \frac{-\ln(\text{Número aleatório})}{\text{Carga em erlang}/60} \quad (\text{I. 1})$$

$$\text{Duração} = -\ln(\text{Número aleatório}) * 60 \quad (\text{I. 2})$$

Quando a solicitação para a primeira conexão chega é criado o evento de alocação número 1, a variável *Tempo do sistema* que estava zerada armazena o tempo exponencial de 0,412513 segundos. A variável *Tempo de Duração* armazena o tempo de duração para esta conexão de 120,187497. Assim o evento 1(alocação) ocorrerá no tempo de 0,412513s e o evento 2 (desalocação) ocorrerá no tempo 120,60001s

(0,4125132 + 120,187497). Para a conexão 2 com tempo exponencial de 3,19333s, a variável *Tempo do sistema* apresenta o valor de 3,60584s (0,4125132 + 3,19333), logo o evento 3 (alocação) ocorrerá neste tempo. A variável *Tempo de Duração* armazena o valor de 3,703988s, sendo o evento 4 (desalocação) designado para ocorrer no tempo 7,309828s (3,60584 + 3,703988). A terceira conexão apresenta um tempo exponencial de 0,88908, a variável *Tempo do sistema* armazena o valor de 4,49492s (3,60584 + 0,88908), portanto o evento 5 (alocação) ocorrerá neste tempo. A variável *Tempo de Duração* armazena o valor de 43,456578s, logo o evento 6 (desalocação) ocorrerá no tempo 47,951498s (4,49492 + 43,456578). Para a quarta conexão o tempo exponencial é de 1,77229s e a variável *Tempo do sistema* armazena o valor de 6,26721s (4,49492 + 1,77229), logo o evento 7 (alocação) ocorrerá neste tempo. A variável *Tempo de Duração* armazena o valor de 67,427391s, sendo o evento 8 (desalocação) designado para ocorrer no tempo 73,694601s (6,26721 + 67,427391). Para a conexão 5 o tempo exponencial é de 1,31232s, a variável *Tempo do sistema* apresenta o valor de 7,57953s (6,26721 + 1,31232), logo o evento 9 (alocação) ocorrerá neste tempo. A variável *Tempo de Duração* armazena o valor de 35,611037s, sendo o evento 10 (desalocação) designado para ocorrer no tempo 43,190567 (7,57953 + 35,611037).

Após a construção da Tabela I.1 a coluna *Tempo do Evento* é classificada na ordem do menor tempo para o maior, como resultado temos a Tabela I.2.

Tabela I.2: Técnica de simulação por evento discreto após a classificação.

ID Evento	Tempo do Evento	Tipo do Evento	Conexão
1	0,412513	ALOCAÇÃO	1
3	3,60584	ALOCAÇÃO	2
5	4,49492	ALOCAÇÃO	3
7	6,26721	ALOCAÇÃO	4
4	7,309828	DESALOCAÇÃO	2
9	7,57953	ALOCAÇÃO	5
10	43,190567	DESALOCAÇÃO	5
6	47,951498	DESALOCAÇÃO	3
8	73,694601	DESALOCAÇÃO	4
2	120,60001	DESALOCAÇÃO	1

I.2 – Formação da Matriz de Enlaces

Supondo uma rede com 5 nós e λ comprimentos de onda ilustrada pela Figura I.1, cada λ será representado pela matriz de conexões da rede formando a matriz banda. Se houver λ s comprimentos de onda teremos λ s matrizes de banda.

Uma conexão que ocorre do nó 4 para o nó 2 tem sua disponibilidade de largura de banda checada na posição $j=4$ e $k=5$ para o primeiro enlace e depois $j=5$ e $k=2$ para o segundo enlace dos λ s das matrizes banda. Se houver largura de banda disponível em alguma matriz banda então a conexão é alocada no enlace. Assim ocorre para todos os enlaces que estão ligados ao nó 4 e 5. Após checar todas as matrizes banda o algoritmo monta a matriz de enlaces e repassa ao Dijkstra [45], que encontra o menor caminho entre os nós iniciais e finais da conexão.

