

POLÍTICAS BASEADAS NA OSNR PARA UM ALGORITMO DE ROTEAMENTO ADAPTATIVO-ALTERNATIVO APLICADO A REDES ÓPTICAS TRANSPARENTES

Trabalho de Conclusão de Curso
Engenharia de Computação

Aluno: Rodrigo Cesar Lira da Silva

Orientado: Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho

Rodrigo Cesar Lira da Silva

***Políticas baseadas na OSNR para um
algoritmo de roteamento
adaptativo-alternativo aplicado a redes
ópticas transparentes***

Monografia apresentada para obtenção do
Grau de Engenheiro de Computação pela
Universidade de Pernambuco

Orientador:

Prof. Dr. Carmelo José Albanéz Bastos Filho

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO

Recife - PE, Brasil

Março de 2013

MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

Avaliação Final (para o presidente da banca)*

No dia 9 de 4 de 2013, às 11:00 horas, reuniu-se para deliberar a defesa da monografia de conclusão de curso do discente RODRIGO CESAR LIRA DA SILVA, orientado pelo professor Carmelo José Albanéz Bastos Filho, sob título Políticas baseadas na OSNR para um algoritmo adaptativo-alternativo aplicado a redes ópticas transparentes, a banca composta pelos professores:

Daniel Augusto Ribeiro Chaves

Carmelo José Albanéz Bastos Filho

Após a apresentação da monografia e discussão entre os membros da Banca, a mesma foi considerada:

☒ Aprovada ☐ Aprovada com Restrições* ☐ Reprovada

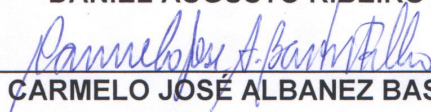
e foi-lhe atribuída nota: 10,0 (DEZ)

*(Obrigatório o preenchimento do campo abaixo com comentários para o autor)

O discente terá 7 dias para entrega da versão final da monografia a contar da data deste documento.



DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES



CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO

* Este documento deverá ser encadernado juntamente com a monografia em versão final.

Resumo

Devido a sua alta taxa de transmissão e custo relativamente baixo, as redes ópticas vêm se tornando a solução para a crescente demanda de largura de banda decorrente da expansão da internet e dos seus serviços. Dentre os grandes desafios estão a definição de um algoritmo de roteamento e alocação de comprimento de onda eficiente que possa prover qualidade de transmissão para os caminhos ópticos e alocar recursos de forma a possibilitar o atendimento de novas conexões. Foi proposto um algoritmo IA-RWA adaptativo-alternativo para redes totalmentente ópticas, denominado NrPSR. O NrPSR encontra as Nr rotas que apresentam o menor custo de acordo com a função custo PSR. O NrPSR usa uma política pré-definida pra selecionar uma das Nr rotas para estabelecer a conexão.

Neste trabalho de conclusão de curso foram propostas duas novas políticas para o NrPSR que utilizam as informações do OSNR das Nr rotas como critério de seleção. A OSNR representa a razão entre a potência do sinal óptico (P_{sinal}) e a potência do ruído óptico ($P_{ruído}$) em um determinado ponto. Na primeira proposta, denominada NrPSR(OSNR_{MAX}), é selecionada a rota que apresenta o maior valor de OSNR no receptor. Na segunda abordagem, denominada NrPSR(OSNR_{JE}), é selecionada a primeira rota que possua o OSNR que atenda aos critérios de QoT.

Para a avaliar desempenho das propostas foram realizados simulações de carga em um simulador de redes ópticas (SIMTON) com as redes Pacific Bell e Finlândia. Os resultados foram comparados com os resultados obtidos pelos algoritmos LRW, MH, SP, NrPSR(MaxK), NrPSR(CL), OSNR-R e PSR nos mesmos cenários. Nessas simulações ambas as políticas superaram os resultados dos algoritmos usados para comparação, tendo o NrPSR(OSNR_{JE}) obtido o melhor resultado. Por fim, com o intuito de avaliar a robustez das políticas foram realizadas simulações com tráfego não-uniforme. Nessa análise o NrPSR(OSNR_{JE}) obteve o melhor resultado que foi comprovado com a realização do teste estatísticos não-paramétricos de *Wilcoxon*.

Abstract

Due its high bit rate transmission and relative low cost, optical networks is a reliable and feasible solution to the growing bandwidth demand caused by the internet expansion and its services. Among several challenges, the following is one of the major problems: to propose an efficient routing and wavelength assignment algorithm which provides good quality of transmission to the lightpaths and assign resources in order to accept new calls. It was proposed an IA-RWA adaptive-alternative algorithm to all-optical networks, called NrPSR. NrPSR finds the Nr routes that present lower cost according to the PSR cost function. The NrPSR algorithm uses a predefined policy to select one of the Nr routes to establish the connection.

In this monography, we propose two novel policies to the NrPSR algorithm using OSNR routes information as selection criterion. OSNR represents the ratio between the optical signal power (P_{signal}) and the optical noise power (P_{noise}). In the first proposal, called NrPSR(OSNR_{MAX}), we selected the route that presents the higher OSNR in the receiver. In the second approach, called NrPSR(OSNR_{JE}), it's select the first route which presents the OSNR that attends the QoT.

In order to evaluate the performance of the proposed techniques, it was performed simulations in a optical networks simulator, called SIMTON, using the Pacific Bell and Finland topologies. The results achieved were compared with others routing algorithms in the same scenarios. The results showed that both policies outperform the other algorithms - the NrPSR(OSNR_{JE}) technique obtained the best results. Finally, in order to evaluate the policies strength, it was also performed simulations with non-uniform traffic flow. In this analysis, the NrPSR(OSNR_{JE}) algorithm reached the best results when compared to the other techniques and it could verified by the Wilcoxon non-parametric statistical test.

Agradecimentos

Agradeço,

A Deus pela minha família, pelas pessoas que colocou na minha vida, por ter me concedido tantas dádivas ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Azenette Lira da Silva e Ronaldo Camilo de Lima, pelos esforços que fizeram para guiar-me nesse mundo. Se não fosse por seus conselhos e advertências eu nunca teria me transformando no que sou hoje. A minha irmã, Emanuelle Lira, por ser uma referência e sempre demonstrar a sua preocupação por mim, além de ter me dado uma sobrinha linda, Clara Bezerra, que adoça todos os meus dias com o seu carinho e amor tão puro. Aos meus irmãos, Thainá, Thiago e Thaís, por demonstrarem que distância e afetividade podem conviver em conjunto.

Aos meus tios, tias, primos e primas que juntos fazem dessa nossa família uma família tão especial e por entenderem as tantas reuniões de família e aniversários nas quais não pude comparecer devido a provas, trabalhos e congressos. À minha amada avó, Azenira Lira, por desde pequeno ter sido a minha segunda mãe e demonstrar tanto carinho por nós.

Aos meus grandes amigos de turma por terem se tornado mais que amigos, os considero verdadeiros irmãos. Ao longo desses 5 anos tive o prazer de conhecer cada um de perto e viver momentos incríveis ao lado deles. Também não posso esquecer dos amigos que fiz dentro e fora da graduação, estes sempre estiveram ao meu lado dando suporte necessário para aguentar essa caminhada tão longa. Apesar de nem sempre estarmos tão próximos, são pessoas que tenho grande apreço.

Aos meus professores que desde o início da graduação nos transmitiram, através de seus ensinamentos e dedicações, lições importantes não só acadêmicas mas também de vida. Ao meus amigos, André Xavier e Rodrigo Choji, que ao longo desses últimos anos foram meus parceiros de pesquisa propiciando-me, juntamente com todo o grupo de pesquisa, bons momentos nesse campo. Ao meu orientador, Carmelo J. A. Bastos-Filho, por ter me orientado tão bem ao longo desses anos.

*“A tragédia da vida é que nos tornamos velhos
cedo demais e sábios tarde demais.”*

Benjamin Franklin

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Algoritmos	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Caracterização do Problema	1
1.2 Hipóteses e Objetivos	3
1.3 Organização do Documento	4
2 Roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas	5
2.1 Roteamento em redes ópticas	5
2.1.1 Roteamento por menor caminho (SP)	6
2.1.2 Roteamento por menor número de saltos (MH)	6
2.1.3 <i>Least Resistance Weight</i> (LRW)	6
2.1.4 Roteamento por melhor relação sinal ruído óptica (ONSR-R) . .	7
2.1.5 Roteamento por séries de potência (PSR)	7
2.1.6 Algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo NrPSR	8
2.1.7 Perda de capacidade (CL)	9
2.1.8 Maior fator de casamento de canais (MaxK)	10
2.1.9 Menor fator de casamento de canais (MinK)	10

2.2	Alocação de comprimento de onda	11
2.2.1	Atribuição de comprimento de onda pelo mais usado (MU)	12
3	Políticas baseadas em OSNR para um algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo	13
3.1	O NrPSR(OSNR)	13
3.1.1	A política do máximo OSNR ($OSNR_{MAX}$)	14
3.1.2	A política do OSNR suficiente ($OSNR_{JE}$)	14
4	Arranjo de Simulação	16
4.1	Etapa de treinamento	16
4.2	Simulação do NrPSR(OSNR)	18
5	Resultados e Discussão	22
5.1	Etapa de Treinamento	22
5.2	Comparação com outros algoritmos de roteamento	24
5.3	Análise de distribuição de carga	26
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	29
6.1	Contribuições e Conclusões	29
6.2	Trabalhos Futuros	30
6.3	Publicações decorrentes deste trabalho	30
	Referências Bibliográficas	32

Lista de Figuras

3.1	Fluxograma da política do máximo OSNR.	14
3.2	Fluxograma da política do OSNR suficiente.	15
4.1	Topologia de comunicação entre as partículas do PSO.	18
4.2	Topologia Pacific Bell utilizada nas simulações.	20
4.3	Topologia Finlândia utilizada nas simulações.	21
5.1	Convergência do PSO para a topologia Pacific Bell usando os algoritmos: NrPSR(CL), NrPSR(MaxK), NrPSR(OSNR _{JE}), NrPSR(OSNR _{MAX}) e o PSR.	23
5.2	Convergência do PSO para a topologia Finlândia usando os algoritmos: NrPSR(CL), NrPSR(MaxK), NrPSR(OSNR _{JE}), NrPSR(OSNR _{MAX}) e o PSR.	23
5.3	Comparação de probabilidade de bloqueio como uma função da carga da rede para diferentes algoritmos de roteamento na topologia Pacific Bell.	25
5.4	Comparação de probabilidade de bloqueio como uma função da carga da rede para diferentes algoritmos de roteamento na topologia Finlândia.	25
5.5	Representação de <i>Box and Whisker</i>	27
5.6	Resultados em <i>Box and Whisker</i> da probabilidade bloqueio para topologia Pacific Bell em que, $R = 1$ e $erl = 60$	28
5.7	Resultados em <i>Box and Whisker</i> da probabilidade de bloqueio para topologia Finlândia em que, $R = 1$ e $erl = 60$	28

Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros padrões utilizados na simulação do PSO.	17
4.2	Parâmetros padrões utilizados nas simulações.	19
5.1	Tempo de treinamento dos algoritmos na rede Finlândia.	24

Lista de Algoritmos

1	Pseudo-código do algoritmo de roteamento NrPSR	9
2	Pseudo-código do algoritmo de alocação de comprimento de onda <i>Most</i> <i>Used.</i>	12

Lista de Abreviaturas e Siglas

ASE – Amplified Spontaneous Emission
CL – Capacity Loss
EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier
FF – First Fit
IA-RWA - Impairment Aware Routing Wavelength Assignment
LRW – Least Resistance Weight
LU – Least Used
MaxK – Maximum Wavelength Matching Factor
MH – Minimum Hop
MinK – Minimum Wavelength Matching Factor
MU – Most Used
O-E-O – Optical-Electronic-Optical
OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio
OSNR-R – Optical Signal Noise-Ratio Routing
OXC – Optical Cross-Connect
PMD – Polarization Mode Dispersion
PSR – Power Series Routing
PSO – Particle Swarm Optimizer
 P_{sinal} – Potência do sinal óptico
 $P_{\text{ruído}}$ – Potência do ruído óptico
QoT – Quality of Transmission
R – Routing
RP – Random Pick
RWA – Routing Wavelength Assignment
QoS – Quality of Service
SP – Shortest Path
WA – Wavelength Assignment
WDM – Wavelength-Division Multiplexing

1 Introdução

Neste trabalho de conclusão de curso, são desenvolvidas e analisadas duas novas políticas de seleção de rotas para um algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo que leva em consideração as penalidades da camada física (IA-RWA, *Impairment Aware Routing Wavelength Assignment*) em uma rede totalmente óptica. O valor da relação sinal ruído óptica (OSNR, *Optical Signal-to-Noise Ratio*) é selecionado como critério de seleção de rota, por este ser um fator crucial para o estabelecimento de uma conexão. A OSNR representa a razão entre a potência do sinal óptico (P_{sinal}) e a potência do ruído óptico ($P_{ruído}$).

Este capítulo apresenta a introdução desta monografia, e está organizado em 3 seções. Na Seção 1.1, é apresentada a motivação para a realização deste trabalho, bem como o problema abordado pelo mesmo. Em seguida, na Seção 1.2 são apresentados os objetivos gerais e específicos e a hipótese de como o problema pode ser solucionado. Por fim, na Seção 1.3, é descrita a estrutura do restante da monografia.

1.1 Motivação e Caracterização do Problema

Nos últimos anos houve uma crescente demanda por largura de banda ocasionada pela expansão da internet e dos seus serviços como VoIP, transferência de arquivos, *streaming* de áudio e vídeo, dentre outros. Nesse cenário que os sistemas de comunicação ópticas surgem como solução para atender a essa crescente necessidade [1].

Os sistemas ópticos usam como meio de transmissão a fibra óptica, que apresenta uma taxa de transmissão muito superior aos outros meios, como o fio de cobre e a rádio frequência, com um custo relativamente baixo [2]. Uma outra vantagem da fibra óptica é que sua matéria prima, a sílica, é bastante abundante no planeta.

As redes ópticas podem ser classificadas em três tipos: opacas, translúcidas e transparentes [3]. Nas redes opacas, o sinal é regenerado em todos os nós interme-

diários da conexão. Para a realização dessa regeneração, é necessário converter o sinal que está no domínio óptico para o elétrico, regenerá-lo e em seguida converter de volta ao domínio óptico (O-E-O, *Optical-Electronic-Optical*). A vantagem desta rede é que por possuir a capacidade de regeneração, a degradação do sinal não se acumula ao longo do caminho. Dessa forma, o sinal pode alcançar longas distâncias mantendo uma qualidade de transmissão (QoT, *Quality of Transmission*) aceitável. Nas redes ópticas transparentes, também conhecidas como redes totalmente ópticas, o sinal é transmitido inteiramente no domínio óptico, sem sofrer a regeneração O-E-O. Em comparação com as redes opacas, as transparentes possuem um custo muito menor, porém o seu sinal sofre uma grande degradação devido a falta de regeneração. Por fim, a rede translúcida é uma rede que possui alguns nós estrategicamente escolhidos que possuem a capacidade de regeneração. Levando em consideração o custo e a eficiência, este tipo de rede é um meio termo entre as redes transparentes e opacas. Neste trabalho de conclusão de curso foi considerado um cenário de rede transparente, uma vez que estas apresentam um menor custo e as restrições impostas pela camada física são mais severas. Isto ocorre devido ao acúmulo de ruído e à distorção do sinal ao longo do caminho óptico [4] [5].

Nas redes ópticas existem dois grandes desafios: a seleção de uma rota com a alocação de comprimento de onda (RWA - *Routing Wavelength Assignment*) eficiente e a obtenção de uma relação sinal ruído óptica (OSNR) aceitável para cada caminho óptico [4]. O caminho óptico é o par formado pela rota e comprimento de onda λ utilizado pela conexão.

O problema de RWA consiste em encontrar uma rota e atribuir um comprimento de onda livre para cada requisição de conexão. A solução do RWA está relacionado ao tipo de tráfego na rede ópticas. O tráfego nestas redes pode ser classificado em dois tipos: estático ou dinâmico. No caso estático, todas as requisições de conexão são conhecidas a priori e as operações de RWA podem ser realizadas antes do início da operação da rede. O principal objetivo é minimizar o número de comprimentos de onda necessários para estabelecer as conexões de uma determinada topologia de rede. O caso dinâmico, visa minimizar a probabilidade de bloqueio otimizando o uso dos recursos da rede. Em geral, a solução para o caso dinâmico é simplificada pela dissociação do problema em dois subproblemas menores: o roteamento (R - *Routing*) e a atribuição de comprimento de onda (WA - *Wavelength Assignment*) [6]. O desempenho de um algoritmo de RWA dinâmico pode ser avaliado em termos da probabilidade de bloqueio que representa a probabilidade de requisição não ser es-

1.2 Hipóteses e Objetivos

tabelecida. Isto pode ocorrer devido a falta de recursos ou QoT inadequado para um caminho óptico [7].

Alguns exemplos de algoritmo de roteamento propostos em trabalho anteriores foram: roteamento por menor caminho (SP - *Shortest Path*) [8], roteamento por menor quantidade de saltos (MH - *Minimum Hop*) e *Least Resistance Weight* (LRW) [9]. Outro aspecto relevante do RWA é o algoritmo de atribuição de comprimento de onda. Existem alguns algoritmos bem conhecidos como: atribuição pelo primeiro disponível (FF - *First Fit*), atribuição aleatória (RP - *Random Pick*), atribuição pelo menos usado (LU - *Least Used*) e a atribuição pelo mais usado (MU - *Most Used*). Mais detalhes sobre os algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda podem ser encontrados no Capítulo 2.

Recentemente, Xavier *et al.* [10] propuseram um algoritmo adaptativo-alternativo para redes ópticas, denominado NrPSR. O algoritmo NrPSR encontra as Nr rotas que apresentam o menor custo, que são avaliadas baseado na função de custo PSR, proposto por Chaves *et al.* [11]. Então, o algoritmo escolhe uma das rotas de acordo com uma política pré-definida.

Neste trabalho de conclusão de curso, foram desenvolvidas duas políticas alternativas para o NrPSR baseadas na OSNR. Na primeira proposta, denominada NrPSR($OSNR_{MAX}$), é selecionada a rota que apresenta o maior valor de OSNR. Na segunda abordagem, denominada NrPSR($OSNR_{JE}$), é selecionada a primeira rota que possua o OSNR que atenda aos critérios de QoT, ou seja, a rota menos custosa que apresente uma OSNR aceitável para a conexão.

1.2 Hipóteses e Objetivos

Já se foi comprovado que algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda que consideram as penalidades da camada física (IA-RWA) apresentam melhor desempenho que os algoritmos tradicionais [7, 12, 10]. Recentemente, Xavier *et al.* propuseram um algoritmo IA-RWA, denominado NrPSR, cuja estratégia utiliza políticas para escolha da rota a ser atribuída a uma conexão. Entretanto, na sua formulação inicial [10], foram propostas três políticas que não utilizam a informação da OSNR para a escolha de rota. A escolha de rotas que possuam OSNR aceitável garante às chamadas uma mínima qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) que implica na aceitação da requisição.

Dada esta hipótese, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo desenvolver duas novas políticas para o algoritmo NrPSR que utilizem informações da OSNR das rotas como fator de decisão pra escolha da rota. Além do desenvolvimento das políticas, ambas serão comparadas com as políticas da proposta do NrPSR, assim como outros bem conhecidos algoritmos da literatura. Por fim, será testada a robustez da proposta através da análise dos seus comportamentos com variação de distribuição de carga.

1.3 Organização do Documento

Este trabalho está organizado em 6 capítulos. No Capítulo 2 serão abordados aspectos relativos à roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas. Em seguida, no Capítulo 3, será apresentada a contribuição deste trabalho, as duas políticas de seleção de rotas para que levam em consideração a informação da OSNR. O Capítulo 4, trata-se do arranjo de simulação utilizado. Em seguida, no Capítulo 5, resultados das simulações serão apresentados. Por fim, no Capítulo 6, serão discutidas as principais conclusões desse trabalho, como também os trabalhos futuros e as publicações decorrentes dele.

2 *Roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas*

Para o estabelecimento de uma conexão entre dois nós em redes ópticas multiplexadas por comprimento de onda (WDM - *Wavelength-Division Multiplexing*), é necessário definir um caminho óptico [6] através de algoritmos de RWA. A escolha desses algoritmos influenciam diretamente no desempenho da rede. Por isso, o roteamento e alocação de comprimento de onda tornam-se desafios para este problema.

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos de roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas. Além disso, serão apresentados detalhes dos algoritmos utilizados para efeito de comparação com as políticas propostas para escolha do caminho óptico em algoritmos de RWA adaptativos alternativos.

