UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME MARTINS LOPES

CONTROLE E ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES DE COMUNICAÇÃO CONSIDERANDO INCERTEZAS DE MONITORAMENTO

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

GUILHERME MARTINS LOPES

CONTROLE E ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES DE COMUNICAÇÃO CONSIDERANDO INCERTEZAS DE MONITORAMENTO

Trabalho de Dissertação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Scalassara

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

L864 Lopes, Guilherme Martins
Controle e alocação de recursos em redes de comunicação considerando incertezas de monitoramento / Guilherme Martins Lopes. – 2016.
79 f. : il. color. ; 30 cm

Orientador: Fábio Renan Durand.
Coorientador: Paulo Scalassara.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2016.
Bibliografia: p. 74-79.

1. Comunicações ópticas. 2. Ruído. 3. Incerteza (Teoria da informação). 4. Engenharia Elétrica – Dissertações. I. Durand, Fábio Renan, orient. II. Scalassara, Paulo, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Biblioteca da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio

Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornelio Procopio
Diretoria de pesquisa e pós-graduação
Coordenação de pós-graduação em engenharia elétrica
Mestrado em engenharia elétrica

TERMO DE APROVAÇÃO

CONTROLE E ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES DE COMUNICAÇÃO CONSIDERANDO INCERTEZAS DE MONITORAMENTO

por

GUILHERME MARTINS LOPES

Esta Dissertação foi apresentada em vinte e quatro de agosto de dois mil e dezesseis como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

_____
(Prof. Dr. Fábio Renan Durand)
Prof. Orientador

_____
(Prof. Dr. Taufik Abrão)
Membro titular

_____
(Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi)
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico a Deus em primeiro lugar, porque sem ele nada é possível, e a meus familiares que sempre me deram forças e incentivaram minhas iniciativas profissionais e pessoais.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte desta importante fase de minha vida. Portanto, desde já, peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Renan Durand, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

À Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também o meu reconhecimento à minha família, porque sem o seu apoio seria muito difícil vencer este desafio.

Enfim, a todos que, de algum modo, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Eu denomino meu campo de Gestão do Conhecimento, mas você não pode gerenciar conhecimento. Ninguém pode. O que você pode fazer, o que a empresa pode fazer é gerenciar o ambiente que otimize o conhecimento. (PRUSAK, 1997).

RESUMO

LOPES, Guilherme Martins. **Controle e alocação de recursos em redes de comunicação considerando incertezas de monitoramento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, PR, 2016.

Neste trabalho, os efeitos das incertezas de estimativa de canal são considerados na otimização da relação sinal-ruído óptica (OSNR) em redes ópticas com multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). A otimização da OSNR aumenta a vazão da rede e a eficiência energética, permitindo minimizar o número de retransmissões em camadas superiores. Os algorítmos de otimização de OSNR estão relacionados com a estimativa de canal óptico realizada pelas combinações de monitores de desempenho ópticos (OPM), modelos analíticos e simulações numéricas. Além disso, as incertezas de estimativa são introduzidas por vários fatores, como a disponibilidade de informações de monitoramento, defeitos nos monitores, precisão, a imperfeição do modelo da camada física e a dinâmica de alocação de canal. Neste estudo, foi utilizada a otimização da OSNR baseada em técnicas heuríticas por enxame de partículas. Os resultados numéricos demonstraram a relação entre as incertezas na estimativa de erro de canal, média normalizada do erro quadrático (NMSE) e penalidade de potência. A metodologia desenvolvida pode ser utilizada para determinar o nível máximo de incertezas aceitáveis na estimativa de erro de canal de acordo com a penalização de potência permitida na otimização OSNR.

Palavras-chave: Redes ópticas. Relação ótica sinal-ruído. Incertezas. Algorítmo de Otimização.

ABSTRACT

LOPES, Guilherme Martins. **Power control in optical communication networks considering monitoring uncertainties**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Federal Technology University - Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

In this work, we investigate the effects of estimation uncertainties in the optimization of the optical signal-to-noise ratio (OSNR) at the wavelength division multiplexing (WDM) optical networks. The OSNR optimization increases the network throughput and energy efficiency and it enables to minimize the number of retransmissions by higher layers. The OSNR optimization algorithms are related to the optical channel estimation performed by the combinations of optical performance monitors (OPM) measurements, analytical models and numerical simulations. Furthermore, the estimation uncertainties are introduced by several factors such as the availability of monitoring information, monitoring accuracy, imperfection of physical layer and dynamic of channel allocation. Our numerical results have demonstrated the relation between the uncertainties in the channel error estimation, normalized mean squared error (NMSE) and power penalty. The developed methodology can be utilized to determinate the level of acceptable uncertainties in the channel error estimation according the power penalty permitted in the OSNR optimization.

Keywords: Optical networks. Optical signal noise ratio. Uncertainties. Optimization algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição de Controle de Potência 22

Figura 2- Rede óptica WDM com roteamento por comprimento de onda 32

Figura 3- Esquemático de um EDFA 36

Figura 4- Fibra com redução da influência do OH− e a faixa espectral dos amplificadores ópticos utilizado em diversas faixas do espectro óptico de baixa perda 37

Figura 5- Fluxograma de decisão para o problema de alocação de potência óptica 56

Figura 6- Topologia de rede do Sul da Finlândia com 12 nós e 19 links bi-direcionais 60

Figura 7- Taxa de convergência em função do número de iterações ……...63

Figura 8- OSNR média em função dos números de iterações ……...64

Figura 9- Potência transmitida em função do número de interações para erro de estimativa de canal de (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 40%, (e) 60% erro 67

Figura 10- NMSE para os números de interações considerando uma potência estática com incertezas de 10, 20, 40 e 60% 68

Figura 11- Evolução da penalidade de potência em função do número de iterações para rotas da Tabela II; canal de estima de erro de 10, 20, 40 e 60% 71

Figura 12- Evolução da penalidade de potência média em função do erro de estimativa 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação entre algumas das tecnologias de fabricação de elementos de comutação.....39

Tabela 2- Precisão requerida para monitoramento 48

Tabela 3- Rotas selecionadas da rede do Sul da Finlândia 60

Tabela 4- Parâmetros dos enlaces de fibra óptica 61

Tabela 5- Precisão requerida dos parâmetros de monitoramento.....61

Tabela 6- Parâmetros do PSO 62

LISTA DE SIGLAS

ANSI	Instituto Nacional de Padronização Americano (*American National Institute of Standardization*)
ASE	Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission*)
ATM	Modo de Tranferência Assíncrona (*Assynchronous Transfer Mode*)
BER	Taxa de Erro de Bit (*Bit Error Rate*)
CATV	Sistema de Televisão de Antena Comunitária (*Community Antenna Television*)
CD	Dispersão Cromática (*Cromatic Dispersion*)
DEMUX	Demultiplexador (*Demultiplexer*)
DGD	Delay de Grupo Diferencial (*Differential Group Delay*)
DWDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Denso (*Dense Wavelength Division Multiplexing*)
EDFA	Amplificador de Fibra de Érbio Dopada (*Erbium Doped Fiber Amplifier*)
FWM	Mistura de Quatro Ondas (*Four Wave Mixed*)
GMPLS	(*Generalized Mult-Protocol Label Switching*)
GVD	Dispersão da Velocidade de Grupo (*Group Velocity Dispersion*)
ICT	Tecnologias de Informação e Comunicação (*Information and Communication Technologies*)
IEC	Comissão Eletromecânica Internacional (*Internacional Electrotechnical Comission*)
IP	Protocolo de Internet (*Internet Protocol*)
ISI	Interferência Inter Simbólica (*Inter Symbol Interference*)
ITU-T	União Internacional de Telecomunicação (*Internacional Telecommunication Union*)
LCD	Display de Cristal Líquido (*Liquid Crystal Display*)
MEMS	Sistemas Mecânicos Micro Elétrico (*Micro Electro Mechanical Systems*)
MUX	Multiplexador (*Multiplexer*)
NMSE	Erro Quadrático Médio Normalizado (*Normalized Mean Square Error*)

OADM	Multiplexidor Óptico do Tipo Add/Drop (*Optical Add-Drop Multiplex*)
OLT	Terminal de Linha Óptica (*Optical Line Terminal*)
OPM	Desempenho de Monitores Ópticos (*Optical Performance Monitors*)
OSC	Canal de Supervisão Óptica (*Optic Supervision Channel*)
OSNR	Relação Sinal-Ruído Óptica (*Optical Signal to Noise Ratio*)
OXC	Conexão Cruzada Óptica (*Optical Cross-Connect*)
PA	Alocação de Potência (*Power Allocation*)
OCP	Circuitos Ópticos Planos (*Optical Circuits Plans*)
PMD	Dispersão por Polarização Modal (*Polarization Mode Dispersion*)
PP	Penalidade de Potência (*Power Penalty*)
PSD	Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density*)
PSO	Otimização Heurística por Nuvem de Partículas (*Particle Swarm Optimization*)
QoS	Qualidade de Serviço (*Quality of Service*)
QoT	Qualidade de Transmissão (*Quality of Transmision*)
RC	Taxa de Convergência (*Rate of Convergence*)
ROADM	Multiplexidor Add/Drop Óptico Reconfiguravel (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplex*)
RWA	Atribuição de Roteamento e Comprimento de Onda (*Routing and Wavelenght Assignment*)
SBS	Espalhamento de Brillouin Estimulado (*Stimulated Brillouin Scattering*)
SDH	Hierarquia Digital Síncrona (*Synchronous Digital Hierarchy*)
SIR	Relação Sinal-Interferência (*Signal to Interference Ratio*)
SNIR	Relação Sinal-Ruído mais Interferência (*Signal to Noise Plus Interference Ratio*)
SNR	Relação Sinal-Ruído (*Signal to Noise Ratio*)
SOA	Amplificadores Ópticos Semi-condutores (*Optical Amplifiers Semi-Conductors*)
SONET	Rede Óptica Síncrona (*Synchronous Optical Network*)
SRS	*Stimulated Raman Scattering*

SPM	Modulação por Auto-Fase (*Self Phase Modulation*)
VOA	Atenuadores Ópticos Variáveis (*Attenuators Optical Variables*)
XPM	Modulação Transversal (*Cross Modulation*)
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (*Division Multiplexing Wavelength*)
WSS	Chave Seletora de Comprimento de Onda (*Selector Switch Wavelength*)

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_i	Relação sinal ruído
p_i	Potência transmitida
A_j	Matriz de tráfego de rede
n_i	Potência de ruído
N_{ASE}	Ruído de cada amplificador
n_{SP}	Fator de emissão espontânea
h	Constante de Planck
f	Frequência da portadora
G_{amp}	Ganho do amplificador
B	Largura de banda óptica
$\mathbf{\Gamma}_{i,j}$	Matriz dos canais da rede
G_i^v	Ganho do canal
G_j^v	Ganho do canal interferente
P_0	Potência total permitida em cada fibra óptica
b_p	Coordenada individual de posição
v_p	Correspondente velocidade de vôo
ω	Peso da inércia da velocidade anterior
C_1	Coeficiênte de aceleração global
C_2	Coeficiênte de aceleração local
p_{th}	Posição da partícula
$\mathcal{P}$	Tamanho da população
V_{max}	Máximo fator de velocidade
$\omega_{initial}$	Inércia inicial
ω_{final}	Inércia final
L	Número de diferentes grupos de taxa de informações
K_l	Número de rotas
$\mathbf{p}[t]$	Potência obtida pelo PSO no instante *t*
$\mathbf{p}^*$	Potência ótima transmitida
RC	Relação da solução do PSO após a iteração t dividida pela solução PSO após a convergência total

$J[\mathbf{p}^*]$	Ótimo global da função objetivo considerada
$J[\mathcal{G}]$	Melhor alcançado pelo algoritmo com a função objetivo
PP	Penalidade de potência
ε	Estimativa de erro
ϑ_u	Precisão da informação
$\widehat{G_i}$	Canal estimado
G_i	Matriz de canal verdadeira
Δ_P	Precisão do equipamento de medidor de potência
Δ_{OSNR}	Medidor de OSNR
Δ_{PMD}	Medidor de PMD
Δ_{CD}	Monitoramento de dispersão cromática
θ_u	Disponibilidade de monitor óptico variável binário

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19

2 METODOLOGIA E DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS A SEREM REALIZADOS ... 23

3 ARQUITETURA E DISPOSITIVOS DAS REDES ÓPTICAS 25

3.1 EVOLUÇÃO DO SISTEMA WDM 25

3.1.1 Histórico das redes de primeira geração 25

3.1.2 Redes de segunda geração 26

3.1.3 Redes de terceira geração 29

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS REDES WDM 32

3.3 DISPOSITIVOS DAS REDES ÓPTICAS 33

3.3.1 Terminal de linha óptica – OLT 33

3.3.2 Amplificadores ópticos 33

3.3.2.1 *Amplificadores de Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)* 34

3.3.3 OADM e ROADM 36

3.3.4 OXC 38

4 EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO 40

4.1 MONITORAMENTO DE DESEMPENHO ÓPTICO PARA REDES ÓPTICAS .. 40

4.1.1 Deficiências em redes ópticas 41

4.1.1.1 *Falhas dos componentes e subsistemas* 41

4.1.1.2 *Restrições da Camada Física* 42

4.1.2 Aplicações com equipamentos de monitoramento.....45

4.1.3 Localização de falhas.....46

4.1.4 Critérios de avaliação para OPM 47

4.1.5 Técnicas OPM 48

4.1.5.1 *Potência óptica*.....48

4.1.5.2 *Relação óptica sinal-ruído*.....48

5 INCERTEZAS DE ESTIMATIVA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO 50

5.1 MODELO DO RUÍDO DE SINAL ÓPTICO.....50

5.2 ALGORÍTMO METAHEURÍSTICO PARA OTIMIZAÇÃO DA OSNR 51

5.3 ANÁLISE DE ERRO NA OTIMIZAÇÃO DA OSNR 54

5.4 MODELO DE INCERTEZAS DE ESTIMAÇÃO.....58

6 RESULTADOS.....60

CONSIDERAÇÕES FINAIS 73

REFERÊNCIAS.....75

1 INTRODUÇÃO

Com a modernização das redes de comunicações ópticas, será atendida uma gama cada vez maior de serviços com diferentes taxas de transmissão, duração de conexão, frequência de utilização e tempo de configuração. Devido ao rápido aumento em demandas de tráfego, tecnologias de transmissão e redes ópticas, tais serviços estão se movendo em direção a soluções mais eficientes, flexíveis e escalonáveis, as quais permitem o compartilhamento dinâmico e eficiente de recursos, como potência transmitida, largura de banda, taxa de transmissão entre outros. (KILPER *et al.*, 2014; BIRAND, *et al.*, 2014).