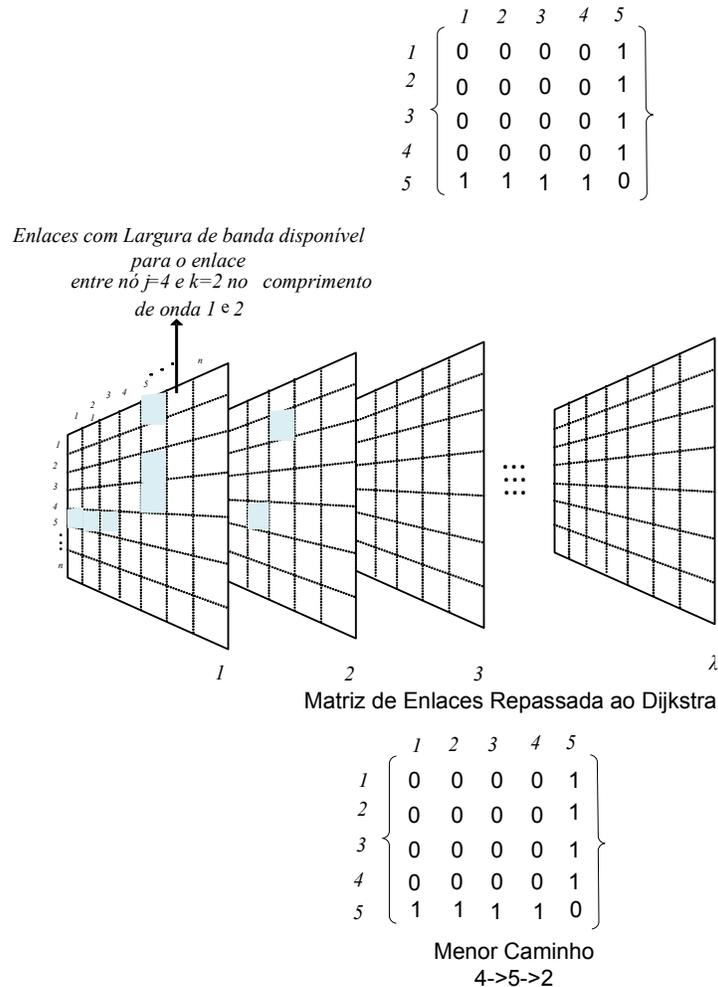


Figura I.1: Formação da matriz de enlaces a partir das matrizes banda para uma conexão entre o nó inicial 4 e o nó final 2.

I.3 – Cálculo da Probabilidade de Bloqueio

A probabilidade de bloqueio global da rede é calculada da seguinte forma:

$$P_b = \frac{\sum \text{total de conexões alocadas}}{\text{Total de Conexões Geradas}} \quad (\text{I.3})$$

A probabilidade de bloqueio por classes é calculada da seguinte forma:

$$P_b = \frac{\sum \text{total de conexões alocadas da classe } n}{\text{Total de Conexões Geradas da classe } n} \quad (\text{I.4})$$

II. Apêndice - Dispositivos para implementação da técnica waveband

Descrevemos três formas de implementação da técnica: filtros de interferência de filmes finos [67], no qual camadas de óxidos com espessura $\lambda/2$ são usados para filtrar a banda dos λ s, como mostrado na Figura II.1; uso de elementos difrativos, Figura II.2, que fazem a separação angular dos λ s, enquanto lentes e prismas permitem acoplar a luz dentro das fibras (BGT-bulk grating technology) [68]; AWG (arrayed waveguide grating) [69], em que acopladores em estrela unidos por uma matriz de guias de onda de distintas curvaturas fabricados sobre um mesmo substrato (SiO_2/Si , $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ e $\text{InGaAlAs}/\text{InP}$) multiplexam λ s de uma porta de entrada para uma porta de saída como mostrado na Figura II.3. A matriz de guias de onda pode ser implementada usando a tecnologia de circuitos planares (PLCs) [70]-[71].