2.1 Roteamento em redes ópticas

O roteamento é um grande desafio em redes ópticas, ele se faz necessário uma vez que existem vários caminhos que interligam os nós da rede. Dado esse problema, existem algoritmos que utilizam de informações da rede para escolher a melhor rota a ser utilizada por uma conexão, ou seja, a rota mais apta de acordo com a métrica utilizada. Dentre as informações que podem ser usadas como métrica para a escolha da rota estão: a menor distância (SP), o menor número de saltos (MH), a sobrecarga dos enlaces (LRW), o relação sinal ruído óptica da rota (OSNR-R), dentre outras [13].

Os algoritmos de roteamento podem ainda ser classificados em fixo, fixo-alternativo ou adaptativo. No roteamento fixo, para um determinado par de nós, origem e destino, a rota a ser utilizada será sempre a mesma. O roteamento fixo-alternativo é semelhante ao fixo, porém é determinada uma lista de rotas e uma dessas é escolhida mediante uma política pré-definida. Por fim, no roteamento adaptativo as rotas são

escolhidas dinamicamente de acordo como o estado da rede [6]. Recentemente, foi proposto um algoritmo adaptativo-alternativo denominado NrPSR, que calcula Nr rotas de acordo com o estado atual da rede e seleciona uma dessas de acordo com uma política pré-definida. A seguir, serão apresentados os algoritmos de roteamentos relacionados com este trabalho de conclusão de curso.

2.1.1 Roteamento por menor caminho (SP)

O roteamento por menor caminho é um algoritmo de roteamento fixo que utiliza-se da informação do comprimento do enlace no cálculo da rota. Este algoritmo encontra a rota de menor distância entre os nós origem e destino. Nele, a função custo do enlace é dado por:

$$w_{i,j} = d_{i,j}, \quad (2.1)$$

em que $w_{i,j}$ é a função custo do enlace i e j da topologia e $d_{i,j}$ entre os nós i e j .

2.1.2 Roteamento por menor número de saltos (MH)

O roteamento por menor número de saltos é um algoritmo fixo simples que tem como objetivo escolher a rota entre os nós, origem e destino, que seja composta pela menor quantidade de enlaces. A função custo do MH é dada por:

$$w_{i,j} = 1. \quad (2.2)$$

2.1.3 *Least Resistance Weight* (LRW)

O LRW é uma função custo proposta por Wen *et al.* [9] que incorpora informações do estado atual dos enlaces na seleção da rota. Essa função custo prioriza, no roteamento, os enlaces menos congestionados, ou seja aqueles que possuem o menor número de comprimento de onda ativos. O LRW propõe a seguinte função custo:

$$w_{i,j} = \frac{\lambda_{Max}^T}{\lambda_{ij}^A}, \quad (2.3)$$

em que λ_{Max}^T e λ_{ij}^A é a quantidade máxima de comprimentos de onda de um enlace e o número de comprimentos de onda disponíveis no enlace que interliga os nós i e j , respectivamente. Na função custo LRW, observa-se que:

- Quando $\lambda_{ij}^A = 0$, ou seja, não existem comprimentos de onda disponíveis no enlace, a resistência do enlace torna-se infinita, $w_{i,j} = \infty$;
- Quando $\lambda_{ij}^A = \lambda_{Max}^T$ significa que o enlace está totalmente disponível e sua resistência é mínima, $w_{i,j} = 1$;
- Quando $\lambda_{ij}^A < \lambda_{Max}^T$ significa que o enlace está parcialmente disponível.

2.1.4 Roteamento por melhor relação sinal ruído óptica (ONSR-R)

O roteamento por melhor relação sinal ruído óptico (OSNR-R, *Optical Signal-to-Noise Ratio Routing*) é um algoritmo de RWA adaptativo que foi proposto por Pereira *et al.* [7]. Este algoritmo utiliza a OSNR dos enlaces para encontrar uma rota entre os nós, origem e destino, com a menor degradação da OSNR para um determinado comprimento de onda. A rota e o comprimento de onda λ encontrado pelo OSNR-R podem ser expressos por:

$$R_{s,d}^{\lambda} = \max\{f_{OSNR}[\pi(s,d), \lambda]\}, \quad (2.4)$$

em que $\pi(s,d)$ representa todas as possíveis rotas entre os nós s e d , e $f_{OSNR}[\pi(s,d), \lambda]$ corresponde ao valor da OSNR no receptor para cada uma destas rotas. O OSNR é calculado usando o modelo proposto em [7]. Devido à necessidade dos sucessivos cálculos de OSNR, o roteamento por melhor relação sinal ruído óptico, torna-se um algoritmo computacionalmente custoso.

2.1.5 Roteamento por séries de potência (PSR)

Proposto por Chaves *et al.* [11], o PSR é uma função custo adaptativa para um enlace da rede óptica, baseada em um conjunto de parâmetros de rede determinada por um especialista. O PSR propõe uma expansão em séries de potência para avaliar o custo de um enlace durante o cálculo da rota. O primeiro passo do algoritmo é a

escolha das variáveis para a função custo. Como proposta inicial foram utilizadas parâmetros de redes simples como a disponibilidade e distância normalizada do enlace. A disponibilidade $x_{i,j}$ (entre os nós i e j) é definida como:

$$x_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j}^A}{\lambda_{i,j}^T}, \quad (2.5)$$

em que $\lambda_{i,j}^A$ e $\lambda_{i,j}^T$ são, respectivamente, o número de comprimentos de onda ativos e a quantidade de máxima de comprimento de onda do enlace que integra os nós i e j . O distância normalizada do enlace $y_{i,j}$ é definida como:

$$y_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{d_{max}}, \quad (2.6)$$

em que $d_{i,j}$ é o comprimento do enlace entre os nós i e j , e d_{max} é o comprimento do maior enlace da rede. O segundo passo é a descrição da função custo em termos de séries de potência de acordo com os parâmetros escolhidos, representado pela Equação (2.7):

$$f(x_{i,j}, y_{i,j}) = \sum_{n_0=0}^N \sum_{n_1=0}^N b_{n_0, n_1} x_{i,j}^{n_0} y_{i,j}^{n_1}, \quad (2.7)$$

em que $f(x_{i,j}, y_{i,j})$ é a função custo associada ao enlace entre os nós i e j . N é um número inteiro que representa o número máximo de termos usados na expansão da função.

O terceiro passo é o uso de um algoritmo de otimização para determinar os coeficientes ótimos b_{n_0, n_1} das séries de potência. Na proposta [11] foi utilizado *Particle Swarm Optimization* (PSO) [14] para a obtenção dos valores ótimos dos coeficientes. Após a etapa de treinamento, o algoritmo está pronto pra ser utilizado no roteamento da rede.

2.1.6 Algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo NrPSR

Xavier *et al.* [10] propuseram um algoritmo de IA-RWA adaptativo-alternativo denominado NrPSR. O NrPSR usa o algoritmo proposto por Yen *et al.* [15] para encontrar as Nr rotas de menor custo entre os nós fonte e destino da conexão valoradas pela função custo PSR. O NrPSR utiliza-se do algoritmo de Yen *et. al.* para encontrar as Nr

rotas, pois o custo computacional dele cresce linearmente com o aumento do número de rotas.

Por ter essa característica alternativa, no NrPSR após a seleção das rotas é necessário a utilização de uma política para escolher uma das Nr rotas para estabelecer a conexão. Por utilizar a função custo PSR, o NrPSR necessita de uma fase de otimização. Esta fase de treinamento é necessária para o algoritmo obter informações da dinâmica da rede e dessa forma adequar os coeficientes da série de potência.

Por utilizar a função custo PSR na sua estratégia de roteamento, o NrPSR necessita realizar as etapas descritas em 2.1.5. Nessas etapas Xavier *et al* manteve as configurações utilizadas por Chaves *et al*. [11] na proposta inicial do PSR. Logo, foram utilizados como variáveis de redes a disponibilidade do enlace e a distância normaliza, ambas descritas na Equação 2.5 e Equação 2.6, respectivamente. A expansão em série de potência é como descrito na Equação 2.7 e como algoritmo de otimização foi utilizado o PSO. A etapa de treinamento foi realizada para cada política, uma vez que os coeficientes obtidos são otimizados para a configuração treinada.

A seguir no Algoritmo 1 é descrito o pseudo-código do funcionamento *on-line* do NrPSR:

Algoritmo 1: Pseudo-código do algoritmo de roteamento NrPSR

- 1: Defina o número de rotas Nr ;
 - 2: Encontre as Nr rotas com menor custo de acordo com a função custo PSR;
 - 3: Selecione a melhor rota entre as Nr rotas encontradas usando uma política pré-definida;
 - 4: **Retorne** a rota selecionada.
-

Na sua formulação inicial [10] foram propostas três políticas que levam em consideração informações sobre alocação de comprimentos de onda e quantidade de enlaces da rota. As políticas propostas foram: Perda de capacidade (CL, *Capacity Loss*), Maior fator de casamento de canais (MaxK, *Maximum Wavelength Matching Factor*) e Menor fator de casamento de canais (MinK, *Minimum Wavelength Matching Factor*).

2.1.7 Perda de capacidade (CL)

A política CL, desenvolvida na proposta inicial do algoritmo, utiliza como métrica de escolha de rota a quantidade de enlace que compõem uma rota. Nesta política são todas as Nr rotas são analisadas e é escolhida aquela que possuir a menor quantidade

de enlaces na sua composição. Dentre as políticas propostas, a política CL e MaxK foram as que apresentaram os melhores resultados.

Por utilizar a rota que seja composta pela menor quantidade de enlaces, a política CL economiza os recursos da rede dessa forma é maximizada a capacidade de aceitação de novas conexões na rede.

2.1.8 Maior fator de casamento de canais (MaxK)

A política MaxK basea-se na proposta de Santana *et al.* [16] denominada casamento de canais. O casamento de canais é uma proposta na qual é avaliada se a quantidade de comprimentos de onda livres de um enlace são os mesmos. Através dessa análise é determinado o valor K que representa a quantidade de comprimentos de onda realmente disponíveis para a conexão.

A política MaxK do NrPSR, como seu nome sugere, avalia a quantidade de comprimentos de ondas disponíveis pra a conexão (K) em cada uma das Nr rotas e seleciona aquela rota que possuir o maior valor de K . Através dessa estratégia, a política MaxK distribui o uso de recursos ao longo da rede óptica.

2.1.9 Menor fator de casamento de canais (MinK)

A política MinK também é baseada no fator de casamento de canais proposto por Santana *et al.* [16]. Nesta política é avaliada a quantidade de comprimento de onda disponíveis pra conexão (K) em cada uma das Nr rotas e escolhida aquela rota que possuir o menor valor de K . Através dessa estratégia, a política MinK compactar o uso dos recursos ao longo da rede óptica.