Estas redes devem fornecer a máxima utilização da infra-estrutura óptica existente, oferecendo largura de banda flexível e capacidade de atuação adaptativa (DOVERSPIKE; YATES, 2012). Além disso, é obrigatório para a próxima geração de sistemas ópticos aumentar a eficiência energética, uma vez que o aumento do consumo de energia em Tecnologias de Informação e Comunicação (ICT) tem sido continuamente observado devido ao crescente tráfego (TUCKER, 2011).

A capacidade do sistema óptico pode ser aumentada ainda mais se for utilizada a técnica da Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*). O WDM emprega a transmissão de diferentes comprimentos de onda em uma única fibra óptica.

Segundo Birand *et al..* (2014), a evolução dos equipamentos de camada de rede de fibra óptica que empregam o WDM tem proporcionado flexibilidade no que diz respeito ao ajuste das condições de ligação à rede e demandas de tráfego, no entanto redes ópticas são, na maior parte, estáticas ainda, devido às restrições físicas que são difíceis de serem previstas nos modelos matemáticos (SOLÉ-PARETA *et al.*, 2012). Estas deficiências são compostas pelos efeitos físicos lineares e não lineares (AGRAWAL, 2002). Explicita o mesmo autor que os efeitos lineares incluem emissão espontânea amplificada (ASE), a Dispersão por Polarização Modal (PMD) e de Dispersão de Velocidade de Grupo (GVD) ou efeitos de Dispersão Cromática (CD). As deficiências não-lineares incluem Modulação Auto-Fase (SPM), Modulação de Fase Cruzada (XPM) e Quatro Ondas de Mistura (FWM).

As rotas ópticas (*lightpaths*) são excepcionalmente modificadas devido a essas restrições (BIRAND, *et al.*, 2014; SOLÉ-PARETA *et al.*, 2012). Além disso, os algoritmos de alocação de recursos, tais como alocação de Roteamento e Comprimento de Onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*) e Alocação de Potência (PA), são feitos principalmente na etapa de planejamento, com significativo excesso de provisionamento. Na RWA, dado uma conexão que representa uma matriz de tráfego, o problema consiste em selecionar um caminho óptico, isto é, um caminho adequado e um comprimento de onda nos links desse caminho, para cada requerida ligação (DOVERSPIKE, YATES, 2012; SOLÉ-PARETA *et al.*, 2012). Por outro lado, a PA consiste na determinação do valor apropriado da potência transmitida para cada caminho óptico de acordo com o nível adequado de Relação Sinal-Ruído Óptica (OSNR) (BIRAND, *et al.*, 2014). No entanto as alterações são executadas em algoritmos *off-line*, que são caros e exigem tempo (DOVERSPIKE; YATES, 2012).

Neste trabalho, o problema PA aplicado à otimização OSNR é investigado considerando a complexidade computacional para a integração com o problema de otimização em RWA. O estabelecimento de lightpaths com um OSNR menor permite minimizar o número de retransmissões por camadas mais altas, aumentando, por esta via, o rendimento da rede e a respectiva eficiência energética (PAVEL, 2006; DURANT; ABRÃO, 2011). Para um tráfego dinâmico, o objetivo consiste em minimizar a probabilidade de bloqueio dos caminhos ópticos estabelecidos pelo encaminhamento, a atribuição de canais para manter um nível aceitável de potência óptica e OSNR adequada em toda a rede (PAVEL, 2006; PAN; PAVEL, 2014). Além disso, diferentes lightpaths podem viajar através de diferentes rotas e apresentarem diferentes requisitos de Qualidade de Serviço (QoS – *Quality of Service*). A QoS é relacionada com a OSNR, a dispersão, e os efeitos não lineares; podem ser representados pela Qualidade de Transmissão (QoT) (SOLÉ-PARETA *et al.*, 2012; PAVEL, 2006). Portanto, é desejável ajustar os parâmetros de rede, tais como a potência óptica transmitida, o ganho do amplificador, perdas nos Multiplexadores de Adição e Retirada de Comprimento de Onda (OADMs – *Optical Add-Drop Multiplex*), e de Conexão Cruzada Óptica (OXCs – Optical Cross-Connect) de uma maneira ótima (PAVEL, 2006; PAN; PAVEL, 2014; PAVANI *et al.,* 2008). A otimização OSNR poderia ser integrado com RWA, considerando-se o procedimento de otimização OSNR

implementado após o passo de encaminhamento e a atribuição caminho óptico ter sido estabelecida (PAVANI *et al.,* 2008). O esquema de interligação do plano de controle e gestão com os Monitores de Medições de Desempenho Ópticos (OPM – *Optical Performance Monitors*), ao longo das rotas ópticas, é ilustrado na Figura 1.

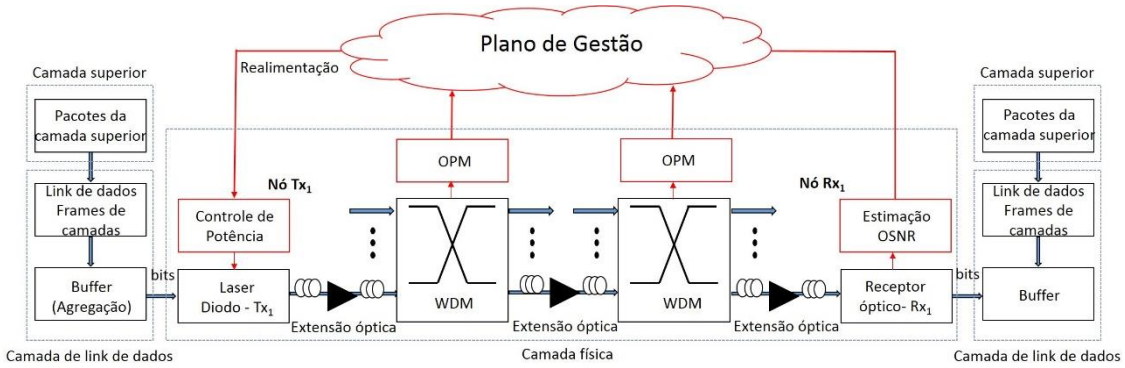


Figura 1- Distribuição de Controle de Potência

Os algoritmos de otimização OSNR estão relacionados com a estimativa de canal óptico no percurso das lighpath ou no nó receptor (PAVEL, 2006; PAVANI *et al.,* 2008). O processo de estimativa baseia-se em combinações e interpolações de medidas de OPMs, bem como em modelos analíticos e simulações numéricas para fornecer os parâmetros de Qualidade de Transmissão (*QoT – Quality of Transmission*) do sinal. As principais figuras de mérito de QoT são o OSNR e a Taxa de Erro de Bit (BER) (SOLÉ-PARETA *et al.*, 2012). A estimativa da QoT em cada nó é afetada diretamente pela forma do pulso transmitido, tipos de filtro e largura de banda. Estes elementos irão comprometer alguns parâmetros das amostras de sinal recebidas utilizadas nos processos de estimativa. Além disso, os processos de estimativa são afetados pelas deficiências do canal, especialmente GVD e PMD, e pela densidade espectral de potência do ruído (PSD) (AZODOLMOLKY *et al.*, 2011). Os efeitos de dispersão, tais como GVD e PMD, são mecanismos de degradação do sinal que afetam significativamente o desempenho global dos sistemas de comunicação óptica, bem como a degradação das medidas realizadas por OPM (KILPER *et al.*, 2010; AZODOLMOLKY *et al.*, 2010). Os efeitos de PMD representam uma grande restrição física, devendo ser considerada em redes

ópticas de alta capacidade , visto que dificilmente podem ser controlada devido a sua natureza dinâmica e estocástica (AGRAWAL, 2002). Por outro lado, as técnicas de medição OSNR poderiam ser afetadas por estes efeitos de dispersão na ligação de transmissão (PAN; YU; WILLNER, 2010). Portanto, as informações medidas sobre o ganho do canal utilizado pelo algoritmo de otimização OSNR poderiam ser deterioradas pelas incertezas causadas pelos efeitos do CD e PMD. As incertezas de energia de 1dB poderiam resultar em 20% de outros regeneradores na rede óptica (ZAMI; LEPLINGARD; BROGARD, 2008).

Neste contexto, a contribuição deste trabalho encontra-se na modelagem e avaliação dos efeitos de incertezas de estimativa do canal óptico na otimização da OSNR aplicada ao contexto de redes ópticas. As incertezas de estimativa dependem de vários fatores, tais como a disponibilidade de informações de monitoramento, imperfeição da camada física e dinâmica de alocação de canal (AZODOLMOLKY *et al.*, 2011; ZAMI; LEPLINGARD; BROGARD, 2008). O algoritmo utilizado para otimização da OSNR é baseado no algoritmo de Otimização Heurístico por Enxame de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*), que é atraente em função das características de desempenho-complexidade quando comparado a outras técnicas heurísticas, métodos numéricos ou métodos de inversão de matriz (PAN; YU; WILLNER, 2010; PACHNICKE, *et al.,* 2006).

2 METODOLOGIA E DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS A SEREM REALIZADOS

Neste estudo, que se propôs avaliar o efeito das incertezas de monitoramento entre as metodologias de algoritmos em métodos heurísticos, foi realizada, como delineamento, uma pesquisa bibliográfica. Quanto à natureza da pesquisa, é uma pesquisa tecnológica, que se caracteriza por ser um tipo de pesquisa científica aplicada.

Neste sentido, a contribuição deste trabalho consiste nna modelagem e na avaliação dos efeitos de estimativa de incertezas de monitoramento na otimização da OSNR aplicada ao contexto de redes ópticas WDM. As incertezas de estimativa dependem de vários fatores, tais como a disponibilidade de informações e exatidão de monitoramento, bem como as restrições da camada física e a dinâmica de alocação de canais podem afetar o nível de incerteza (BIRAND, *et al.*, 2014; AZODOLMOLKY *et al.*, 2011). A otimização da OSNR é baseada na alocação e controle do nível de potência transmitida em cada caminho óptico, sendo empregados métodos heurísticos como o PSO neste tipo de processo de otimização (ZAMI; LEPLINGARD; BROGARD, 2008).

Com esta pesquisa, pretende-se avaliar o uso de métodos de otimização heurísticos no tratamento de incertezas de monitoramento tendo em vista a manutenção ou melhorias no QoT, tais como BER, e eficiência energética (Power Allocation) e OSNIR. O algoritmo heurístico que será empregado é baseado na meta-heurística da PSO. A PSO é um algoritmo bioinspirado de otimização estocástica de base populacional para otimização com base no comportamento de grupos sociais, como cardumes de peixes ou bandos de aves (SOLÉ-PARETA *et al.*, 2012; CHLAMTAC *et al.*,1996). Esta abordagem apresenta características atrativas em termos de velocidade de convergência, complexidade computacional e qualidade dos resultados obtidos quando comparada com outros métodos de alocação de recursos que utilizam inversão de matriz, métodos puramente numéricos e outras abordagens heurísticas (PAN; PAVEL, 2014; KILPER *et al.*, 2010; AZODOLMOLKY *et al.*, 2010). O algoritmo é distribuído e autônomo, ou seja, usa o feedback descentralizado e apenas a estimativa de parâmetros QoT locais para atualização do algoritmo (DURAND, 2007; Kilper *et al.*, 2010; Azodolmolky *et al.*, 2010).

Sob esta perspectiva, o trabalho irá contribuir para modelagem e avaliação dos efeitos de estimativa de incertezas de monitoramento, tendo em vista a otimização da OSNR aplicada ao contexto de redes ópticas WDM.