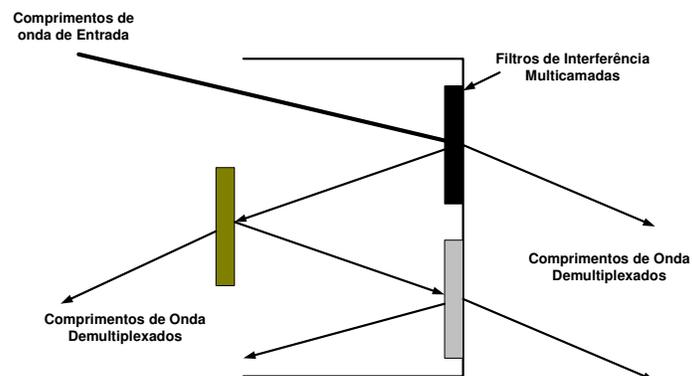


Figura II.1: Filtros de interferência de filmes finos.

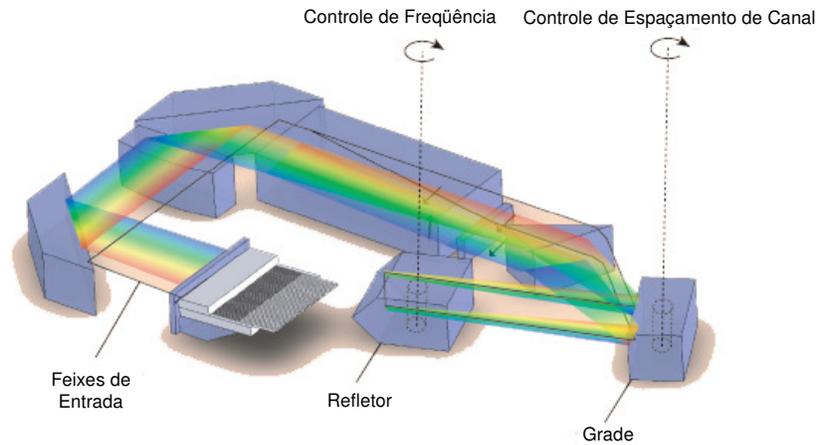


Figura II.2: Esquema de um multiplexador/demultiplexador waveband feito com a técnica BGT. A rotação da grade controla o espaçamento do canal enquanto a rotação do refletor faz a seleção do λ .

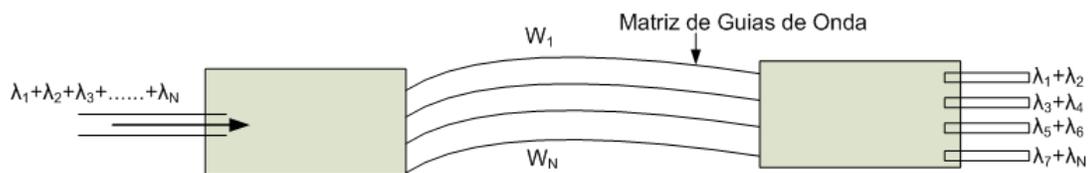


Figura II.3: AWG com multiplexadores e demultiplexadores com grande número de canais separados por poucos nanômetros.

Outra técnica utilizada para filtros de banda é o filtro de três portas [72], que permite que alguns λ s passem e reflète os restantes. O filtro de três portas é mostrado na Figura II.4. O componente consiste de três fibras ópticas, lentes graduais (*grin lenses*) que tem forma cilíndrica e possuem um perfil de índice de refração que diminui gradualmente a partir do eixo do cilindro e um filtro de interferência de filme fino. A Figura II.4 mostra a separação das bandas dos λ s, na qual uma banda de três λ s passa pelo filtro até a fibra de saída 1 e reflète todos os outros para a fibra de saída 2.

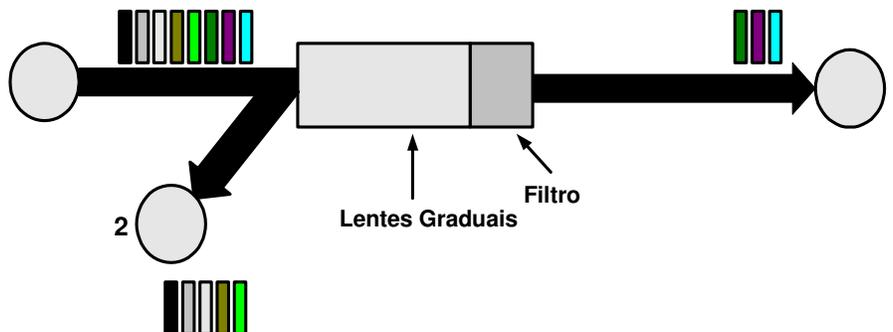


Figura II.4: Filtro de três portas.