2.2 Alocação de comprimento de onda

Em cada enlace das redes ópticas WDM existem diversos comprimentos de onda, cada um podendo transportar uma informação diferente. Para atender a requisição de conexão, além da rota, também é necessário determinar o comprimento de onda que será utilizado no percurso. Em uma rede óptica WDM, duas características influenciam diretamente na alocação do comprimento de onda, a presença de conversores de comprimento de onda em determinados nós que permitem a conversão de um comprimento de onda λ_x para um λ_y , e o tipo de tráfego da rede.

A presença de conversores de comprimento de onda facilita a alocação uma vez que com o seu uso, a restrição de comprimento de onda, que diz que para se obter uma conexão entre o nó origem e o nó destino em uma rota é necessário que o comprimento de onda escolhido esteja livre em toda a rota, não precisa ser necessariamente cumprida. Logo, a alocação do comprimento para uma determinada requisição torna-se mais simples. Por outro lado, tem que ser levado em consideração que os nós com a funcionalidade de conversão de comprimento de onda aumentam consideravelmente o custo de uma rede óptica.

O tráfego da rede influencia diretamente no algoritmo de alocação de comprimento de onda, já que em redes com tráfego estático a alocação do comprimento de onda é feita de uma forma que utilize menos recursos. No entanto, em uma rede com tráfego dinâmico, em que a chegada das conexões não são previsíveis, é considerado que há um número fixo de comprimentos de onda e o algoritmo de RWA deve buscar a minimização de bloqueios das conexões [6].

Para que uma conexão possa ser estabelecida, é necessário que exista, no mínimo, um comprimento de onda disponível ao longo da rota na rede. Para a seleção de um comprimento de onda, dentre aqueles que estão disponíveis, existem diversas opções de algoritmos. Dentre eles, estão o atribuição pelo primeiro disponível (FF, *First Fit*), atribuição aleatória (RP, *Random Pick*), atribuição pelo menos usado (LU, *Least Used*), atribuição pelo mais usado (MU, *Most Used*) e o *Distributed Relative Capacity Loss* (DRCL). Neste trabalho foi utilizado o MU, uma vez que foi verificado que este algoritmo obtém um bom desempenho nas redes ópticas WDM [10]. Na Seção 2.2.1, está descrito o funcionamento do algoritmo de atribuição de comprimento de onda pelo mais usado.

2.2.1 Atribuição de comprimento de onda pelo mais usado (MU)

O objetivo do algoritmo de alocação de comprimento de onda *Most Used* [6] é alocar a chamada no comprimento de onda mais utilizado em toda a rede. Dessa forma, o MU compacta os comprimentos de onda em uso. Para isto, existe a necessidade de obtenção de informações globais da rede. O pseudo-código do algoritmo de alocação de comprimento de onda pelo mais usado está apresentado no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: Pseudo-código do algoritmo de alocação de comprimento de onda *Most Used*.

- 1: **para todo** enlace da rede **faça**
 - 2: Avalie a frequência de uso de todos comprimentos de onda;
 - 3: **fim para**
 - 4: Ordene em uma lista os comprimentos de onda por sua utilização na rede;
 - 5: Aloque o primeiro comprimento de onda da lista que esteja disponível na rota;
 - 6: A chamada é bloqueada se não tiver comprimento de onda disponível na rota.
-

3 Políticas baseadas em OSNR para um algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo

Como mostrado anteriormente o algoritmo, NrPSR encontra Nr rotas para um par de nós destino-origem. Devido a essa característica, há a necessidade da utilização de políticas para a escolha de uma das Nr rotas pra ser atribuída a conexão. Neste capítulo serão apresentadas as duas propostas de políticas deste trabalho de conclusão de curso, baseadas na OSNR.

3.1 O NrPSR(OSNR)

Apesar de ter obtido bons resultados quando comparados com outros algoritmos de roteamento bem conhecidos da literatura, as políticas MaxK, MinK e CL do NrPSR não utilizam a OSNR como critério de avaliação [10]. Dessa forma, o caminho óptico escolhido pode apresentar OSNR abaixo do limiar aceitável, o que ocasionaria o bloqueio da chamada. Baseando-se nisso, este trabalho de conclusão de curso propõe duas novas políticas de escolha de rota para o NrPSR que utilizam como fator de escolha o OSNR das rotas, denominadas $OSNR_{JE}$ e $OSNR_{MAX}$. Em ambas, o cálculo da OSNR é feito de acordo com o modelo analítico proposto por Pereira *et al.* [7]. Para a inclusão dessas novas políticas não foram necessárias mudanças no algoritmo proposto por Xavier *et al.* [10], exceto na seleção da rota, portanto o seu funcionamento é similar ao descrito anteriormente na Seção 2.1.6. Nas seções seguintes são descritos as novas políticas e o seus respectivos fluxogramas.

3.1.1 A política do máximo OSNR ($OSNR_{MAX}$)

A primeira proposta é denominada de $OSNR_{MAX}$, em que MAX significa máximo. Como o nome sugere, essa política escolhe a rota que possui o maior valor de OSNR. Dessa forma, a política tenta maximizar a qualidade de transmissão do caminho óptico. A Figura 3.1 mostra o fluxograma do $NrPSR(OSNR_{MAX})$.

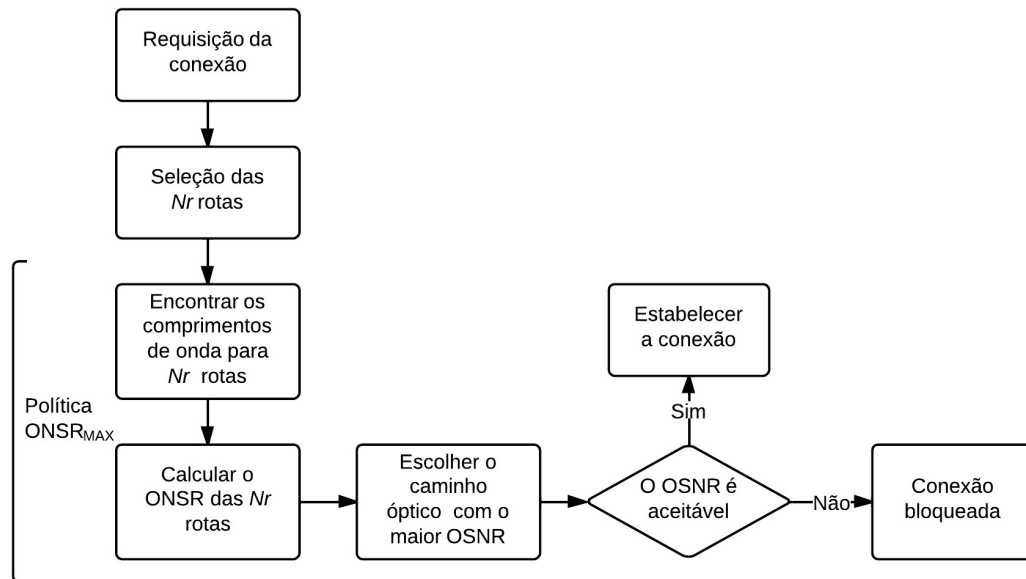


Figura 3.1: Fluxograma da política do máximo OSNR.

Após encontrar as Nr rotas de acordo com a função custo PSR, a política $OSNR_{MAX}$ calcula o valor dos OSNR de cada rota e escolhe a que possuir o maior valor. Se a rota escolhida possuir uma OSNR aceitável, a conexão é estabelecida caso contrário, é bloqueada.

3.1.2 A política do OSNR suficiente ($OSNR_{JE}$)

A segunda proposta desse trabalho é a política denominada de $OSNR_{JE}$, em que o JE significa apenas o suficiente. Nela, é selecionada a primeira das Nr rotas que possua um valor aceitável de OSNR ($OSNR_{QoS}$), o $OSNR_{QoS}$ é um valor atribuído pelo operador da rede óptica para garantir que as conexões possuam qualidade de serviço adequada. Caso não exista nenhuma rota aceitável para atender a requisição de conexão, ela é bloqueada. A partir desta estratégia, é obtida a rota menos custosa

que possua o OSNR suficiente para o estabelecimento da conexão. A seguir é descrito o fluxograma do $NrPSR(OSNR_{JE})$.

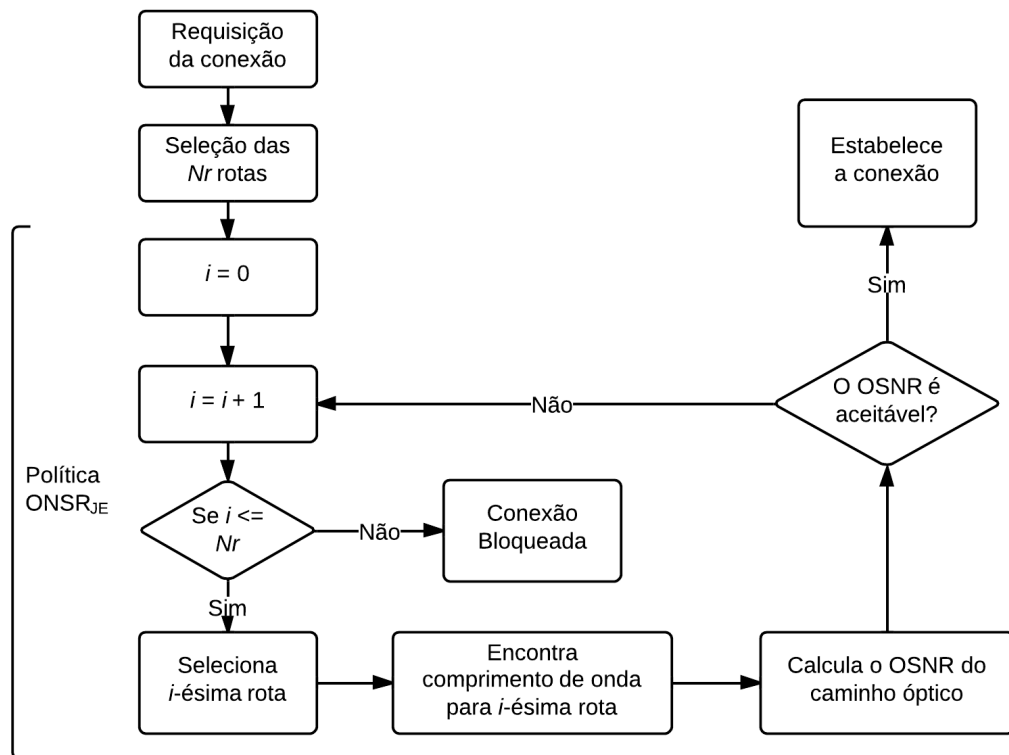


Figura 3.2: Fluxograma da política do OSNR suficiente.