Na seção três, serão discutidas as arquiteturas e dispositivos das redes ópticas em WDM. A seção quatro trata de equipamentos de monitoramento, ao passo que a alocação de recursos e a otimização da SNIR baseadas em inteligência e enxame de partículas, serão desenvolvidas na seção cinco. Os resultados numéricos serão discutidos na seção seis, considerando cenários de operação de rede, bem como uma breve discussão para cada resultado. E, finalmente, serão apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização do presente trabalho.

Parte deste estudo foi disseminado por meio da publicação do artigo listado abaixo:

Durand, Fábio R.; Lopes, Guilherme M.; Spagolla, A; Abrão, Taufik. Estimation Uncertainties in the Optical Signal-to-Noise Ratio Network Optimization. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 15, p. 1-17, 2016.

3 ARQUITETURA E DISPOSITIVOS DAS REDES ÓPTICAS

Esta seção constitui o referencial teórico sobre a tecnologia WDM como camada de transporte, assim como os dispositivos ópticos empregados e sua evolução.

3.1 EVOLUÇÃO DO SISTEMA WDM

3.1.1 Histórico das redes de primeira geração

As redes de comunicações baseadas na tecnologia de fibras óptica começaram a ser utilizadas na década de 1970 com o desenvolvimento de fibras com perdas de 0,47 dB/km (DURAND, 2007) e com o surgimento do primeiro sistema de CATV (*Community Antenna Television*) em 1976 na Inglaterra (GIOZZA; CONFORTTI; WALDMAN, 1991). Os primeiros sistemas de transmissão ópticos utilizavam padrões de tecnologias proprietárias na sua arquitetura, nos formatos de multiplexação, no *software* e *hardware*.

Com o intuito de adotar padrões e permitir a interoperabilidade entre diferentes fornecedores de equipamentos, o Padrão das Redes Ópticas Síncronas (SONET – *Synchronous Optical Network)* foi a solução adotada pelo Instituto Nacional de Padronização Americano (ANSI) como referência para as redes de comunicação ópticas. Para compatibilizar a transmissão mundial, começaram as primeiras pesquisas sobre a Hierarquia Digital Síncrona (SDH – *Synchronous Digital Hierarchy*) na Europa (BREGNI, 1998), contando com o envolvimento da União Internacional de Telecomunicações (ITU-T) (YIN; RICHARDSON, 2009).

Quando a tecnologia óptica passou a ser empregada em redes de sistemas de comunicação, as fibras ópticas eram utilizadas apenas como meio de transmissão em substituição ao cabo de cobre, já que possuíam características de transmissão mais vantajosas em relação aos meios guiados metálicos. As redes ópticas de primeira geração são caracterizadas por esta mudança e pelo estabelecimento do padrão SONET/SDH (ASS, 2004). Assim, este padrão está presente na maioria das redes de telecomunicações, visto

incorporar muitos benefícios como, por exemplo, a multiplexação mais simples dos sinais, a facilidade de gerenciamento da rede, interconexão de equipamentos de diferentes fabricantes, entre outros.

As funções de amplificação, repetição, comutação e roteamento das mensagens em redes SONET/SDH são feitas no domínio elétrico, utilizando circuitos eletrônicos. Estas redes utilizam apenas um único comprimento de onda para transmissão que, em geral, é de 1310 ou 1550 nm. São também utilizadas para a conexão de computadores que possuem taxas de *bits* mais modestas e podem ser introduzidos regeneradores opto-eletrônicos em caso da necessidade do aumento dos comprimentos dos enlaces ópticos (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). A regeneração destes sinais é conhecida como regeneração 3R (Realimentação, Reformatação e Retemporização), uma técnica que, além de amplificar o nível de potência, retoma a forma e a posição relativa dos pulsos dentro do intervalo de tempo atribuído a eles (HERBSTER, 2010).

O uso destes regeneradores limita as redes de primeira geração em termos de desempenho e manutenção, uma vez que cada dispositivo possui equipamentos eletrônicos com circuitos específicos para cada taxa de transmissão, dificultando a atuação dos *transponders* (dispositivo que transforma corrente elétrica em sinal óptico e vice-versa) presentes no enlace de comunicação.

Outra limitação deste tipo de rede é a utilização de apenas um canal por fibra, tecnologia esta que não se aproveita da largura de banda disponível na fibra. A evidente necessidade de tráfego intenso de informações fez evoluir as redes de primeira geração e passou a utilizar uma técnica que conta com diversos canais em uma única fibra, fator responsável pelo desenvolvimento das redes de segunda geração.

3.1.2 Redes de segunda geração

As redes ópticas WDM que não possuem a capacidade de rotear canais ópticos são classificadas como redes ópticas de segunda geração (RAMASWAMI, 2002). Este tipo de rede apresenta-se como uma boa alternativa

ao crescimento de utilização de banda, já que possibilita multiplexar vários canais WDM de diferentes usuários finais em uma única fibra. Neste contexto, aliadas às baixíssimas perdas na transmissão e à imunidade na interferência eletromagnética, as fibras ópticas possuem uma largura de banda extremamente alta (cerca de 25 Tbps na banda de 1550 nm). Entretanto apenas taxas de transmissão da ordem de 10 Gbps eram utilizadas em função da limitação dos *transponders*.

Uma tecnologia muito importante para promover o aumento do alcance da fibra óptica sem regeneração eletrônica é o amplificador da fibra dopada com Érbio EDFA (*Erbium doped fiber amplifier*), o qual tornou-se o elemento de amplificação mais utilizado nas redes atuais para transmissão a longa distância e com intenso tráfego de dados. Sua principal característica de operação é a capacidade de amplificação simultânea de vários canais ópticos. O EDFA é constituído por um pedaço de fibra com núcleo uniformemente dopado com íons de érbio Er^{3+}. Esses íons podem ser considerados como sistemas simples de dois níveis, ou seja, eles podem ter apenas dois estados de energia: um estado fundamental e um estado excitado. A amplificação óptica ocorre por meio de um processo denominado emissão estimulada. Para que ela ocorra, uma forte radiação eletromagnética de elevada energia e comprimento de onda adequado (geralmente de 980 nm ou 1480 nm) é propagado no núcleo da fibra a fim de excitar os seus íons. Os íons excitados pelos fótons do sinal de entrada têm uma certa probabilidade (dependendo do comprimento de onda dos fótons incidentes) de liberar energia por emissão estimulada de um fóton idêntico ao incidente. A liberação da energia estimulada leva o íon excitado ao seu estado fundamental.

Em sistemas WDM, os feixes de laser em diferentes comprimentos de onda (trazendo informações moduladas de cada usuário) são acoplados nos amplificadores EDFA e propagados na fibra juntamente com a radiação eletromagnética responsável pela excitação (pump). Enquanto esta “perda” de fótons para excitar os íons que se propagam, os sinais estimulados pela emissão “ganham” fótons. O espectro de absorção do érbio possui diversas faixas espectrais que podem ser utilizadas para o bombeio dos amplificadores. No entanto, por razões referentes ao mercado de lasers semicondutores, apenas as

duas faixas espectrais citadas são utilizadas (BECKER; OLSSON; SIMPSON, 1999).

Após o desenvolvimento dos EDFAs, o início da década de 1990 vivenciou a primeira geração de sistemas WDM comerciais. Estes sistemas comportavam entre 2 a 4 canais ópticos com espaçamento de 3 a 5 nm. Já no final desta década, foram criados sistemas WDM comerciais de 8, 16 e 40 canais, entre outros (DURAND, 2007). Sistemas WDM com um número de canais superior a 16 recebem a denominação WDM denso – DWDM, e, em 2002, os sistemas compostos por 64 canais já se encontravam operando (LIU *et al.*, 2002).

As redes desta geração passaram a apresentar maior flexibilidade em função da inserção e retirada de comprimentos de onda no domínio óptico. Este processo é executado por meio de filtros ópticos de alta seletividade, denominados Multiplexadores de Adição e Retirada de Comprimento de Onda (OADM – *Optical Add-Drop Multiplex*). Estes dispositivos permitem que comprimentos de onda sejam adicionados ou retirados em pontos ao longo de um enlace. Os primeiros dispositivos OADM eram estáticos, ou seja, retiravam apenas comprimentos de onda pré-determinados, o que, por sua vez, representava um problema de mobilidade e logística visto que se precisava possuir muitas unidades destes dispositivos em estoque para fins de troca e reposição.

A evolução dos sistemas ópticos causou desenvolvimento de OADMs remotos, que poderiam ter os comprimentos de onda de inserção e retirada, configurados de forma dinâmica.

Dentre as diversas topologias físicas disponíveis para as redes ópticas, as mais adequadas para executar essas funções são o barramento e a estrela. Porém, devido à adoção do SDH, a segunda geração de redes é baseada na topologia em anel (RAMASWAMI, 2002), que pode ser distinta em topologia física e topologia virtual. A primeira refere-se à presença de componentes, como fibras ópticas e acopladores, que interligam os nós da rede. A segunda pode ser representada por um grafo que descreve a trajetória da informação por todos os nós intermediários entre o nó origem e o nó destino para cada par origem-destino (LIMA, 2000).

A topologia virtual pode ser entendida como aquela vista pela camada cliente da camada fotônica. A configuração física em anel, para este arranjo de caminhos ópticos, é vista como uma topologia unifilar que pode ser uma rede IP (*Internet Protocol*), Transferência de Modo Assíncrono (ATM – *Assynchronous Transfer Mode*), etc. A topologia ATM foi desenvolvida nos anos de 1990 como uma solução de engenharia capaz de integrar as redes de dados com as redes de voz. Basicamente, as características que definem as redes ópticas de segunda geração são:

• Disseminação (*broadcast*) da luz por todos os nós da rede mediante o uso de topologias físicas que facilitem tal tarefa;

• Seleção do canal desejado na recepção por intermédio de filtragem óptica;

• Possibilidade de utilização de transmissores e/ou receptores sintonizáveis, acarretando a possibilidade de rearranjo da topologia de caminhos físicos. Se esta sintonia for suficientemente rápida, torna-se possível a comutação pacote por pacote.

3.1.3 Redes de terceira geração

O aumento de tráfego em função de recursos de multimídia e comunicação de dados dos últimos anos novamente fez com que as redes passassem por processos evolutivos, visando ao aumento de capacidade de transmissão. Observou-se que a transmissão ponto-a-ponto em anel não era mais suficiente, porque ocorriam muitas perdas e inviabilizavam-se os serviços da camada de aplicação do cliente final. A solução encontrada foi utilizar a topologia de rede WDM do tipo malha, visto que esta poderia fazer a comutação de caminhos ópticos baseados em comprimentos de onda nos nós ópticos, procurando seguir a melhor rota baseada em fatores como distância, qualidade, custo e confiabilidade de rotas específicas.

As redes de terceira geração, classificadas como redes que podem fazer o roteamento de canais ópticos, são também conhecidas como redes ópticas reconfiguráveis. As redes baseadas em roteamento de canais são consideradas como uma evolução das redes ponto-a-ponto (BERTHOLD *et al.*, 2008) e devem

prover caminhos ópticos para atender à solicitação entre pares de nós, cada qual utilizando diferentes comprimentos de onda dentro do enlace. Para que isto seja possível, foi necessária a colocação de dispositivos ópticos de adição, retirada e comutação de comprimentos de onda.

Após a evolução dos OADMs, o interesse por uma maior flexibilidade das redes ópticas levou ao desenvolvimento de dispositivos OXC. Este dispositivo, assim como o ROADM (*Reconfigurable* OADM), permite a reconfiguração óptica sob demanda. Sua função básica é conectar qualquer comprimento de onda que chega em uma das portas de entrada com outra interface de saída do dispositivo. Este dispositivo, entretanto, não possui entrada e saída adicionais para a adição e remoção de canais locais. Existem muitas tecnologias de fabricação de OXCs, porém a que tem representado melhores resultados é conhecida por Sistemas Mecânicos Micro Elétrico (MEMS – *Micro Electro Mechanical Systems*).

Esta tecnologia consiste na fabricação de espelhos microscópicos que são utilizados para desviar o sinal óptico para a direção desejada (MURAKAMI, 2010). Os espelhos são rotacionados por meio da aplicação de um sinal elétrico. Isso possibilita uma maior utilização da largura de banda por meio da possibilidade de alocar os comprimentos de onda que se encontram em trânsito no nó em comprimentos de onda específicos que não passarão nem pela conversão nem pelo processamento eletrônico. Tal processo permite que a quantidade de tráfego, processada eletronicamente pelo nó, seja melhor gerenciada, sendo processado apenas o tráfego correspondente aos comprimentos de onda que têm como endereço final o respectivo nó (KOBRISNKI; ZUCKERMAN, 1999).

O fato de os canais em trânsito não serem convertidos para o domínio elétrico é obtido pela introdução do roteamento no domínio óptico (comprimento de onda) realizado pelos OXCs.

Segundo Santos, Santos e Oliveira (2009), para a solução do problema de reconfiguração remota e automática na camada óptica, utilizam-se os ROADMs e OXCs reconfiguráveis citados, exigindo a instalação de outros dispositivos, como EDFAs, equalizadores de potência e chaves seletoras de canais, dentre outros. Uma rede com estas características possui limitações devido aos efeitos lineares e não lineares da fibra, assim como problemas com

os dispositivos de amplificação e roteamento, como a emissão espontânea amplificada ASE no caso dos EDFAs, *crosstalk* óptico no caso dos OXCs, entre outros.