Um sistema de comutação de *wavebands* de alta capacidade pode ser fabricado com base em centenas de espelhos finos móveis, chamados de micro espelhos elétricos mecânicos (MEMS) [73]. Nestes sistemas, micro espelhos refletem o sinal de entrada para uma porta de saída, sendo a força de atuação requerida para mover tal dispositivo originada em forças eletrostáticas ou magnéticas. Os MEMS utilizam os processos de fabricação que são largamente usados na indústria de circuitos integrados, tornando o seu custo de fabricação baixo. A arquitetura dominante de comutadores ópticos baseados em MEMS é a matriz de espelhos de duas dimensões (2-D) (Figura II.5) e a matriz de espelhos de três dimensões (3-D) (Figura II.6) [74].

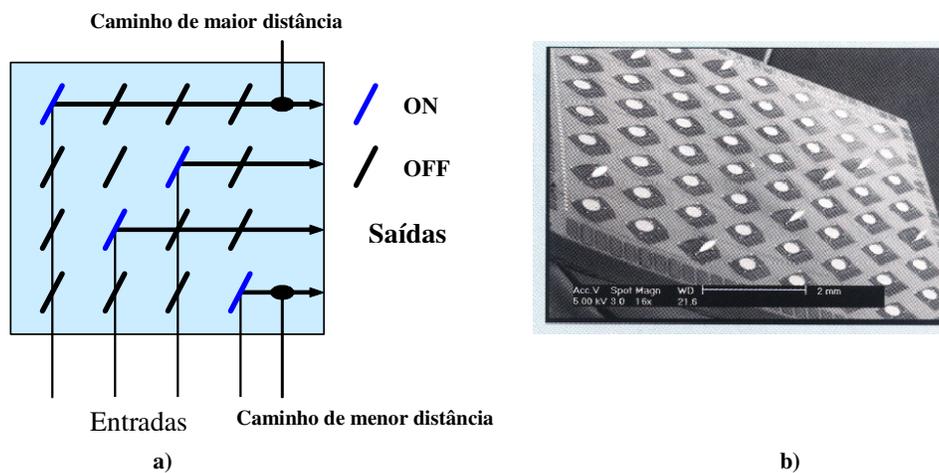


Figura II.5 : a) Ilustração esquemática de arquitetura 2D; b) arquitetura 2D NxN fabricada pela AT&T.

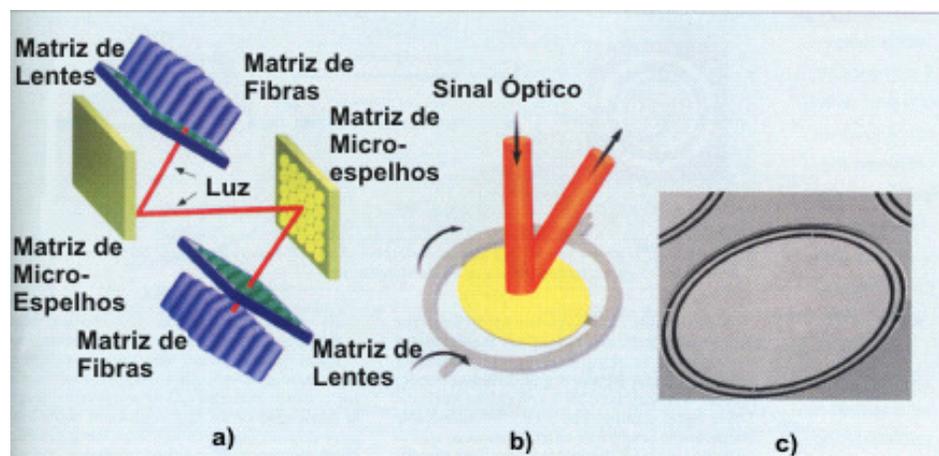


Figura II.6: a) Ilustração de uma arquitetura 3D – 2N; b) Ilustração da reflexão de um feixe de luz usando-se um micro espelho com dois eixos de liberdade; c) Protótipo de um micro espelho.