4 *Arranjo de Simulação*

Todos os experimentos realizados neste trabalho de conclusão de curso foram feitos a partir de simulações. Devido a característica do NrPSR, as simulações foram divididas em duas etapas: a etapa *off-line* de treinamento do NrPSR(OSNR) e a etapa de simulação para avaliação do desempenho da rede.

Na Seção 4.1, será descrito detalhes da etapa de otimização. Por último, em 4.2 é descrito o arranjo da simulação propriamente dita do NrPSR.

4.1 **Etapa de treinamento**

Como descrito em na Seção 2.1.6, o algoritmo NrPSR necessita de uma etapa de treinamento para otimizar os valores dos coeficientes da série de potência (PSR). Essa etapa, acontece antes do funcionamento da rede óptica, e por isso, é considerada *off-line*. Assim como a proposta inicial [10], foi utilizado o algoritmo PSO como otimizador. O PSO é um algoritmo de otimização baseado na simulação do comportamento social emergente de bandos de pássaros. Este algoritmo foi proposto por Kennedy e Eberhart em 1995 [14]. Nele, cada partícula p possui um *fitness* que representa o quão apta ela é para resolver o problema. Nos experimentos realizados, cada posição da partícula é um possível conjunto de coeficientes de função expandida do PSR. O *fitness* de uma partícula é calculado por:

$$f(p_i) = \frac{1}{Pb_i}, \quad (4.1)$$

em que $f(p_i)$ e Pb_i é o *fitness* e a probabilidade de bloqueio referente a utilização dos coeficientes da partícula i com o algoritmo de RWA, respectivamente. A probabilidade de bloqueio é avaliada como o relação entre o número de conexões bloqueadas e o número total de requisições de conexões.

Para avaliar a probabilidade de bloqueio de cada conjunto de coeficientes com seus respectivos algoritmo de RWA foram simuladas 10^5 requisições de conexões no cenário de rede definido. Em todas simulações, foram utilizados $N = 5$, em que N é o número de termos usados no PSR e $Nr = 3$, em que Nr é o número de rotas alternativas selecionadas pelo NrPSR. Outros parâmetros de simulação do PSO podem ser encontrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros padrões utilizados na simulação do PSO.

Parâmetro	Valor	Descrição
L	30	Número de partículas
I_{PSO}	200	Número de iterações do PSO
c_1, c_2	2,05	Coeficiente de aceleração
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	U[0,1]	Número aleatório
χ	0,72984	Fator de constrição
S	[-1,+1]	Espaço de busca
V	[-1,+1]	Limites de velocidade

As equações para a atualização da posição e cálculo da velocidade das partículas são exibidas a seguir:

$$\vec{x}_{i+1} = (\vec{v}_i + \vec{x}_i), \quad (4.2)$$

$$\vec{v}_{i+1} = \chi[\vec{v}_i + c_1 \varepsilon_1 (\vec{p}_i - \vec{x}_i) + c_2 \varepsilon_2 (\vec{n}_i - \vec{x}_i)], \quad (4.3)$$

em que \vec{x}_i , \vec{v}_i são os vetores de posição e velocidade no momento i , respectivamente; ε_1 e ε_2 são variáveis aleatórias; c_1 e c_2 são fatores de aceleração do PSO; \vec{p}_i e \vec{n}_i são respectivamente, a melhor posição da partícula e a melhor posição dos vizinhos da partícula até o momento i e χ é o fator de constrição que é calculado por:

$$\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \varphi = c_1 + c_2. \quad (4.4)$$

Clerc *et al.* [17] descobriram que se $\varphi > 4$, a convergência do PSO é garantida em determinadas condições. Devido a este motivo foi escolhido o uso do fator de constrição na implementação do PSO.

Foi utilizada como estratégia de comunicação entre as partículas, a topologia local em anel também conhecido como L_{best} [18] que é representada na Fig 4.1. Essa topologia foi escolhida por deixar o enxame menos susceptível a ótimos locais [19].

Na topologia de comunicação em anel, cada partícula comunica-se apenas com seus vizinhos imediatos, neste caso o termo vizinhança não está relacionado a proximidade física, mas a proximidade na disposição das partículas numa lista.

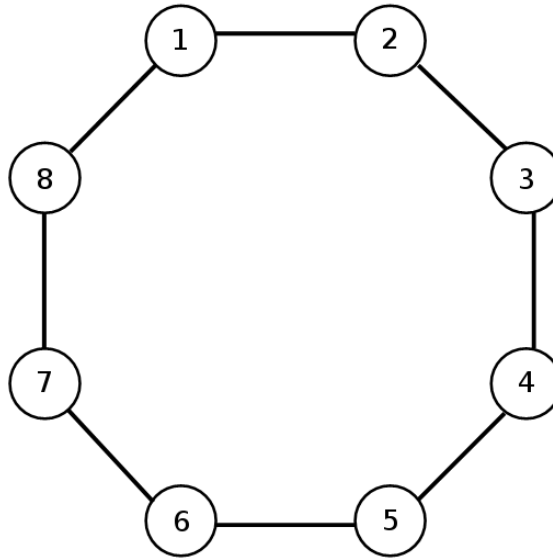


Figura 4.1: Topologia de comunicação entre as partículas do PSO.

4.2 Simulação do NrPSR(OSNR)

Devido à complexidade de mensurar analiticamente o desempenho dos algoritmos nas redes ópticas e a inexistência de sistemas reais disponíveis para tais medições, todas as simulações foram realizadas no SIMTON [20]. O SIMTON é uma plataforma computacional de simulação de redes ópticas desenvolvida em colaboração científica entre a Universidade de Pernambuco e a Universidade Federal de Pernambuco.

Para cada simulação de rede no SIMTON, foi executado um conjunto de 10^5 requisições. Os pares de nós, origem e destino, são gerados de forma aleatória usando uma distribuição uniforme. O processo de chegada de solicitação de conexões segue um processo de *Poisson*, o intervalo de tempo entre as chamadas é exponencialmente distribuído com média H , e a duração de cada chamada também segue uma distribuição exponencial, porém com média $\frac{1}{\mu}$.

A partir dos parâmetros descritos anteriormente, é possível estimar a carga da rede como:

$$L_{rede} = \mu \cdot H, \quad (4.5)$$

em que H é o tempo média que as chamadas ficam ativas e μ é a taxa média que as chamadas chegam a rede. Apesar de ser adimensional, na literatura é atribuído à L_{rede} a unidade *erlang*.

Os parâmetros da rede óptica são exibidos na Tabela 4.2, onde P_{sat} é a potência de saturação na saída do amplificador; $OSNR_{in}$ é relação sinal ruído óptica na entrada; P_{laser} é a potência de saída dos transmissores; $OSNR_{QoS}$ é a relação sinal ruído óptica adotada como QoS; B a taxa de transmissão (Modulação OOK); B_o é a largura de banda; W é o número de comprimento de onda em cada enlace; Δf é o espaçamento em frequência entre os canais; λ_i é o menor comprimento de onda da grade; λ_0 é o comprimento de onda com coeficiente zero de dispersão; λ_{0RD} é o comprimento de onda com coeficiente zero de dispersão residual; α é o coeficiente de atenuação da fibra; L_{Mux} , L_{Demux} e L_{Switch} é a perda no multiplexador, demultiplexador e no *switch*, respectivamente; NF é a figura de ruído no EDFA (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier); ε é o fator de isolamento do *switch*; δ é a máxima perda do alargamento temporal no pulso óptico; D_{PMD} é o coeficiente do PMD; S_{DCF} e S_{Tx} são os coeficientes de compensação dispersão da fibra e da fibra de transmissão, respectivamente.

Tabela 4.2: Parâmetros padrões utilizados nas simulações.

Parâmetro	Topologia Pacific Bell	Topologia Finlândia
P_{sat}	26 dBm	20 dBm
$OSNR_{in}$	40 dBm	40 dBm
P_{laser}	3 dBm	3 dBm
$OSNR_{QoS}$	23 dB	20 dB
B	40 Gbp/s	40 Gbp/s
B_o	100 GHz	100 GHz
W	20	20
Δf	100 GHz	100 GHz
λ_i	1528,77 nm	1528,77 nm
λ_0	1557 nm	1450 nm
λ_{0RD}	1544,53	1528,77 nm
α	0,2 dB/km	0,2 dB/km
L_{Mux}	2 dB	3 dB
L_{Demux}	2 dB	3 dB
L_{Switch}	2 dB	3 dB
NF	5 dB	6 dB
ε	-40 dB	-40 dB
δ	10%	10%
D_{PMD}	0,05 ps/km ^{1/2}	0,04 ps/km ^{1/2}
S_{DCF}	-1,87 ps/km.nm ²	-1,87 ps/km.nm ²
S_{Tx}	0,06 ps/km.nm ²	0,06 ps/km.nm ²

Nessa plataforma de simulação, foram implementados os algoritmos propostos, NrPSR(OSNR_{MAX}) e NrPSR(OSNR_{JE}). Além disso, foram feitas as simulações de comparação com os algoritmos de roteamento que já estavam implementados no SIM-TON, dentre eles: NrPSR(MaxK), NrPSR(CL), LRW, SP, MH, OSNR-R, PSR. Como algoritmo de alocação de comprimento de onda foi usado o MU, devido a sua simplicidade e seu bom desempenho em redes ópticas [10].

Duas topologias de rede foram utilizadas neste trabalho, a Pacific Bell (Fig. 4.2) e a Finlândia (Fig. 4.3). A topologia Pacific Bell possui 17 nós e 23 enlaces, enquanto que a topologia Finlândia, 12 nós e 19 enlaces. As requisições são comutadas por circuito e a rede óptica não possui capacidade de conversão de comprimento de onda. As penalidades de camada física consideradas nesse trabalho foram: a emissão espontânea amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) e os efeitos de ganho de saturação nos amplificadores, a dispersão do modo de polarização (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) na fibra de transmissão e o *crosstalk* no OXC (*Optical Cross-Connect*).