As redes ópticas com roteamento por comprimento de onda, encontradas comercialmente, possuem arquitetura relativamente simples, de modo que as vantagens do roteamento óptico superem as suas limitações.

Uma rede óptica é ilustrada na Figura 2. Observe que existe um caminho óptico entre A e C por meio das chaves 1,6 e 7 fazendo a utilização do canal λ1. A mesma ideia se aplica aos outros caminhos. Observe que o caminho entre os nós D e E utiliza o canal λ1 até a chave 10, onde é convertida, e canal λ2 e, finalmente, em λ1 novamente até chegar ao nó E. Caso não existam conversores entre dois nós, o caminho óptico deve utilizar o mesmo comprimento de onda por todo o trajeto.

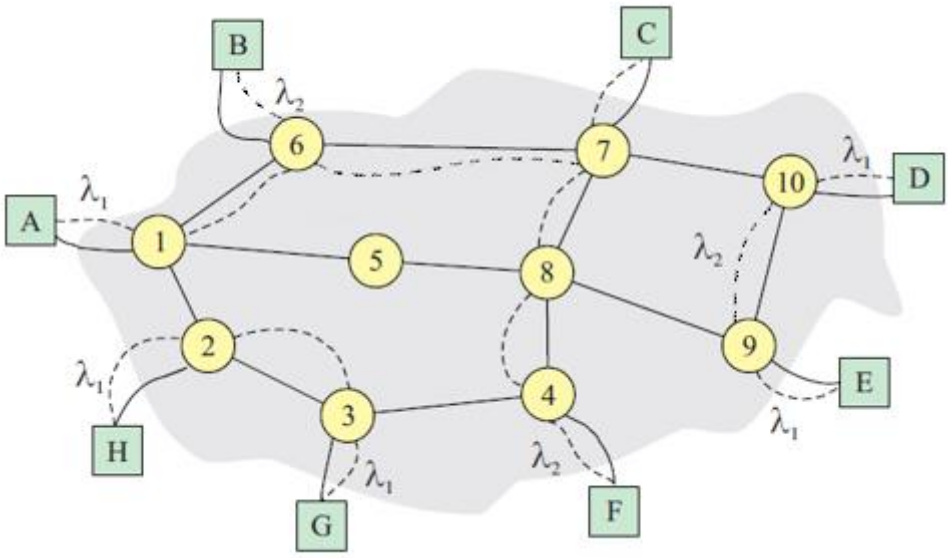


Figura 2- Rede óptica WDM com roteamento por comprimento de onda

É de fundamental importância que dois ou mais caminhos ópticos que utilizam a mesma fibra possuam diferentes comprimentos de onda, evitando assim interferência entre os sinais.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS REDES WDM

De acordo Genie (2003), ante os aspectos citados nas três gerações de redes acima, é cabível que suas características principais sejam formalizadas. As redes WDM com roteamento por comprimento de onda, considerada neste trabalho, basicamente, possuem os seguintes aspectos:

• Reutilização de comprimento de onda: O número de comprimentos de onda é limitado, entretanto podem ser reutilizados em diversos enlaces desde que dois caminhos ópticos não utilizem o mesmo comprimento de onda dentro do mesmo enlace. Esta possibilidade de reutilização aumenta a capacidade da rede por permitir que um grande número de caminhos utilize um número limitado de comprimentos de onda, contribuindo para que estas redes sejam escaláveis.

• Chaveamento: Os caminhos proporcionados pela camada óptica podem ser desativados ou mesmo ativados de acordo com as necessidades da rede. Trata-se de processo semelhante ao que ocorre em uma rede por comutação de circuitos, exceto pelo fato de que, na rede óptica, esse processo tende a ser bem mais rápido devido à grande diferença de largura de banda alocada.

• Confiabilidade: A rede pode, em caso de falha em algum enlace, rearranjar os caminhos ópticos existentes por rotas alternativas, evitando que a comunicação seja cessada. Para isso, é obrigatório que o tempo de reconfiguração seja muito pequeno, em geral da ordem de milissegundos. A maioria dos componentes utilizados, tais como MUX (Multiplexador) e DEMUX (Desmultiplexador), é passiva, o que torna a confiabilidade da rede aumentada.

• Transparência: Refere-se à capacidade dos caminhos ópticos de transportar dados em uma variedade de taxas, protocolos e formatos, suportando várias camadas superiores e que operam ao mesmo tempo. Assim, as redes podem transportar simultaneamente o trafego SONET/SDH, ATM e outros padrões como Ethernet (CHEN, 1999). Em uma rede óptica transparente, o sinal óptico é transmitido ao longo de nós intermediários sem a realização de conversão para o domínio eletrônico. Desta forma, o custo associado a uma comutação de alta velocidade em meio eletrônico é eliminado (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002).

3.3 DISPOSITIVOS DAS REDES ÓPTICAS

Para que o sinal transmitido seja corretamente entregue ao seu destino, uma série de dispositivos e tecnologias devem atuar na transmissão, manutenção e distribuição do sinal ao longo da rede. Estes dispositivos foram brevemente citados nos tópicos acima e serão abordados de forma mais detalhada neste item.

3.3.1 Terminal de Linha Óptica – OLT

Os OLTs são compostos por elementos como multiplexadores, demultiplexadores e transponders. O termo *transponder* é uma abreviação de transmitter/responder (transmissor-receptor). Na OLT, os amplificadores ópticos, do tipo elevador (*boost*) no transmissor e pré-amplificador no receptor, podem estar presentes de acordo com o projeto (LINS, 2004).

Por meio do transponder, é transmitido e recebido também um Canal Óptico de Supervisão (OSC – *Optic Supervision Channel*). O OSC é transportado em um comprimento de onda diferente dos comprimentos de onda que transportam tráfego na rede. Ele é usado para monitorar o desempenho dos dispositivos ao longo do enlace, assim como outras funções de gerenciamento (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2002). Os *transponders* podem ser: fixos ou sintonizáveis (ZERVAS *et al.,* 2009). Os transponders fixos transmitem e recebem sinais ópticos em um comprimento de onda específico, já os sintonizáveis transmitem e recebem sinal óptico em diversos comprimentos de onda presente na rede.

3.3.2 Amplificadores ópticos

O amplificador óptico é um dispositivo que amplifica diretamente o sinal óptico. A luz é diretamente amplificada e, como o sinal óptico é amplificado sem a conversão OEO, ocorre a diminuição da probabilidade de erro. A amplificação óptica não é dependente da velocidade ou do formato do código de transmissão.

Em um sistema WDM, o amplificador óptico amplifica todos os comprimentos de onda, permitindo a construção de sistemas WDM. Desta forma, os amplificadores ópticos, responsáveis pela amplificação direta da luz, permitem a expansão dos comprimentos das fibras entre a fonte dos dados e o destino.

Segundo Sharaiha (1998), os amplificadores podem ser construídos com tecnologia semicondutora, com tecnologia de guias de onda planares e com fibras. Os dois tipos de amplificadores em uso são os Amplificadores Ópticos Semicondutores (SOA) e os Amplificadores de Fibras Dopadas com Érbio (EDFA). Os EDFAs são os amplificadores mais importantes, têm baixo custo, alta eficiência e baixo ruído. O sinal óptico passa ao longo de um comprimento curto de uma fibra especial, sem deixá-la e sem convertê-la em sinal elétrico, e é amplificado (RIBEIRO, 2005).

3.3.2.1 *Amplificadores de Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)*

Os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFAs) são constituídos por alguns metros de fibra, em média 10 metros, dopados com um elemento químico raro, o Érbio, na forma do íon Er^{3+}. Quando essa fibra é alimentada com luz em um comprimento de onda específico, o érbio atua produzindo um ganho ao sinal óptico entrante. O princípio de funcionamento é justamente o do laser. Os íons de Érbio são capazes de existir em vários estados de energia. Quando um íon de Érbio está no estado de alta energia, um fóton de luz irá estimulá-lo a desistir de parte de sua energia, também em forma de luz, e retornar a um estado de menor energia e maior estabilidade. Isto é chamado de emissão estimulada. Para o funcionamento deste princípio, é necessário levar os átomos de Érbio ao estado de excitação. Portanto, um diodo laser gera um feixe de luz de alta potência entre 10 mW e 200 mW em um comprimento de onda, de forma que os íons de érbio absorvem a luz e mudam para o estado de excitação (HERBSTER, 2010).

Os EDFAs possuem as seguintes vantagens: alta eficiência na transferência de potência do amplificador para o sinal, amplificação direta e simultânea de uma grande região de comprimentos de onda, saturação de saída

maior que 1 mW, longo tempo de ganho constante, larga faixa dinâmica, baixa figura de ruído, independência de polarização e é adequado para aplicações em longa distância. As suas desvantagens são: dispositivos relativamente grandes, emissão espontânea de luz amplificada, *crosstalk* e saturação de ganho. Apesar do dispositivo ser alimentado por energia elétrica, a amplificação do sinal é totalmente óptica (HERBSTER, 2010).

Segundo Herbster (2010), o princípio básico do EDFA é mostrado na Figura 3. Em sua operação, um feixe de luz de alta potência é misturado com um sinal entrante que usa um acoplador seletivo de comprimento de onda. A luz misturada é guiada dentro de uma seção de fibra com os íons de érbio incluídos no núcleo. Esse feixe de luz de alta potência excita os íons de érbio para seus estados de alta energia. Quando os fótons pertencentes ao sinal, em um comprimento de onda diferente da fonte de luz, encontram os átomos de érbio excitados, estes desistem de parte de suas energias para o sinal e retornam aos seus estados de baixa energia. Isto não ocorre para todos os comprimentos de onda da luz do sinal, apenas uma faixa de 24 nm é amplificada.

Um ponto importante é que o érbio desiste de sua energia na forma de mais fótons, que estão exatamente em mesma fase e direção do sinal que está sendo amplificado. Desta forma, o sinal é amplificado somente em sua direção de transmissão. Com isto, toda a potência adicionada ao sinal é guiada no mesmo modo do sinal a ser amplificado na fibra. Existe ainda um isolador localizado na saída para prevenir as reflexões, retornando da fibra conectada. Estas reflexões atrapalham o funcionamento do amplificador, podendo até transformar o amplificador em um laser (HERBSTER, 2010).

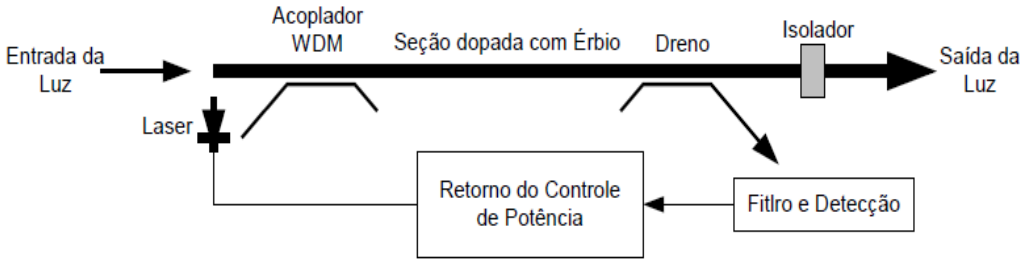
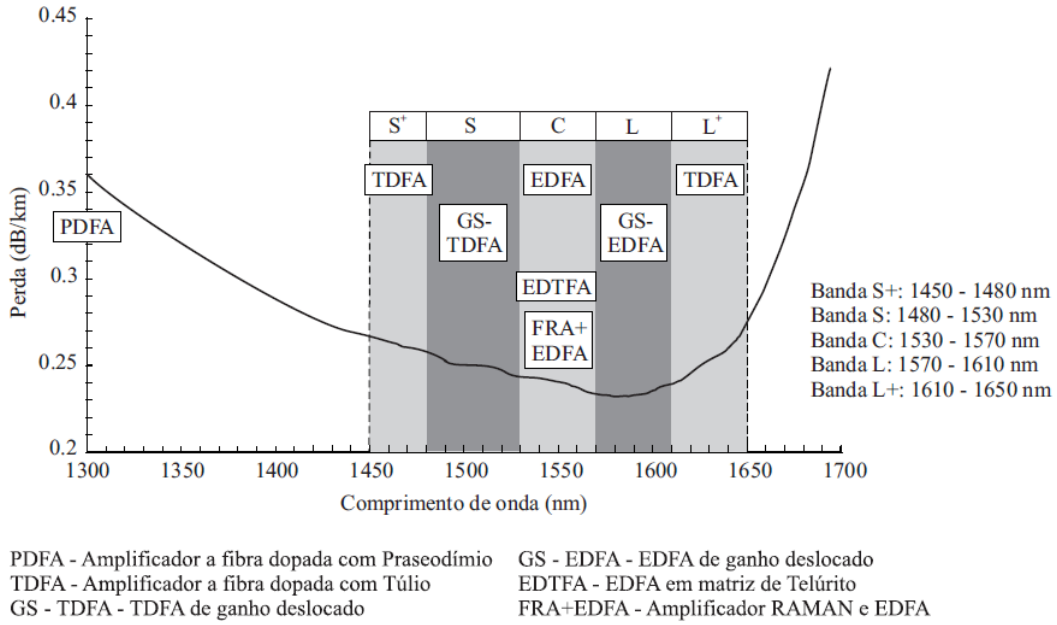


Figura 3- Esquemático de um EDFA

O amplificador óptico EDFA é o subsistema mais usado para amplificação de sinais ópticos em enlaces ópticos de longa distância. É o mais comum no cenário atual das redes ópticas por apresentar baixo custo e versatilidade de produção, além de amplificar os sinais ópticos em banda C. A Figura 4 ilustra o esquema das bandas ou janelas empregadas nos sistemas de comunicações ópticas.