III. Apêndice- Formulação Utilizada no Cálculo das Características Físicas dos Amplificadores Raman

Este apêndice apresenta resumo de amplificadores Raman com cálculo de ganho, potência de ruído ASE e interferência multicaminhos.

III.1. Ganho e Ruído ASE dos Amplificadores Raman Distribuídos

Um amplificador óptico baseado na tecnologia Raman utiliza propriedade intrínseca da sílica. Essa propriedade é o espalhamento Raman estimulado (SRS) [75]. Quando uma fibra é utilizada tanto para transmissão de sinal quanto para a amplificação essa técnica é chamada de amplificação Raman distribuída (DRA).

Os amplificadores Raman foram investigados teórica e experimentalmente em [76] e [77]. Em projeto de um amplificador Raman são considerados: ruído ASE, espalhamento Rayleigh, interação entre os sinais de bombeio e os sinais que trafegam pelas fibras (interação bombeio-bombeio, bombeio-sinal e sinal-sinal) e saturação do sinal de bombeio. Um modelo matemático para simular as propriedades físicas foi desenvolvido em [77]. Alguns modelos simplificados podem aproximar o comportamento do amplificador, como perda e ruído ASE [78], [79] interferência multicaminhos [80], [81] e um SRS e sua dependência em relação à temperatura [81].

Os fatores mais importantes que limitam o desempenho de um amplificador Raman distribuído (DRA) são o espalhamento Rayleigh e o ruído ASE [75], [80], [82]. Para simplificar o projeto do algoritmo, os efeitos ASE e o espalhamento Rayleigh duplo (interferência multicaminhos) no modelo de amplificador Raman distribuído foram incluídos do mesmo modo que em [79] e [80].

O modelo do DRA considera: 1) a perda na fibra para todos os sinais de bombeio são idênticas; 2) a perda de energia quando um fóton de alta frequência se transforma em um fóton de baixa frequência é desprezada; 3) o ganho e o ruído para cada λ são independentes do número de λ s utilizados na fibra; 4) a diminuição do sinal de bombeio causada pelo acoplamento entre o sinal que propaga na fibra e o sinal de bombeio é desconsiderado.

Portanto, a energia de bombeio fornecida para a amplificação do sinal diminui à medida que a potência do sinal aumenta. O ganho do sinal é definido por:

$$g(w) = g_r(w) \left(\frac{P_{pump}}{a_{pump}} \right) \quad (1)$$

na qual g é o ganho óptico, g_r é coeficiente de ganho Raman e a_{pump} é a área ocupada pelo sinal de bombeio dentro da fibra. A potência de bombeio precisa ser muito maior que a potência do sinal que propaga em um λ da fibra para que o amplificador Raman opere em regime de não-saturação [75].

III.2. Ganho e Ruído ASE de um DRA [80]

A potência de bombeio ao longo do eixo z da fibra, $Pu(z)$ é definida por

$$\frac{dP_k(z)}{dz} = \alpha_p P_k(z) - \beta P_k(z) \sum_{i=1}^M (\zeta_i - \zeta_k) P_i \quad (2)$$

na qual $\beta = \frac{g_{ki}}{K_{eff} A_{eff} (\zeta_i - \zeta_k)}$; α_p e A_{eff} , são a perda na fibra e área efetiva, respectivamente. K_{eff} é o fator de polarização que varia entre 1 e 2; ζ_i e ζ_k são as frequências do sinal de bombeio i e k , respectivamente, e M é o número de fontes ópticas de bombeio.