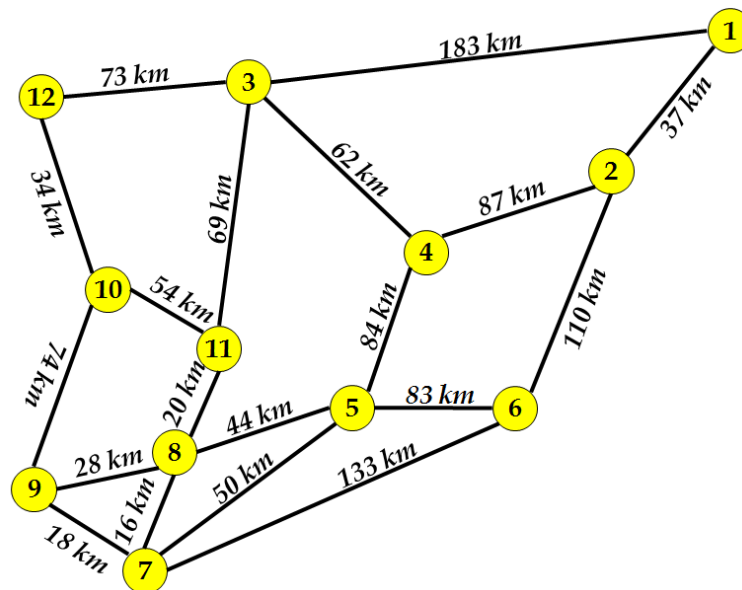


Figura 4.2: Topologia Pacific Bell utilizada nas simulações.

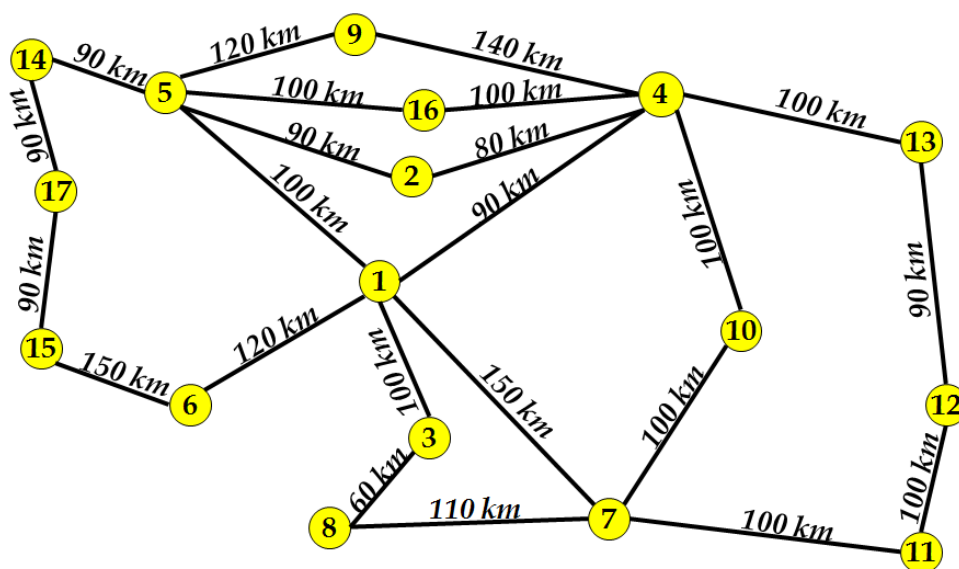


Figura 4.3: Topologia Finlândia utilizada nas simulações.

5 *Resultados e Discussão*

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados da simulação de carga na qual foram analisadas as probabilidades de bloqueio de ambas as políticas propostas. O desempenho das duas políticas foram comparadas tanto com as principais políticas proposta na formulação inicial do NrPSR, quanto com outros algoritmos bem conhecidos na literatura. Além disso, para avaliar a robustez do NrPSR(OSNR), foi realizado uma análise estatística dos resultados da simulação de carga. Na Seção 5.1 são descritos os resultados obtidos na etapa de treinamento do algoritmo. Em seguida, na Seção 5.2 são exibidos os resultados das simulações de carga do NrPSR(OSNR_{JE}) e do NrPSR(OSNR_{MAX}). Por último, na Seção 5.3 são descritos os resultados obtidos na análise de robustez das políticas propostas neste trabalho de conclusão de curso.

5.1 **Etapa de Treinamento**

Assim como o PSR, o NrPSR requer uma etapa de treinamento para encontrar os coeficientes, b_{n_0, n_1} , das séries de potência otimizados. As Fig. 5.1 e Fig. 5.2 mostram a convergência do PSO pra o algoritmo de roteamento PSR e para quatro políticas do NrPSR: CL, MaxK, OSNR_{JE} e OSNR_{MAX}, para as topologias Pacific Bell e Finlândia, respectivamente. A política MinK não foi comparada, uma vez que já foi comprovado [10] que seu desempenho é muito abaixo das políticas MaxK e CL.

Analisando as Fig. 5.1 e Fig. 5.2, é possível observar que dentre os algoritmos, o NrPSR(OSNR_{JE}) obteve o melhor resultado em termos de probabilidade de bloqueio. Uma outra característica é que a convergência desses algoritmos foi bastante rápida, e em ambas topologias não houve nenhuma mudança significativa na probabilidade de bloqueio a partir da iteração 140.

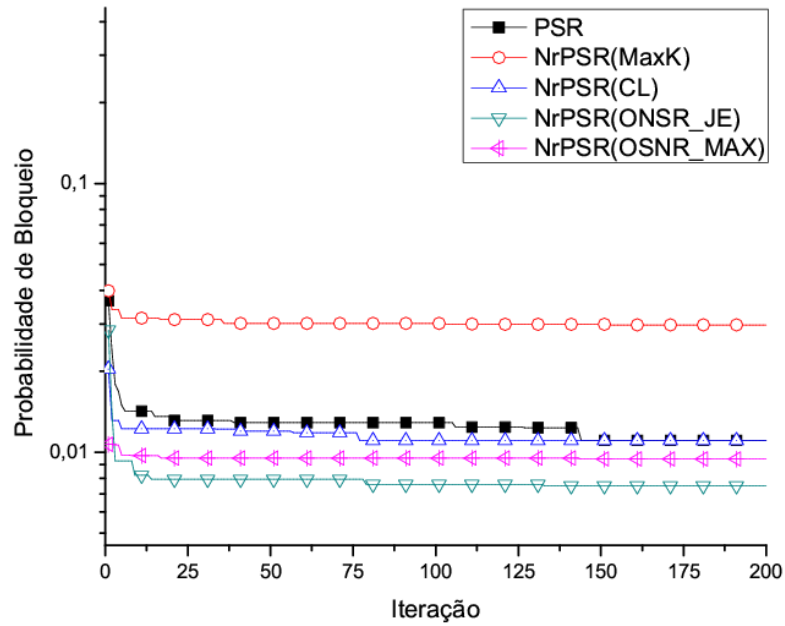


Figura 5.1: Convergência do PSO para a topologia Pacific Bell usando os algoritmos: NrPSR(CL), NrPSR(MaxK), NrPSR(ONSR_{JE}), NrPSR(ONSR_{MAX}) e o PSR.

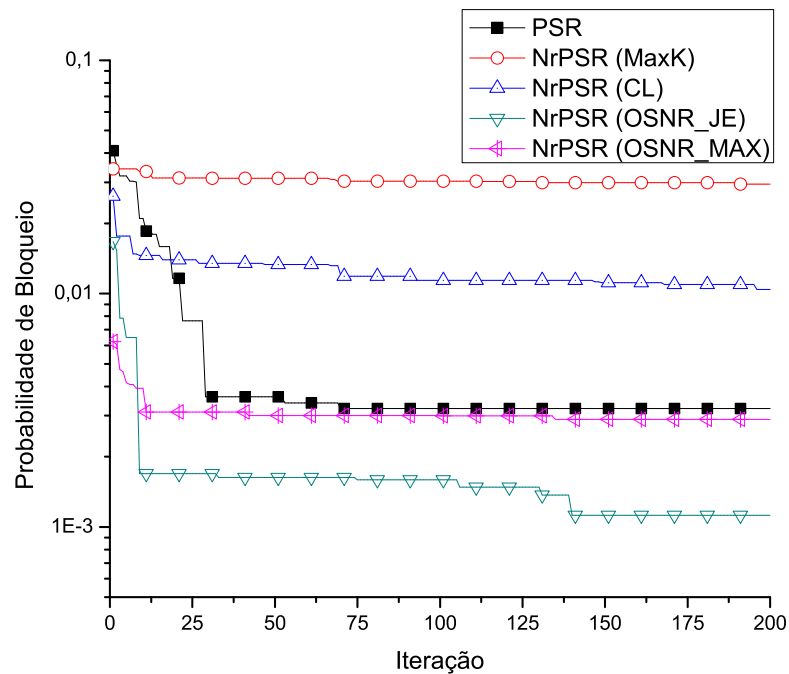


Figura 5.2: Convergência do PSO para a topologia Finlândia usando os algoritmos: NrPSR(CL), NrPSR(MaxK), NrPSR(ONSR_{JE}), NrPSR(ONSR_{MAX}) e o PSR.

Os tempos para treinamento dos algoritmos de roteamento na rede Finlândia são exibidos Tabela 5.1. Todas as simulações foram realizadas em um computador com um processador i5 com 2,8 GHz e 4 GB de memória RAM.

Tabela 5.1: Tempo de treinamento dos algoritmos na rede Finlândia.

Algoritmo	Tempo em minutos
NrPSR(OSNR _{MAX})	2097
NrPSR(OSNR _{JE})	1752
NrPSR(CL)	1490
NrPSR(MaxK)	1544
PSR	726

Comparadas com os outros algoritmos, ambas as políticas propostas neste trabalho de conclusão de curso apresentaram um maior custo computacional na etapa de treinamento, porém é importante afirmar que esta etapa é realizada apenas uma vez, antes do funcionamento da rede óptica.

5.2 Comparação com outros algoritmos de roteamento

Após o término do treinamento, os algoritmos encontram-se otimizados para a realização da simulação de avaliação de desempenho da rede. Ambas as políticas proposta foram comparadas com outras duas políticas do NrPSR, o NrPSR(CL) e o NrPSR(MaxK), e quatro outros algoritmos de roteamento bem conhecidos: SP, MH, OSNR-R e o PSR. As Fig. 5.3 e Fig. 5.4 mostram a probabilidade de bloqueio em uma função da carga da rede para diferentes algoritmos de roteamento para as topologia Pacific Bell e Finlândia, respectivamente. Em ambas topologias simuladas, as abordagens do NrPSR baseadas na OSNR apresentaram melhores resultados quando comparados com os outros algoritmos de roteamento. Para a topologia Pacific Bell, o NrPSR(OSNR_{JE}) e o NrPSR(OSNR_{MAX}) superam todos os outros algoritmos de roteamento, principalmente para cargas de rede baixas. Para a topologia Finlândia, NrPSR(OSNR_{JE}) supera todos os outros algoritmos, incluindo a outra proposta NrPSR(OSNR_{MAX}). Isso ocorre porque essa abordagem balanceia a carga sobre a rede e também reserva recursos para o requisições de conexões futuras.