Fonte: Herbster (2010)

Figura 4- Fibra com redução da influência do OH− e a faixa espectral dos amplificadores ópticos utilizado em diversas faixas do espectro óptico de baixa perda

3.3.3 OADM e ROADM

Os nós ópticos com funções de OADM e ROADM são peças essenciais no processo de evolução das topologias das redes ópticas transparentes. A função principal destes nós é permitir o acesso local (extração e inserção) dos canais ópticos agregados no sinal propagante (TZANAKAKI; ZACHAROPOULOS; TOMKOS, 2003). Os OADMs convencionais consistem em multiplexadores e demultiplexadores ópticos, interligados por meio de padrões

pré-definidos, de forma a realizar as operações de extração e inserção de canais numa forma fixa (AGRAWAL, 2005). No caso do ROADM, a matriz pode ser reconfigurada de forma local ou remota, dependendo da tecnologia utilizada. Quando utilizado com a finalidade de adição ou remoção de canais, o ROADM emprega uma tecnologia de comutação baseada em Circuitos Ópticos Planos (PLC – *Planar Lightware Circuit*).

Parte do sinal de entrada é desviada para o segundo DEMUX, que é responsável pela retirada de canais. A outra parte do sinal incidente segue para o módulo adicionador reconfigurável. Neste módulo, a parte do sinal de entrada que não foi retirada é demultiplexada. O módulo conta ainda com as entradas para a inserção de canais. Em geral, são adicionadas várias entradas que visam proporcionar maiores graus de liberdade para a manipulação dos nós. As chaves ópticas são responsáveis por selecionar qual sinal seguirá para o multiplexador e, consequentemente, para a saída do sistema. Os Atenuadores Ópticos Variáveis (VOA – *Variable Optical Attenuator*) têm a finalidade de fazer ajustes de potência do sinal, uma vez que, em redes WDM, é muito importante que se mantenham níveis de potência iguais entre os diferentes canais ópticos. Os níveis distintos de potência óptica entre os canais resultarão em efeitos de *crosstalk* e efeitos não lineares (SAYEED *et al.*, 2006). Os canais de adição/remoção ROADM são seletivos em frequência, isto é, somente comprimentos de onda pré-definidos podem ser adicionados/removidos em cada porta, e poderão operar em cooperação com filtro ajustável e laser ajustável.

Os ROADMs também podem ser utilizados no intuito de fazer a interligação de redes ópticas para se obter o controle de adição e remoção de canais presentes em outras redes se estiverem interconectadas. Isso possibilita a comutação de informações sem que ocorra perda de recursos, além de proporcionar reutilização de canais ópticos com níveis maiores de proteção da rede. Os ROADMs utilizados para esta finalidade utilizam uma tecnologia denominada Chave Seletora de Comprimento de Onda (WSS – *Wavelength Selective Switch*) (ROORDA; COLLINGS, 2008).

A chave seletora consiste de uma estrutura que pode ser 1 × *N*, ou seja, uma entrada e *N* saídas, ou ainda *N* × 1, desta forma, tem-se *N* entradas e uma saída. Este dispositivo é composto por multiplexadores e demultiplexadores e

tem sua matriz de comutação composta por chaves ópticas seletoras. Em um WSS, o sinal de entrada composto por vários comprimentos de onda, ao passar por um DEMUX, tem os comprimentos de onda separados e podem ser direcionados para qualquer um dos MUX de saída de acordo com a posição das chaves ópticas. A seleção das chaves pode ser feita de forma remota em algumas arquiteturas (ROORDA; COLLINGS, 2008). As chaves ópticas podem ser baseadas em plataforma MEMS, ou Display de Cristal Líquido (LCD – *Liquid Crystal Display*), que lhes garante ampla banda de operação (ROORDA; COLLINGS, 2008).

3.3.4 OXC

Assim como o ROADM, este dispositivo permite a reconfiguração de acordo com as necessidades de tráfego. A diferença, porém, está no fato de que os ROADMs são indicados para redes com topologias mais simplificadas (anel ou estrela por exemplo), não satisfazendo as necessidades de redes robustas com um grande número de comprimentos de onda circulante como as com topologia em malha. Um OXC suporta N × W conexões simultâneas, em que *N* representa o número de portas de entrada e *W* representa o número de comprimentos de onda (BERTHOLD *et al.*, 2008).

A Tabela 1 traz algumas das tecnologias utilizadas em matrizes de comutação ópticas. Com exceção da tecnologia MEMS 3D, todas as tecnologias listadas a seguir utilizam configurações do tipo *crossbar* em suas matrizes (YOO; QIAO; DIXIT, 2000; YOO, 2006; PAPADIMITRIOU; PAPAZOGLOU; POMPORTZIS, 2003; ZERVAS et al., 2009).

Tabela 1- Comparação entre algumas das tecnologias de fabricação de elementos de comutação

	Tempo de Comutação	**Escalabilidade**	**Aplicações**
Ópto-Mecânica	4ms	16 X 16	OCS, OBS limitada
MEMS Óptico	3D:~10ms; 2D:~3ms	3D:1000 X 1000; 2D:32 X 32	OCS, OBS limitada
Termo-Óptico PLC	~3ms	4 X 4	OCS, OBS limitada
Semicondutor Óptico	~30ns	4 X 4	OCS, OPS, OBS
WRS	~1ns	65.336 X 65.336	OCS, OPS, OBS
SOA *broadcast* e *select*	~1ns	32 X 32	OCS, OPS, OBS
SOA *cross point*	~1ns	4 X 4	OCS, OPS, OBS
Chave PLZT	~20ns	4 X 4	OCS, OPS, OBS
RAM óptica	~1ns	64 X 64	OCS, OPS, OBS

Fonte: Zervas *et al.* (2009).

4 EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO

O rápido crescimento da demanda em aplicações de alta velocidade requer mudanças nos conceitos e paradigmas das redes ópticas (BENLACHTAR *et al.*, 2007). A migração de um conceito de uma rede com conexões estáticas para uma rede com conexões dinâmicas, com elevado grau de interligação entre os nós, representa um desafio para projetistas e empresas de equipamentos para garantir redes ópticas de baixo custo, transparentes, com capacidade de reconfiguração integrada aos dispositivos de OPM e mecanismos de gerenciamento (BENLACHTAR *et al.*, 2007). Os níveis adequados de QoS estão relacionados com o estabelecimento de caminhos ópticos com níveis de OSNR aceitáveis, já que, desta forma, ocorre uma economia de recursos da rede, diminuindo o número de retransmissões por meio de camadas mais elevadas. Uma forma de obter níveis adequados de OSNR em cada conexão ocorre pela otimização dos recursos da rede (BENLACHTAR *et al.*, 2007). Os algoritmos de otimização de OSNR estão relacionados com a estimativa do canal óptico realizado pelas combinações de monitores de desempenho óptico (OPM), modelos analíticos e simulações. As incertezas de estimativa dos parâmetros monitorados são introduzidos por vários fatores, como a disponibilidade e precisão das informações de monitoramento, imperfeições da camada física e alocação dinâmica de canais.

4.1 MONITORAMENTO DE DESEMPENHO ÓPTICO PARA REDES ÓPTICAS

Em redes ópticas, os canais ópticos são dinamicamente comutados no domínio óptico e as informações transmitidas sobre circuitos que são denominados caminhos ópticos, que consistem de comprimentos de onda.

A fim de minimizar os efeitos das restrições de transmissão, é necessário definir caminhos ópticos adequados para cada demanda (que pode ser estático ou dinâmico) através de algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) que considerem as restrições da camada física (AZODOLMOLKY *et al.*, 2009). Entretanto, quando um caminho óptico é estabelecido, faz-se necessário o monitoramento da

qualidade do sinal por meio da implantação de monitores de desempenho óptico (OPM) (KILPER *et al.*, 2004), estrategicamente colocados na rede, para fornecer informações sobre o desempenho dos caminhos ópticos e o funcionamento da rede (AZODOLMOLKY *et al.*, 2009). Por outro lado, falhas como rompimentos acidentais na fibra podem causar degradação crítica no desempenho da rede, porque, além da perda específica de canais cujo caminho inclui a seção da fibra cortada, outros canais podem ser afetados devido à rápida mudança do nível de potência nas demais fibras. Neste sentido, pode ocorrer a transição em nível de potência em dispositivos como amplificadores ópticos. Desta forma, ocorre a propagação de sinais espúrios que afetam os demais caminhos ópticos da rede. As interações entre OPM e o sistema de controle de nível superior e do plano de gestão também são muito críticas para determinar a sua eficiência e reatividade para os diferentes eventos problemáticos que podem ocorrer na rede (TOMKOS *et al.*, 2008).

4.1.1 Deficiências em redes ópticas

As restrições na rede óptica podem ser classificadas em falhas dos componentes e subsistemas ou em restrições da camada física.

4.1.1.1 *Falhas dos componentes e subsistemas*

Segundo Dahan *et al*. (2010), as falhas de componentes e subsistemas podem ser causadas por equipamentos instalados indevidamente, bem como equipamentos defeituosos, mal configurados e envelhecimento de seus componentes. Estes aspectos levam a uma degradação da qualidade do sinal. Algumas das falhas dos componentes e subsistemas podem ser relatadas para o plano de controle através do uso do canal óptico de supervisão OSC, o qual transporta informação sobre o sinal óptico de múltiplos comprimentos de onda, assim como as condições dos elementos mais remotos de rede. Isto é habitualmente utilizado para atualizações de informações utilizadas pelo plano de controle.

A potência transmitida e o comprimento de onda dos transmissores ópticos é controlado pela realimentação do sinal no comprimento de onda ou medição da corrente de laser. Já a estabilidade dos lasers dos amplificadores ópticos é avaliada de forma similar aos transmissores, permitindo o relatório de falhas em relação a tais sistemas (DAHAN *et al*., 2011).

Os filtros ópticos podem ser concebidos com características térmicas ou atérmicas. Filtros ópticos térmicos têm subsistemas de controle de temperatura que são utilizados para assegurar a estabilidade do comprimento de onda, sendo esta característica empregada para verificar falhas. Filtros ópticos atérmicos são puramente elementos passivos e, portanto, não têm qualquer capacidade de auto monitorar as falhas.

De acordo com Dahan *et al*. (2011), as falhas em amplificadores ópticos relacionados com a falta de energia elétrica podem conduzir a uma redução no nível de OSNR com a diminuição do nível de ganho de potência ou podem promover efeitos não-lineares no caso do aumento do ganho do amplificador. Tal falha pode ser facilmente detectável e informada ao plano de controle pelo próprio amplificador, uma vez que a potência óptica é monitorada na entrada e saída dos amplificadores. Por outro lado, as alterações da curva de ganho do amplificador, que podem afetar o nível de OSNR de cada comprimento de onda, são dificilmente determinadas.

Finalmente, as alterações no nível de atenuação nas fibras ópticas causadas por fatores externos ou conectores ruins são condições difíceis de serem detectadas, embora o conhecimento da potência transmitida e recebida permita que sejam detectadas falhas ou perdas excessivas (DAHAN *et al*., 2011).

4.1.1.2 *Restrições da Camada Física*

Na fibra óptica, existem várias restrições da camada física relacionadas com a transmissão de sinal. Os efeitos destas restrições podem ser minimizados mediante o controle e otimização dos recursos da rede. As principais restrições consistem no ruído ASE, dispersão cromática, PMD, efeitos não-lineares e distorções dos filtros ópticos. A seguir, são discutidas as principais características destas restrições.

• Ruído ASE: O ruído ASE é a fonte mais comum de penalidade óptica e a principal causa limitante para o desempenho do sistema (WALKER *et al.*, 1991). Para diminuir as penalidades resultantes do ASE, os principais recursos têm sido a redução de perdas no sistema, bem como a utilização de amplificadores de baixo ruído.

• Dispersão Cromática (CD): Esta dispersão é um efeito linear que resulta da natureza dependente do índice de refração da frequência de uma fibra óptica. Assim, a diferença de velocidade entre os componentes espectrais provoca o alargamento temporal dos pulsos ao longo da propagação e consequentes Interferências Entre Símbolos (ISI – *Inter Symbol Interference*) com pulsos adjacentes. Este efeito limita a distância máxima alcançável que é inversamente proporcional ao quadrado da taxa de transmissão de bits para esquemas de modulação binária (AGRAWAL, 2001). Portanto, aumentar a taxa do bit por um fator de 4 conduz a uma redução de tolerância CD por um fator de 16. Se o CD não é um problema para os sistemas com taxa de transmissão de bits até 2,5 Gbps, a migração para sistemas de 10 Gbps exigiu a utilização de módulos de compensação de dispersão para aumentar o alcance da transmissão. A tolerância a 10 Gbps implica na compensação da CD residual, principalmente considerando a migração para sistemas com taxas maiores como 40 e 100 Gbps (MORITO *et al.*, 2006; RARING' *et al.*, 2004).