Integrando (2) com relação a z ,

$$P_k(z) = P_k(L) \exp \left\{ \alpha_p (z-L) + \beta \zeta_k \int_L^z \left[\sum_{i=1}^M P_i(z) \right] dz - \beta \int_L^z \left[\sum_{i=1}^M \zeta_i P_i(z) \right] dz \right\}. \quad (3)$$

Considerando que $\sum_{i=1}^M P_i(z) = P_L \exp\{\alpha_p (z-L)\}$, na qual P_L é a potência total na fibra em $z = L$,

$$P_k(z) = \frac{P_k(L) P_L \exp\{\alpha_p (z-L) + \beta \zeta_k P_L L_e(z)\}}{\sum_{i=1}^M P_i(L) \exp\{\beta \zeta_i P_L L_e(z)\}} \quad (4)$$

na qual $L_e(z) = \{\exp(\alpha_p (z-L)) - 1\} / \alpha_p$.

De acordo com [79], no comprimento L da fibra o ganho óptico $G_w(L)$ e a potência do ruído ASE $P_{ASE}(L)$ para o canal WDM w_{th} é dado por

$$G_w(L) = \exp \left\{ \int_0^L B_w(z) dz \right\} \quad (5)$$

na qual

$$B_w(z) = -\alpha_s + \sum_{j=1}^M \frac{g_{ik}}{K_{eff} A_{eff}} P_j(z)$$

$$P_{ASE}(L) = \int_0^L C_w(z) \exp\left\{\int_z^L B_w(z_1) dz_1\right\} dz \quad (6)$$

$$C_w(z) = \sum_{i=1}^M \frac{g_{ik}}{2A_{eff}} \left[h\nu_w \Delta_\zeta \left(1 + \frac{1}{\exp\left(\frac{h(\zeta_i - \zeta_k)}{KT}\right) - 1} \right) \right] P_i(z)$$

α_s é a perda da fibra no sinal com frequência ν_w , o subscrito w se refere ao w_{th} sinal aplicado na fibra e h é a constante de Planck.

III.3. Interferência Multicaminhos (MPI) em um Amplificador Raman Distribuído

Um modelo analítico aproximado utilizado em [80] é usado para calcular o espalhamento Rayleigh duplo (DRS) da potência. A fibra utilizada para a amplificação Raman é considerada como a soma do comprimento efetivo L_g , responsável pelo ganho, e o comprimento restante L_l é responsável pela perda na fibra. Portanto, a expressão para o cálculo do DRS é

$$MPI(G_R) = MPI_{L_G}(G_R) + MPI_{L_l} \quad (7)$$

na qual

$$MPI_{L_G}(G_R) = \left(\frac{S_c \alpha_s}{2C_g} \right)^2 [e^{2C_g L_g} - 1 - 2C_g L_g]$$

$$MPI_{L_l} = \left(\frac{S_c}{2} \right)^2 [2L_l \alpha_s - 1 + e^{-2\alpha_s L_l}]$$

$$C_g = \frac{\ln G_R - \alpha_s L_g}{L_g}$$

MPI_{L_G} e MPI_{L_l} são as perdas por multicaminhos no comprimento efetivo e no comprimento da perda da fibra, respectivamente, S_c é o coeficiente de espalhamento, C_g é o coeficiente do ganho e G_R é o ganho Raman adicionado à fibra.

Em DRAs, vários bombeios podem ser usados para aplainar o espectro do ganho para que todos os canais possam ter a mesma penalidade MPI. No modelo de simulação, a fibra que transmite o sinal é a mesma que atua como um DRA e necessita de um comprimento de 70km. O DRA fornece ganho de 20dB dentro do intervalo de comprimentos de onda de 1542,6 até 1554,6 nm.

Baseado na otimização feita em [79], três λ s de bombeio foram escolhidos: 1400,1450 e 1500 correspondendo às potências de bombeio 0,607, 0,209 e 0,01W, respectivamente. Usando esses sinais de bombeio, o ganho Raman, o ruído ASE e o ruído MPI são calculados de acordo com (5), (6) e (7), respectivamente. Se a potência de bombeio é maior que a potência de sinal aplicado na fibra, o ganho e o ruído de cada λ são independentes do número de λ s existentes no DRA.

A potência do sinal, a potência do ruído ASE e a potência MPI foram calculadas utilizando a potência de 0dBm em cada canal do sistema WDM.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)