5.2 Comparação com outros algoritmos de roteamento

25

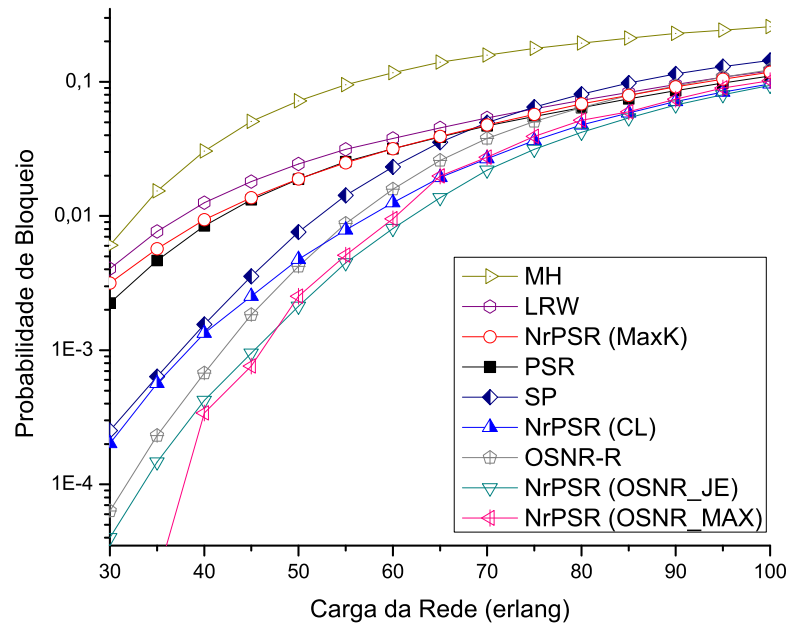


Figura 5.3: Comparação de probabilidade de bloqueio como uma função da carga da rede para diferentes algoritmos de roteamento na topologia Pacific Bell.

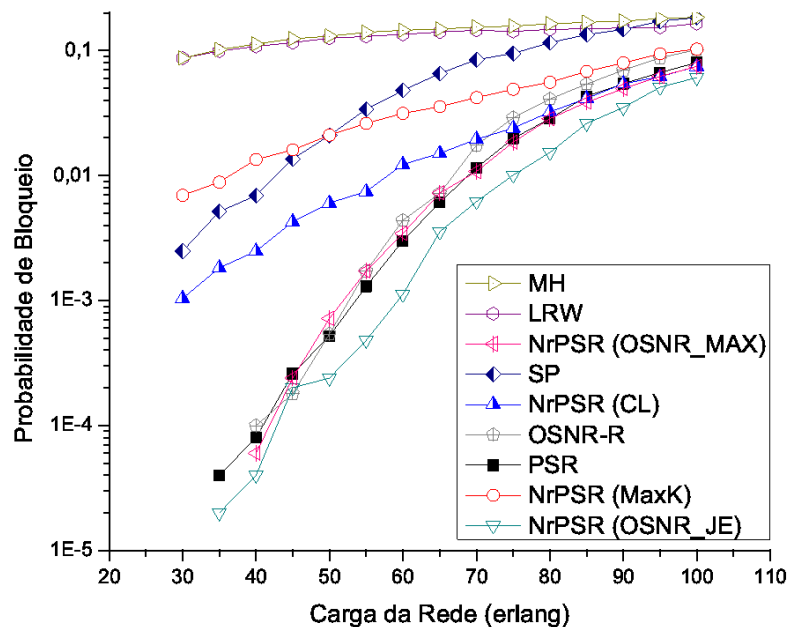


Figura 5.4: Comparação de probabilidade de bloqueio como uma função da carga da rede para diferentes algoritmos de roteamento na topologia Finlândia.

5.3 Análise de distribuição de carga

Os resultados exibidos na Seção 5.2 mostraram que as políticas propostas obtiveram melhores desempenho que outros algoritmos bem conhecidos da literatura. Além disso é possível notar que as abordagens baseadas na OSNR mantiveram o desempenho para cargas diferentes do processo de treinamento. Porém, ainda assim, é merecida a investigação da robustez do $\text{NrPSR}(\text{OSNR}_{\text{JE}})$ e $\text{NrPSR}(\text{OSNR}_{\text{MAX}})$ quando há flutuação de distribuição de carga na rede. A flutuação de carga resulta em um padrão de tráfego diferente do considerado na etapa do treinamento.

Para realizar a análise do comportamento do algoritmo considerando as variações de distribuição de carga foi usada a análise proposta por Chaves *et al.* [12]. Pode-se definir essa análise da forma: a partir de uma matriz de tráfego uniforme $\{T = \rho_{i,j}\}$ (usada durante a etapa de treinamento), é produzida uma variação na matriz de tráfego ($\{T' = \rho'_{i,j}\}$), a qual simula a distribuição da carga na rede ao longo do tempo. $\rho'_{i,j}$ é obtido da seguinte forma:

$$\rho'_{i,j} = (1 + r) \cdot \rho_{i,j}, \quad (5.1)$$

em que r é um valor aleatório com uma distribuição uniforme entre os intervalos $[-R, R]$, e R é a variação máxima permitida de carga entre os nós origem-destino. A matriz T' é normalizada para manter a mesma carga total da rede. Consequentemente, $R = 0$ corresponde ao caso de tráfego uniforme, $R \neq 0$ corresponde a um tráfego não-uniforme e $R = 1$ é o caso de tráfego não-uniforme onde a carga pode crescer ou diminuir em 100% para um determinado par de nós.

Para realizar a análise estatística do comportamento dos algoritmos de RWA foi usado $R = 1$ e definido como 60 erlang a carga base da rede. Para esta finalidade foi gerado um conjunto de 30 matrizes de tráfego diferentes e independentes. Para cada uma dessas matrizes, foram obtidas a probabilidade de bloqueio de cada algoritmo de RWA. Para o PSR e políticas do NrPSR, foram utilizados os valores de coeficientes b_{n_0, n_1} obtidos para o tráfego uniforme.

Foi utilizada a representação de *Box and Whisker* [21], conhecida também como *boxplot*, para a análise estatística dos algoritmo de RWA. Nessa representação, é possível visualizar 6 aspectos dos dados formados pelos seguintes valores: média, primeiro quartil (Q1), segundo quartil (Q2), terceiro quartil (Q3), valor máximo e mí-

nimo. Caso existam, também é possível visualizar os *outliers*. O Q1, Q2 e Q3 são os valores que, respectivamente, deixam 25%, 50%, 75% dos dados abaixo deles. Os *outliers* são valores atípicos, fora do padrão dos dados encontrados. A Fig. 5.5 exemplifica a representação *Box and Whisker* com suas respectivas informações.

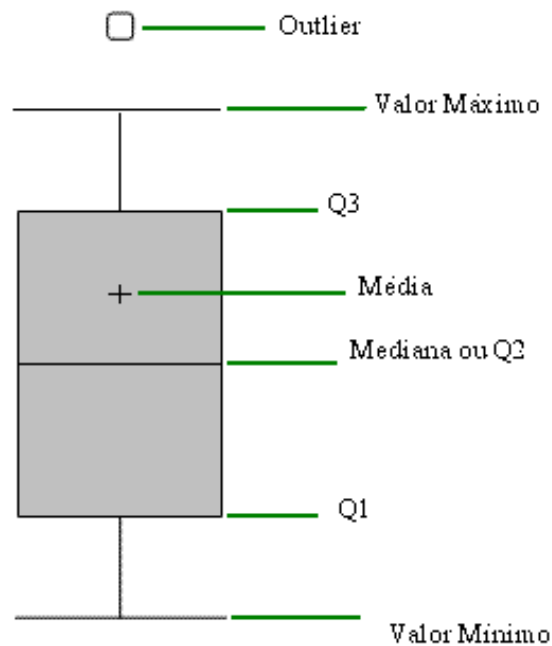


Figura 5.5: Representação de *Box and Whisker*.

As Fig. 5.6 e Fig. 5.7 mostram a análise de robustez para as topologias Pacific Bell e Finlândia, respectivamente. Em ambos os casos, pode-se observar que o NrPSR(OSNR_{JE}) obteve melhores resultados que os outros algoritmos. Ainda assim foi realizado o teste estatístico não-paramétrico de *Wilcoxon* com o nível de significância de 99% e este indicou que os resultados obtidos pelo NrPSR(OSNR_{JE}) são estatisticamente significantes quando comparado com os resultados obtidos pelos outros algoritmos de RWA. Assim, pelo menos para esses casos estudados, o NrPSR(OSNR_{JE}) é robusto e lida com flutuações de distribuição de carga além de obter a menor probabilidade de bloqueio.

5.3 Análise de distribuição de carga

28

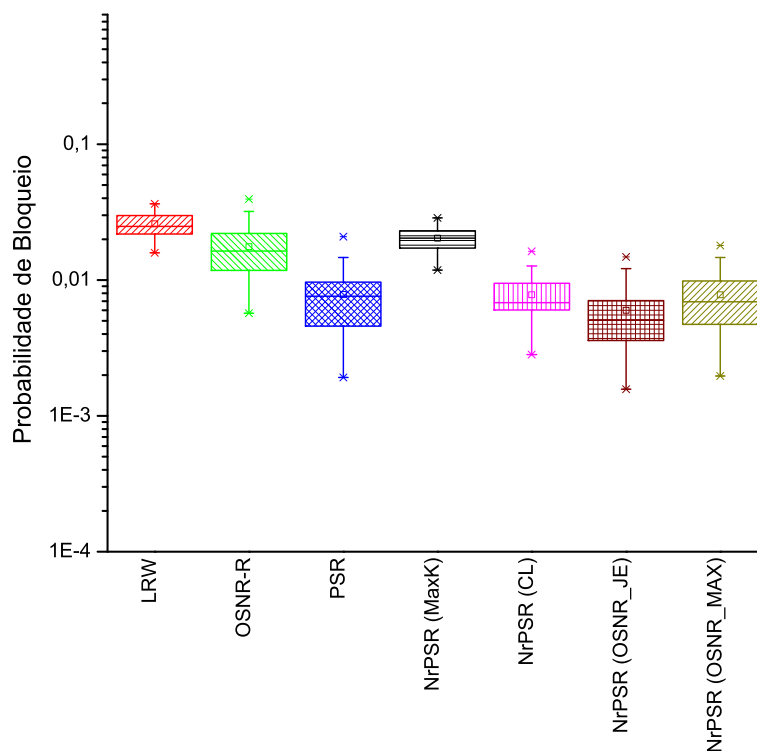


Figura 5.6: Resultados em *Box and Whisker* da probabilidade bloqueio para topologia Pacific Bell em que, $R = 1$ e $erl = 60$..