• Dispersão por Polarização Modal: A PMD tem a sua origem nas variações aleatórias da velocidade de propagação dos modos com polarização ortogonal na fibra (KOGELNIK, JOPSON; NELSON, 2002). O efeito desta restrição é o alargamento do pulso e o aumento da ISI. A PMD de primeira ordem resulta em Atraso de Grupo Diferencial (DGD – *Differential Group Delay*), identificada como sendo a diferença em tempos de chegada entre os dois estados de polarização. Estes efeitos apresentam características estocásticas dependentes da temperatura, pressão externa e com variação ao longo do tempo. O aumento da taxa de transmissão implica no aumento dos efeitos da PMD. A distorção induzida pela PMD é de grande importância para redes com taxa de transmissão de 40 e 100 Gbps (BRUYERE, 1996; BOFFI *et al.*, 2008). E o seu monitoramento e mitigação são essenciais para a operação adequada da rede (BUCHALI; BULOW, 2004). Por outro lado, os sistemas com taxa de

transmissão de 10 Gbps podem ser afetados pela PMD quando eles são implantados em fibras ópticas já instaladas, com um grande valor do coeficiente DGD (BENLACHTAR *et al.*, 2007).

O PMD pode ser compensado diretamente no domínio óptico, invocando dois índices de refração diferentes (birrefringente) DGD equalizadores, e pode ser alcançado com a concatenação dos controladores de polarização. Contudo, o bom funcionamento de equalizadores no domínio óptico exige monitorização das propriedades ópticas do sinal distorcido (ROY *et al*., 1999).

• Efeitos não-lineares: A fibra óptica é um meio de transmissão notavelmente linear, que exibe características de não-linearidade em função de elevados níveis de potência transmitida. A maior parte dos efeitos não-lineares nas fibras ópticas origina do efeito de Kerr, responsável por fenômenos como a SPM, XPM e FWM (AGRAWAL, 2001), que ocorre quando uma luz linearmente polarizada é refletida por uma superfície de um sólido magnético e é afetada pela magnetização desta, tornando-se elipticamente polarizada, com o eixo maior rotacionado por um ângulo em relação à polarização da luz incidente. Uma segunda classe de fenômenos não-lineares resulta da dispersão não elástica, na qual o campo óptico transfere uma parte da sua energia para o meio não-linear. Dois efeitos não-lineares importantes nas fibras ópticas se enquadram nesta categoria e ambos estão relacionados com o modo vibracional de excitação de sílica. Um seria o Espalhamento Raman Estimulado (SRS – *Stimulated Raman Scattering*), que, em geral, pode ser definido como um processo não linear capaz de transformar fibras ópticas em amplificadores Raman de faixa larga ou em lasers sintonizáveis. O Espalhamento Raman pode limitar o desempenho dos sistemas ópticos com muitos canais, transferindo energia de um canal para o outro. O outro efeito não linear importante nas fibras ópticas é o Espalhamento de Brillouin Estimulado (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*) (AGRAWAL, 2001). Em fibras ópticas típicas para telecomunicações, o limiar do SBS é de cerca de 1 mW, sendo, portanto, uma limitação para as comunicações ópticas. Trata-se de um efeito de suma importância para dispositivos fotônicos que usam efeitos ópticos não-lineares, como os amplificadores paramétricos e conversores de comprimentos de onda. Os efeitos SRS e SBS podem ser entendidos como o espalhamento de um fóton para um fóton de menor energia, de modo que a

diferença de energia aparece na forma de um fônon. A principal diferença entre esses dois tipos de espalhamento e que fônons ópticos participam no Espalhamento Raman, enquanto fônons acústicos participam no Espalhamento *Brillouin*. Os dois processos resultam em uma perda de potência na frequência incidente (ISLAM, 2002).

Na transmissão da fibra óptica, todos os fenômenos lineares e não-lineares interagem mútua e simultaneamente, tornando a sua discriminação mais difícil. Distorções de concatenação de filtros ópticos: Em uma rede óptica os comprimentos de onda transmitidos podem passar por vários dispositivos ópticos, tais como os multiplexadores, demultiplexadores, OXCs e OADMs. Estes dispositivos são compostos por filtros ópticos que são caracterizados por funções de transferência de amplitude e de fase não ideais. Desta forma, a passagem do sinal por vários filtros com este tipo de função transferência causa a degradação do sinal (HANSRYD *et al.*, 2002).

4.1.2 Aplicações e equipamentos de monitoramento

O avanço das redes ópticas está relacionado com o desenvolvimento de OPMs integrados aos planos de controle que atuam no gerenciamento do funcionamento e alocação de recursos destas redes. Segundo Mahlab & Dolev (2006), a utilização de OPMs é de extrema importância ao longo das fases do ciclo de vida de uma rede óptica. A primeira fase é o planejamento e provisionamento de rede, e o objetivo desta fase é proporcionar uma seleção de caminhos ópticos de acordo com a topologia da rede e as restrições previstas. Nesta fase, definem-se a alocação de equipamentos, dispositivos e componentes de forma otimizada com o intuito de economizar recursos. Sendo assim, entre estes recursos, define-se a alocação de OPMs de forma estratégica.

A etapa seguinte consiste na instalação de equipamentos compensadores para diminuir os efeitos das restrições da camada física e manter um nível de desempenho adequado na rede. Podem-se citar como equipamentos compensadores os PMD, ópticos equalizadores e outros (MAS; TOMKOS; TONGUZ, 2005). Estes equipamentos de compensação e monitoramento atuam

para localizar e diminuir os efeitos das falhas. Assim, quando uma falha for detectada, sua localização e natureza são precisamente identificadas, utilizando algoritmos baseados no conhecimento do desempenho da rede e o status do comprometimento. Neste contexto, novos caminhos ópticos são selecionados para redirecionar o tráfego afetado. Um dos meios para fornecer informações relevantes para o plano de controle é através da utilização da OSC (FERGUSON; O'SULLIVAN; KILPER, 2008).

4.1.3 Localização de falhas

O plano de controle é responsável por verificar as informações dos OPMs e atuar na identificação e restauração de falhas na rede óptica. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de processos de localização de falhas na rede.

Segundo Dahan *et al*. (2011), um dos principais desafios é a perda de sinal ao longo dos caminhos ópticos que não possuem regeneradores opto-eletrônicos em cada nó da rede. Isso faz com que a identificação e localização da falha seja uma tarefa desafiadora. Enquanto mecanismos de proteção e restauração podem lidar com perda no tráfego sem o conhecimento exato do tipo de falha e localização, a maior parte do tempo necessário para a restauração de falhas é gasto em encontrar a causa precisa. Podem-se diferenciar entre falhas que são relatadas pelos elementos da rede através dos sistemas de gestão e aqueles que não são. Se alguma avaria pode ser detectada de forma efetiva, o próprio equipamento vai implementar um subsistema de diagnóstico e relatar esses tipos de falhas imediatamente. Para outras falhas relacionadas com o aumento de ruído, é requerido o monitoramento do OSNR, que apresenta um custo muito elevado. Estes tipos de degradações, geralmente, não são diagnosticados pelos próprios equipamentos (WANG *et al.*, 2007).

As falhas podem ser classificadas como falhas fortes (*hard*) ou suaves (*soft*). As falhas fortes referem-se às situações de perda súbita de sinal e as suaves referem-se a falhas de degradação de sinal e desempenho. Falhas suaves que não são relatadas podem ser muito difíceis de se detectar e muito difíceis de serem localizadas com precisão. As falhas podem ser detectadas utilizando vários dispositivos de monitoramento. Estes dispositivos variam de

fotodetectores simples (WANG *et al.*, 2007), monitores de OSNR e monitores de BER que atuam na terminação de cada caminho óptico. Outros OPMs mais avançados podem monitorar especificamente CD residual (BENLACHTAR *et al.*, 2007).

4.1.4 Critérios de avaliação para OPMs

Os fatores básicos comumente usados para avaliar técnicas de monitoramento são robustez, escalabilidade e custo. Estes fatores são ainda analisados sob critérios mais específicos. Neste sentido, as técnicas de monitoramento podem ser caracterizadas quanto à sensibilidade, precisão, tempo de aquisição e variações, como mudanças de temperatura e envelhecimento.

Os OPMs devem reportar as condições de funcionamento da rede em tempo real para o plano de controle. Neste sentido, dois parâmetros para análise relacionados ao tempo são definidos para OPMs: tempo de varredura e tempo de análise. O tempo de varredura é definido como aquele necessário para realizar as medidas e processá-las, já o tempo de análise representa o tempo entre duas medidas consecutivas da mesma grandeza física (YAMAZAKI *et al.*, 2009). Estes tempos devem ser muito curtos, já que nenhum equipamento do núcleo da rede pode estar indisponível por mais de cinco minutos por ano. Portanto, os OPMs devem ser capazes de realizar a varredura completa de todos os canais com um período tempo de varredura menor que 120s. Em um curto período de tempo, pode comprometer a precisão da medição, especialmente quando a análise estatística é necessária (YAMAZAKI *et al.*, 2009).

Outro parâmetro importante do OPM é a precisão e a sua robustez às operações de condições reais da rede. Imprecisões podem levar a prognósticos incorretos e custos extras no dimensionamento da rede. Pesquisas mostram que 1 dB de imprecisão da estimação na qualidade do sinal pode levar a um sobre dimensionamento de uma rede em aproximadamente 20% de recursos adicionais com equipamentos de regeneração. A Tabela 2 mostra o nível de precisão requerido em diferentes parâmetros para monitorar de maneira precisa a rede (DAHAN *et al.*, 2011).

Tabela 2- Precisão requerida para monitoramento

Parâmetros de Monitoramento	Precisão Requerida
Medidor de potência	< ± 0,5 dB
Monitor de OSNR	< ± 0,5 dB
Monitor de PMD	< ± 7,0 %
Monitor de CD	< ± 2,0 %

Fonte: Dahan *et al.* (2011)

4.1.5 Técnicas OPMs

4.1.5.1 *Potência óptica*

Monitores de potência óptica são os mais implantados em redes ópticas por causa de seu baixo custo e relativa simplicidade. A potência óptica nos canais é medida pela utilização de divisor de potência que recolhe uma pequena fração da potência de sinal (<5%) e fotodetectores de baixa frequência. A potência total dos canais pode ser medida, assim como a potência individual de cada canal. Nesse caso, um filtro sintonizável com um único fotodetector ou um conjunto com demultiplexador e uma matriz de fotodetectores podem ser utilizados (YAMAZAKI *et al.*, 2009; TOLSTIKHIN *et al.*, 2004). Os monitores de potência óptica são colocados em quase todas as localizações estratégicas da rede óptica, tais como transmissores *multiplex/demultiplex*, ópticos amplificadores, OXCs e receptores ópticos (YAMAZAKI *et al.*, 2009).

4.1.5.2 *Relação sinal-ruído óptico*

O monitoramento preciso da relação sinal-ruído óptico é essencial para um gerenciamento apropriado de redes WDM. É um parâmetro importante a ser monitorado para obter a estimativa de qualidade do sinal na camada óptica. Além disso, a OSNR pode ser utilizada para estabelecimento de enlace e otimização, análise da fonte de problemas de um sistema, localização e detecção de falhas, ativação do mecanismo de resiliência, etc. (CHEN *et al.*, 2002).

Diversas técnicas para monitorar OSNR baseiam-se no padrão 61280-2-9 definido pela IEC (*Internacional Electrotechnical Commission*). A medida é realizada por meio da diferença entre a potência do sinal e a potência média do ruído na metade da distância espectral entre dois canais. Segundo Lee *et al*. (2001), esse método é chamado de medida de OSNR fora da banda (*out-of-band* OSNR). O ruído ASE é medido entre dois canais, interpolado no comprimento de onda do sinal.

Em redes dinamicamente reconfiguráveis, os comprimentos de onda são inseridos/retirados ou trocados na camada óptica, passando por diferentes caminhos e números de amplificadores. Devido à filtragem óptica que ocorre em diversos elementos (tais como em multiplexadores e demultiplexadores), o espectro do ruído pode não ser uniforme e o nível de ruído acumulado pode variar de canal para canal. Dessa forma, a medida da OSNR na largura de banda do sinal não pode ser realizada pela técnica convencional de interpolação linear. Para superar essa limitação, é necessário medir a potência do ruído no interior do canal óptico da banda passante para obter uma medida OSNR confiável (KIM *et al.,* 2004).