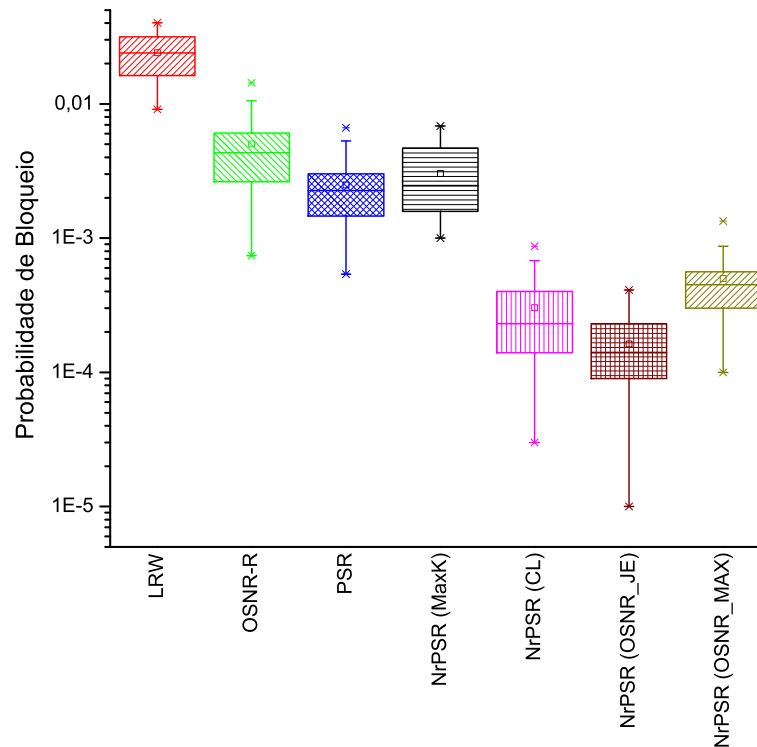


Figura 5.7: Resultados em *Box and Whisker* da probabilidade de bloqueio para topologia Finlândia em que, $R = 1$ e $erl = 60$..

6 *Conclusões e Trabalhos Futuros*

Neste trabalho de conclusão de curso foram propostas duas novas políticas que utilizam a OSNR do caminho óptico para serem utilizados em um algoritmo de IA-RWA adaptativo-alternativo para redes totalmente ópticas. Com a utilização da OSNR como critério de escolha, esperou-se encontrar rotas mais aptas para a requisição de conexão.

Neste capítulo, serão feitas considerações finais sobre os resultados encontrados com o comparativo feito com algoritmos de RWA bem conhecidos da literatura. Na Seção 6.2 são apresentados os trabalhos futuros. Por fim, na Seção 6.3 são apresentadas as publicações decorrentes deste trabalho.

6.1 **Contribuições e Conclusões**

As redes ópticas vêm surgindo como a solução para a crescente demanda de largura de banda decorrente da expansão da internet e dos seus serviços por apresentarem uma alta taxa de transmissão com um custo relativamente baixo. O roteamento é um dos grandes desafios desses sistemas, uma vez que existem várias rotas que podem interligar os nós origem e destino da conexão. Esse trabalho de conclusão de curso contribui com a área de roteamento em redes ópticas WDM, que vem sendo bastante estudada pela academia durante os últimos anos.

Neste trabalho foram desenvolvidas duas políticas de seleção de rota para o algoritmo IA-RWA adaptativo-alternativo NrPSR, denominadas $OSNR_{MAX}$ e $OSNR_{JE}$, ambas usam como critério de escolha a OSNR dos caminhos ópticos alternativos. A primeira, escolhe dentre as Nr rotas a que possuir o maior OSNR. A segunda, escolhe a primeira rota dentre as Nr rotas que possua um valor aceitável de OSNR. As propostas foram comparadas com outros algoritmos bem conhecidos em dois cenários diferentes. Nos dois cenários, as políticas propostas obtiveram os melhores

resultados, tendo o $NrPSR(OSNR_{JE})$ atingido os melhores resultados para variação de carga.

A partir de uma análise estatística, foi demonstrado que a eficácia das propostas não são abaladas se a distribuição do tráfego da rede é alterado, que pode ocorrer ao longo do tempo em redes ópticas reais. Ambos os algoritmos, $NrPSR(OSNR_{MAX})$ e $NrPSR(OSNR_{JE})$ necessitam de uma etapa de treinamento antes do funcionamento da rede para determinar os coeficientes b_{n_0, n_1} da série de potência. Todas as simulações foram realizadas utilizando a plataforma de simulação de redes ópticas SIMTON desenvolvido em cooperação pelas universidades federal e estadual de Pernambuco.

6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros dessa proposta, pode ser analisado o comportamento das políticas em redes ópticas translúcidas ou opacas, uma vez que toda a análise foi feita somente em redes totalmente ópticas. As políticas também podem ser portadas para serem aplicadas nas novas configurações de redes ópticas denominadas redes elásticas [22].

Trabalhos posteriores podem levar em consideração diferenciação de serviço, que não foi aplicada nas simulações realizadas. A diferenciação de serviço é usada para criar classes de clientes ou aplicações que possuem certo privilégios em suas requisições de conexão.

Por fim, além de roteamento de novas conexões, as propostas podem ser utilizadas em sobrevivência de redes ópticas [23], como algoritmos para serem usados em proteção e/ou restauração de falhas.

6.3 Publicações decorrentes deste trabalho

1. **Comparing OSNR based Policies for and Adaptive-Alternative Algorithm to All-Optical Networks.** Carmelo J. A. Bastos- Filho, Rodrigo C. L. Silva, Daniel A. R. Chaves, André V. S. Xavier e Joaquim F. Martins-Filho. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, JMOe (Submetido).

2. OSNR based Adaptive-Alternative IA-RWA Algorithm for All-Optical Networks.

Rodrigo C. L. Silva, André V. S. Xavier, Carmelo J. A. Bastos-Filho, Daniel A. R. Chaves e Joaquim F. Martins-Filho. 15º SBMO Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10º CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, MOMAG 2012, João Pessoa, Brasil. Volume 1. Páginas: 1-5.

Referências Bibliográficas

- [1] YANG, X.; RAMAMURTHY, B. Sparse regeneration in translucent wavelength-routed optical networks: Architecture, network design and wavelength routing. *Photonic Network Communications*, v. 10, n. 1, p. 39–53, 2005.
- [2] RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. *Optical networks: A practical perspective*. 3rd. ed. San Diego: Morgan - Kaufmann: , 2009.
- [3] RAMAMURTHY, B.; FENG, H.; DATTA, D.; HERITAGE, J.; MUKHERJEE, B. Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks. *Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication. OFC/IOOC '99. Technical Digest*, v. 1, p. 59 – 61, 1999.
- [4] MUKHERJEE, B. Optical communication networks: Progress and challenges. *Journal of Selected Areas in Communications*, v. 18, n. 10, p. 1810–1824, 2000.
- [5] M., G.; MURTHY, C. S. R. *Wdm optical networks: Concepts, design, and algorithms*. v. 1st ed., 2002.
- [6] ZANG, H.; JUE, J. P.; MUKHERJEE, B. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. *Optical Networks Magazine*, v. 1, n. 1, p. 47–60, 2009.
- [7] PEREIRA, H. A.; CHAVES, D. A. R.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; MARTINS-FILHO, J. F. OSNR model to consider physical layer impairments in transparent optical networks. *Photonics Network Communication*, v. 18, n. 2, p. 137–149, 2009.
- [8] DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.
- [9] WEN, B.; SHENAI, R.; SIVALINGAM, K. Routing, wavelength and time-slot-assignment algorithms for wavelength-routed optical wdm/tdm networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 9, p. 2598 – 2609, setembro 2005.
- [10] XAVIER, A.; SILVA, R.; BASTOS-FILHO, C.; MARTINS-FILHO, J.; CHAVES, D. An adaptive-alternative routing algorithm for all-optical networks. *Microwave Optoelectronics Conference (IMOC), 2011 SBMO/IEEE MTT-S International*, p. 719 –723, 29 2011-nov. 1 2011.
- [11] CHAVES, D. Algoritmos rápidos de irwa para redes totalmente Ópticas. *Dissertação (Mestrado) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco*, p. 104, 2008.

- [12] CHAVES, D. A. R.; AGUIAR, D. O.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; MARTINS-FILHO, J. F. A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks. v. 22, n. 2, p. 1–18, 2011.
- [13] DA SILVA, R. M. F. Roteamento em redes ópticas transparentes baseado em otimização por colônia de formigas com treinamento por otimização de enxames. *Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia da Computação, Universidade de Pernambuco*, p. 64, 2008.
- [14] KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: . Perth, Aust: IEEE, c1995. p. 1945–1948.
- [15] YEN, J. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Manegement Science*, v. 17, n. 11, p. 712–716, 2011.
- [16] BASTOS-FILHO, C.; SANTANA, R.; SILVA, D.; MARTINS-FILHO, J.; CHAVES, D. Hopfield neural networks for routing in all-optical networks. *12th International Conference Transparent Optical Networks (ICTON)*, p. 1–4, julho 2010.
- [17] CLERC, M.; KENNEDY, J. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions Evolutionary Computation*, v. 6, n. 1, p. 58 –73, feb 2002.
- [18] EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium of Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95*, p. 39–43, outubro 1995.
- [19] BRATTON, D.; KENNEDY, J. Defining a standard for particle swarm optimization. *Swarm Intelligence Symposium, 2007. SIS 2007. IEEE*, p. 120 –127, abril 2007.
- [20] CHAVES, D. A. R.; PEREIRA, H. A.; BASTOS-FILHO, C. J. A. E MARTINS-FILHO, J. F. Simton: A simulator for transparent optical networks. *Journal of Communication and Information Systems*, v. 25, p. 10, 2011.
- [21] LEHMANN, E. L. Nonparametrics: Statistical methods based on ranks. 2006.
- [22] ZHANG, G.; DE LEENHEER, M.; MOREA, A.; MUKHERJEE, B. A survey on ofdm-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 15, n. 1, p. 65 –87, 2013.
- [23] RAMAMURTHY, S.; SAHASRABUDDHE, L.; MUKHERJEE, B. Survivable wdm mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 21, n. 4, p. 870 – 883, abril 2003.