5 INCERTEZAS DE ESTIMATIVA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

Os algoritmos de optimização de OSNR estão relacionados com a estimativa de canal óptico ao longo do percurso do caminho óptico (*lighpath*) ou no nó receptor (PAVEL, 2006; PAVANI *et al*., 2008). O processo de estimativa é baseado em combinações e interpolações de medições ópticas de OPMs, bem como em modelos analíticos e simulações (PAN; YU; WILLNER, 2010; PACHNICKE *et al.,* 2006). As principais figuras de mérito de QoT são o OSNR e a BER (SOLÉ-PARETA *et al.*, 2012). A estimativa da QoT em cada nó é afetada diretamente pela forma do pulso transmitido, tipos de filtros ópticos e largura de banda. Estes elementos irão comprometer alguns parâmetros da distribuição de amostras do sinal recebido e utilizado nos processos de estimativa. Segundo Azodolmolky *et al.* (2011), os processos de estimativa são afetados pelas restrições do canal, especialmente CD e PMD, e pela Densidade de Potência de Ruído Espectral (PSD). As incertezas de estimativa dependem de vários fatores, tais como a disponibilidade de informações de monitoramento, acompanhamento da exatidão, a imperfeição de modelos físicos e dinâmica de alocação de canais (AZODOLMOLKY *et al*., 2011; ZAMI; LEPLINGARD; BROGARD, 2008).

5.1 MODELO DE RELAÇÃO SINAL-RUÍDO ÓPTICO

Um enlace em uma rede óptica é representado pelo conjunto de *N* intervalos denominados *spam*, sendo que cada spam inclui a fibra óptica e um amplificador óptico. No enlace, um grupo de *M* canais (comprimentos de onda) de intensidade modulada são multiplexados e transmitidos através do enlace. A OSNR para cada comprimento de onda é dada por (PAN; PAVEL, 2014):

$$\gamma_i = \frac{p_i}{\sum_{j \in M} A_j \Gamma_{i,j} p_j + n_i} \tag{1}$$

sendo p_i a potência transmitida por canal, p_j a potência transmitida dos canais que interferem na mesma rota, A_j representa a matriz de tráfego da rede e n_i é

a potência do ruído determinado pela ASE acumulado na cadeia de amplificadores ópticos percorridos pelo canal *i*. A modelagem de ruído n_i é obtido de acordo com o modelo recursivo, apresentado em Pavani *et al.* (2008). A contribuição da potência de ruído de cada amplificador N_{ASE} é dada por:

$$N_{ASE} = n_{SP} hf\left(G_{amp} - 1\right)B \tag{2}$$

sendo que n_{SP} é o fator de emissão espontânea, geralmente cerca de 2-5, h é a constante de Planck, f é a frequência da portadora, G_{amp} é o ganho do amplificador e B é a largura de banda óptica. A matriz dos canais na rede é dada por (PAN; PAVEL, 2014):

$$\Gamma_{i,j} = \sum_{\upsilon=1}^{N} \frac{G_j^{\upsilon}}{G_i^{\upsilon}} \frac{N_{ASE\upsilon,i}}{P_0} \tag{3}$$

sendo G_i^{υ} o ganho do canal e G_j^{υ} o ganho de canal interferente. Nestes ganhos do canal, foram considerados o ganho de cada amplificador no enlace e as perdas de fibras ópticas. P_0 é a potência total permitida em cada fibra óptica com o intuito de mitigar os efeitos não lineares. Esta matriz tem a diagonal principal com elementos igual a zero, enquanto os elementos fora desta diagonal são dependentes de parâmetros da rede óptica específica (PAVEL, 2006).

5.2 ALGORITMO METAHEURÍSTICO PARA OTIMIZAÇÃO DA OSNR

O enxame de partículas (PSO) é um algoritmo de otimização estocástica populacional para otimização global com base no comportamento dos grupos sociais, como cardume de peixe ou em bandos de aves, que foi apresentado pela primeira vez em 1995 (KENNEDY; EBERHART, 1995). Em geral, o desempenho do PSO para problemas de alocação de recursos pode garantir a convergência rápida em menos iterações comparadas com outras técnicas computacionais. O desempenho do PSO é altamente dependente do ajuste de

seus parâmetros em função do tipo de problema abordado (NEDJAH; MOURELLE, 2006).

Para Zielinski *et al.* (2009), na evolução do algoritmo do PSO, cada partícula mantém o controle de suas coordenadas no espaço de interesse e estão associadas com a melhor solução que alcançou a cada iteração. Outro valor rastreado, pela versão global do otimizador de enxame de partículas, é o melhor valor global e sua localização, obtidos até o momento considerando todas as partícula na população. Em cada iteração, tempo, etapa, o PSO consiste em mudanças de velocidade e posição de cada partícula, e depende do desenvolvimento de procedimentos heurísticos para a evolução do vetor **p**, a fim de alcançar os valores de potência ótimos.

O algoritmo PSO aplicado ao controle de potência em redes ópticas, pode ser descrito como:

- Início
    - Para cada partícula $\mathbf{p} = 1, 2, \dots, \mathcal{G}$:
        - Iniciar a posição da partícula mediante um vetor aleatório uniformemente distribuído: $\mathbf{b}_p \sim U(\mathbf{b}_{min}, \mathbf{b}_{max})$, onde $\mathbf{b}_{min}$ e $\mathbf{b}_{max}$ são o limite inferior do espaço de pesquisa e o limite superior do espaço de pesquisa, respectivamente.
        - Inicializar a melhor posição conhecida da partícula em sua posição inicial:

$$\mathbf{b}_p[t] = \mathbf{b}_i[t]$$

    - Se $f(\mathbf{b}_g[t]) < f(\mathbf{b}_i[t])$, atualizar a melhor posição global conhecida $\mathbf{b}_g[t] \leftarrow \mathbf{b}_p[t]$;
        - Inicializar a velocidade da partícula: $\mathbf{v}_i \sim U(-|\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{min}|, |\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{min}|)$;
    - Enquanto não se cumprir o critério de parada definido por um limite máximo de interações ou por uma solução satisfatória, repetir:
        - Para cada partícula $\mathbf{p} = 1, 2, \dots, \mathcal{G}$:
        - Para cada dimensão $t = 1, \dots, n$:
            - Escolher número aleatórios: $\mathbf{U}_{p1}, \mathbf{U}_{p2} \sim \mathbf{U}(0,1)$
            - Atualizar a velocidade da partícula

$$\mathbf{v}_p[t+1] = \omega[t] \cdot \mathbf{v}_p[t] + C_1 \cdot \mathbf{U}_{p1}[t]\left(\mathbf{b}_p^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]\right) + C_2 \cdot \mathbf{U}_{p2}[t]\left(\mathbf{b}_g^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]\right)$$

        - Atualizar a posição da partícula $\mathbf{b}_p[t+1] = \mathbf{b}_p[t]$
- Se $f(\mathbf{b}_p[t]) < f(\mathbf{b}_i[t])$, então:
    - Atualizar a melhor posição global conhecida:$\mathbf{b}_g[t] = \mathbf{b}_i[t]$
- Se $f(\mathbf{b}_g[t]) < f(\mathbf{b}_i[t])$,
    - atualizar a melhor posição global $\mathbf{b}_g[t+1] = f(\mathbf{b}_g[t])$
    - Devolver g como a melhor posição global encontrada.

O índice da partícula é representado por $\mathcal{P}$. Assim, $\mathbf{v}_i(t)$ é a velocidade da partícula $\mathcal{P}$ em um determinado instante t. Os parâmetros ω, C_1 e C_2 $(0 \leq \omega \leq 1{,}2, 0 \leq \varphi_p \leq 2$ e $0 \leq \varphi_g \leq 2)$, devem ser determinados com critério pelo próprio usuário do algoritmo, pois controlam o comportamento e a eficácia do modelo da PSO, sendo determinantes para o bom rendimento do algoritmo, conforme em (CLERK; KENNEEDY, 2002) e podem ser definidos por diversos cenários de otimização (GUDISZ; VENAYAGAMOORTHY, 2003). Os valores de $\mathbf{U}_{p1}$ e $\mathbf{U}_{p2}$ são aleatórios, sendo obedecido $(0 \leq \mathbf{U}_{p1} \leq 1$ e $0 \leq \mathbf{U}_{p1} \leq 1)$ e podem mudar a cada iteração. O valor de $\mathbf{b}_p^{best}[t]$ é a melhor solução candidata individual para a partícula i em um determinado instante t e $\mathbf{b}_g^{best}[t]$ g_d é a melhor solução candidata global no instante de tempo t.

$$\mathbf{v}_p[t+1] = \omega[t] \cdot \mathbf{v}_p[t] + C_1 \cdot \mathbf{U}_{p1}[t]\left(\mathbf{b}_p^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]\right) + C_2 \cdot \mathbf{U}_{p2}[t]\left(\mathbf{b}_g^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]\right) \quad (4)$$

Cada um dos três termos da equação para a nova velocidade tem um peso diferente no algoritmo da PSO. O primeiro termo, $\omega[t]$, é o componente inercial determinando o peso da inércia da velocidade anterior para o cálculo da velocidade atual, responsável por manter a partícula em movimento na mesma direção do sentido original anterior e apresenta normalmente valores entre 0,8 e 1,2 que tanto pode atenuar a inércia da partícula ou acelerá-la no mesmo sentido original (EBERTHART, 2005). Normalmente, valores menores do coeficiente de inércia aceleram a convergência da nuvem para o valor ótimo, enquanto que valores maiores do coeficiente de inércia estimulam a busca em um maior espaço de busca ou pesquisa.

O segundo termo $C_1.\mathbf{U}_{p1}[t](\mathbf{b}_p^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t])$ é chamado de componente cognitiva e refere-se à memória da partícula fazendo-a tender a voltar a pontos do espaço de busca ou pesquisa em que teve sua melhor performance individual. O coeficiente cognitivo C_1 é o coeficiente de aceleração considerando-se as influências das melhores partículas, possui valor numérico normalmente próximo a 2 e influencia o tamanho do salto que a partícula toma em diversão à melhor solução candidata (melhor vetor-posição local) $b_p^{best}[t]$.

O terceiro termo $C_2.\mathbf{U}_{p2}[t](\mathbf{b}_g^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t])$ é chamado de componente social que influencia a partícula a se deslocar a melhor posição encontrada pela nuvem até aquele momento. O coeficiente social C_2 é o coeficiente de aceleração considerando-se as influências das melhores posições globais na determinação da velocidade seguinte e, assim como C_1, possui valor numérico próximo a 2 e representa o tamanho do salto que a partícula toma em direção à melhor solução candidata global (melhor vetor-posição global) $\mathbf{b}_g^{best}[t]$ que a nuvem possui até aquele momento.

As matrizes diagonais $\mathbf{U}_{p1}[t]$ na componente cognitiva e $\mathbf{U}_{p2}[t]$ na componente social possuem dimensão *K*, têm seus elementos como variáveis aleatórias com distribuição uniforme de aproximadamente $U \in [0,1]$ gerados pela *p*-ésima partícula na iteração $t = 1,2,\ldots,\mathcal{G}$. Esses componentes influenciam seus respectivos componentes a uma influência estocástica nas componentes seguintes de velocidades obtidas iteração após iteração. Essa natureza estocástica influencia a partícula a se movimentar de maneira semi-aletória altamente influenciada pela melhor solução candidata individual da partícula e pela melhor solução global da nuvem.

A *p*-ésima posição de partícula na *t*-ésima iteração é determinada pela potência do vetor-candidato $\mathbf{b}_p[t] = [\mathrm{b}_{p1}^t\ \mathrm{b}_{p2}^t\ \ldots\ \mathrm{b}_{p\mathrm{K}}^t]^T$. A posição de cada partícula é atualizada usando-se o novo vetor-velocidade para essa partícula,

$$\mathbf{b}_p[t+1] = \mathbf{b}_p[t] + \mathbf{v}_p[t+1], p = 1,\ldots,\mathcal{P} \tag{5}$$

sendo que $\mathcal{P}$ é o tamanho da população. Com o objetivo de evitar que as partículas se movimentem desordenadamente no espaço de busca ou pesquisa,

utiliza-se uma técnica denominada fixação de velocidade que é adicionado ao modelo da PSO e tem por finalidade limitar a velocidade de cada partícula (YANG, 2008). Para um espaço de busca ou pesquisa na faixa $[-\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{max}]$, uma limitação de velocidade na faixa $[-\mathbf{v}_{max}, \mathbf{v}_{max}]$ onde $\mathbf{v}_{max} = K\mathbf{b}_{max}$. O valor K representa um fator de limitação de velocidade definido pelo usuário normalmente definido como $0{,}1 \leq K \leq 1{,}0$. Em muitas tarefas de otimização, o espaço de busca ou pesquisa não é centrado em zero e nesse caso a faixa definida $[-\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{max}]$ não é adequada. Caso o espaço de busca ou pesquisa seja definido por $[-\mathbf{b}_{max}, \mathbf{b}_{max}]$, define-se como $\mathbf{v}_{max} = K(\mathbf{b}_{max} - \mathbf{b}_{min})/2$.

A seguinte equação de objetivo único é utilizada neste trabalho com o anseio de se obter o vetor de controle de potência ótima (TARHUNI, 2006):

$$\text{maximizar } J(\mathbf{p}) = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} \mathcal{F}_k^{th}\left(1 - \frac{p_k}{P_{max}}\right) \tag{6}$$

sujeito a $\gamma_k \geq \gamma_k^*$,

$$0 < p_k^l \leq P_{\max},$$

$$R^l = R_{\min}^l \quad \forall k \in K_l, \quad \forall\, l = 1,2,\ldots,L$$

sendo que *L* é o número de diferentes grupos de taxa de informação permitidas no sistema, e K_l é o número do usuário no *l*-ésimo grupo de taxa com taxa mínima dada por $R_{\min}^l$. A função limiar em (6) é simplesmente definida como:

$$\mathcal{F}_k^{th} = \begin{cases} 1, & \gamma_k \geq \gamma^* \\ 0, \text{caso contrário} \end{cases} \tag{7}$$

onde o SNIR para o *k*-ésimo usuário, γ_k, é dado por (8). O termo $1 - \frac{p_k}{P_{max}}$ dá credibilidade para essas soluções com potência mínima em detrimento de outros usando altos níveis de potência (DURAND; ABRÃO, 2013).

O algoritmo PSO consiste na aplicação repetida da atualização de velocidade e posição (4) e (5). Utilizando-se da teoria apresentada o fluxograma

para o problema de alocação de potência óptica para o PSO com um objetivo comum é apresentado na Figura 5.

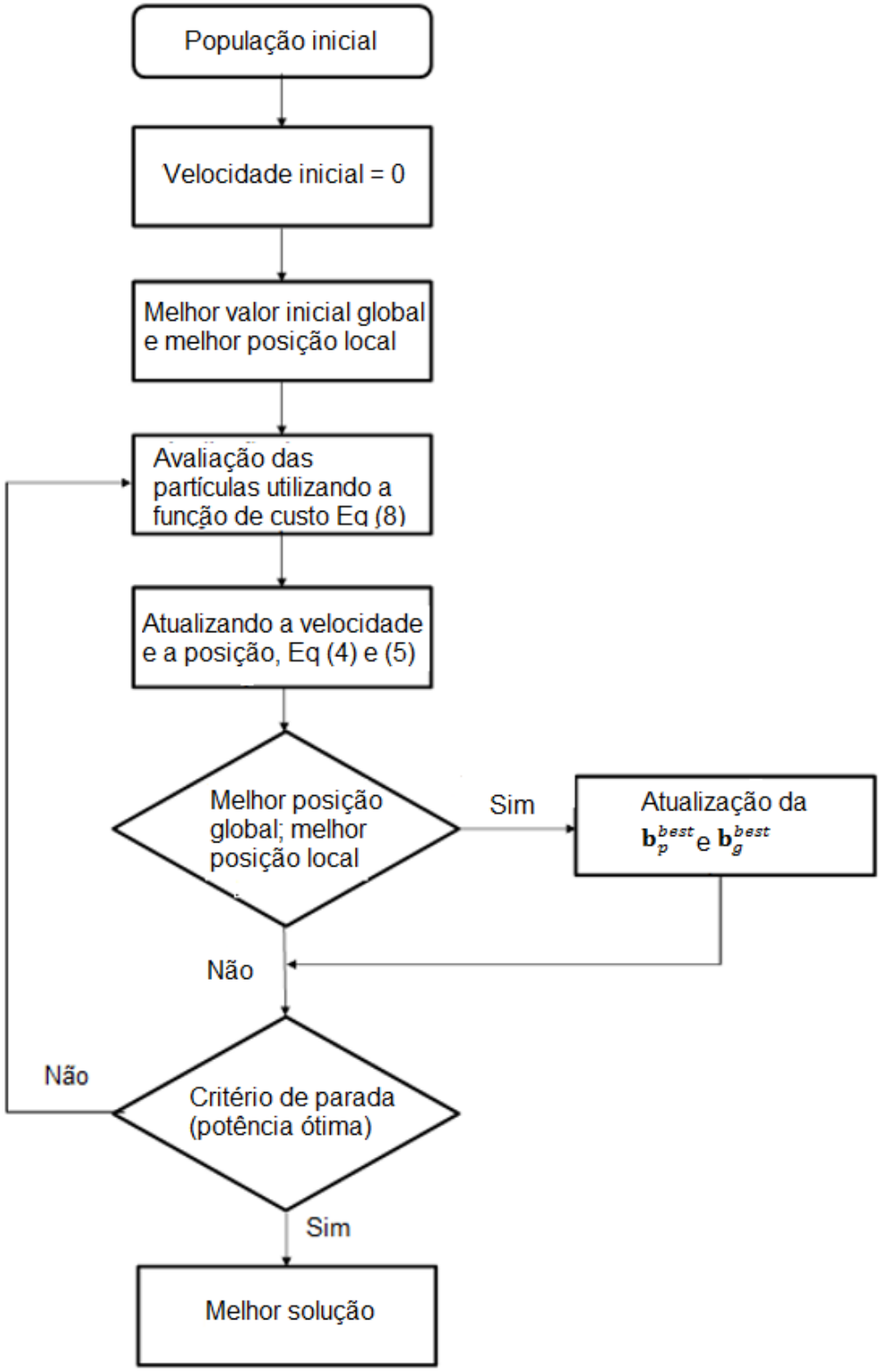


Figura 5- Fluxograma de decisão para o problema de alocação de potência óptica

5.3 ANÁLISE DE ERRO NA OTIMIZAÇÃO DA OSNR

A qualidade das soluções obtidas por qualquer processo de otimização, como a alocação de recursos, pode ser medida pelo grau de proximidade para a melhor solução a ser encontrada, e pode ser quantificada pelo Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE – *Normalized Mean Square Error*) quando a solução é obtida. A definição NMSE é dada por (DURAND; ABRÃO, 2011):

$$NMSE[t] = \mathbb{E}\left[\frac{\|\mathbf{p}[t] - \mathbf{p}^*\|^2}{\|\mathbf{p}^*\|^2}\right] \tag{8}$$

Sendo que $\|\cdot\|^2$ indica a distância euclidiana quadrádrica em relação a origem, $\mathbb{E}[\cdot]$ o operador esperado e $\mathbf{p}[t]$ é a potência obtida pelo PSO no instante (iteração) *t*. O vetor $\mathbf{p}^*$é a solução de potência transmitida, obtida por meio da inversão de matriz $\mathbf{p}^* = \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}^*\mathbf{H}\right]^{-1}\mathbf{u}$ em que "**I**" é a matriz identidade, $\mathbf{H}$ representa a matriz de interferência normalizada, cujos elementos podem ser avaliados por $H_{i,j} = \Gamma_{i,j}/\Gamma_{i,i}$ para $i \neq j$ e zero para outro caso, sendo $u_i = \widehat{\gamma}_i n_i/\Gamma_{i,i}$, onde obtém-se uma versão normalizada da potência de ruído. A inversão de matriz é equivalente a um controle de potência centralizado, isto é, a existência de um nó central com recursos computacionais e informações suficientes para calcular e determinara alocação de potência ótima, bem como armazenar e disponibilizar todas as informações no nó central. Tais informações incluem as potências ótimas de todos os nós, e valores de parâmetros da arquitetura da camada física da rede óptica; incluindo comprimentos dos enlaces e aspectos de dinâmica de tráfego. Essa inversão matricial é uma forma de se obter a resposta correta da potência otimizada, mas, computacionalmente, a inversão matricial tem um custo elevado. Estas observações justificam a necessidade de algoritmos de otimização on-line da OSNR (PAVEL, 2006; PAN; PAVEL, 2014).

Outra figura de mérito utilizada como ferramenta de análise é a Taxa de Convergência (RC – *Rate of convergence*) (ZIELINSKI *et al.*, 2009). A RC pode

ser descrito como a relação da solução do PSO após a iteração *t* dividida pela solução de inverção de matriz.

$$RC[t] = 1 - \left| \frac{J[t] - J[\mathbf{p}^*]}{J[\mathbf{p}^*]} \right| \quad (9)$$

sendo, $J[\mathbf{p}^*]$ o ótimo global da função objetivo considerada, $J[t]$ o melhor alcançado pelo algoritmo heurístico para o problema com a função objetivo J[.], após t iterações, na taxa $[10^{-6}; 10^{-2}]$. Normalmente, uma quantidade moderada de ensaios é suficiente para conseguir um bom percentual entre qualidade de solução (em termos de NMSE) e tempo aceitáveis de simulações (ZIELINSKI *et al.*, 2009).

Os efeitos das incertezas de estimativa podem ser avaliados por meio da penalidade de potência (PP) associada ao caminho óptico. Neste trabalho, a PP é definida como a razão entre a potência transmitida obtida pelo algoritmo de otimização ($p_i[t]$) e a potência ótima transmitida p_i^*, obtida pelo cálculo da inversão de matriz:

$$PP = 10 \log \frac{p_i[t]}{p_i^*} \quad (10)$$

5.4 MODELO DE ESTIMAÇÃO DE INCERTEZAS

No modelo de incertezas de estimação, é considerada a incerteza de estimação nos parâmetros de QoT em cada iteração dos algoritmos de alocação de recursos. As incertezas no processo de estimativa de QoT está relacionada com a estimativa de erro dos parâmetros do canal óptico, obtida por meio de OPMs ao longo da rota no nó receptor. O erro decorrente do processo de estimativa de QoT é representado por uma variável aleatória denominada estimativa de erro de canal (ε). Segundo Zami, Leplingard e Brogard (2008), esta variável depende do tipo de monitoramento disponível na rede, por exemplo, monitor de OSNR, monitor de PMD, monitor de dispersão cromática residual e

monitor de potência no canal. Neste sentido, $\boldsymbol{\varepsilon}$ também é afetado pela disponibilidade de informações de monitoramento, precisão e imperfeição da camada física para cada caminho óptico. Assim, a estimativa de erro de canal (ε) é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{l=1}^{L}(1 - \sum_{u=1}^{U} \vartheta_u \theta_u)}{L} \tag{11}$$

sendo ϑ_u o parâmetro que determina a precisão da informação do *u-ésimo* monitor para *U* monitores disponíveis em cada enlace. Todo o caminho óptico é composto por um conjunto de L enlaces. Neste trabalho, esse parâmetro é assumido como sendo as precisões das OPMs, tais como a precisão do equipamento de medidor de potência Δ_P, medidor de OSNR Δ_{OSNR}, medidor de PMD Δ_{PMD}, e o monitoramento de dispersão cromática Δ_{CD}. O parâmetro θ_u define a disponibilidade do monitor óptico, sendo portanto um variável binário, isto é, θ_u=1 para a presença e $\theta_u = 0$ para ausência do monitor óptico.

O erro na estimativa de canal pode ser incorporado adicionando-se erro aleatório para cada canal (G_i), e, como consequência, na OSNR calculada, considerando iteração regular. A razão entre o canal estimado ($\widehat{G_i}$) e o canal verdadeiro (G_i) é dado por (1 + ε); assim, a estimativa de canal $\widehat{G_i}$ em cada iteração é obtida por:

$$\widehat{G_i} = (1 + \varepsilon) G_i \quad , \qquad \forall i \tag{12}$$

Para um caso ilustrativo, o valor de ε = 0 corresponde ao caso em que temos plena confiança na estimativa de canal. Por outro lado, ε = 1 corresponde ao caso com um máximo de imprecisão (AZODOLMOLKY *et al.*, 2011).

6 RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos. As simulações numéricas foram realizadas com o emprego da topologia da rede óptica do Sul da Finlândia, ilustrada pela Figura 6.

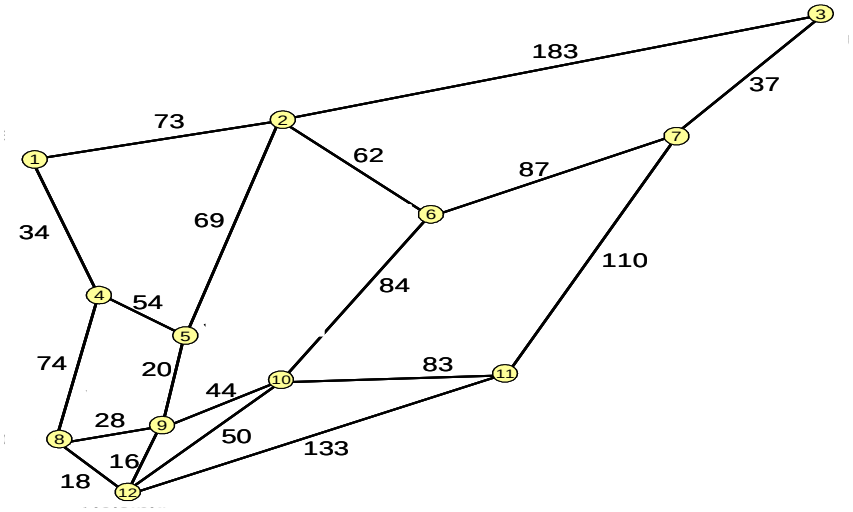


Figura 6- Topologia de rede do Sul da Finlândia com 12 nós e 19 links bi-direcionais

Esta topologia consiste de 12 nós e 19 ligações bi-direcionais, sendo previamente empregada em referências sobre redes ópticas (DURAND; ABRÃO, *et al.*, 2011). As rotas ópticas estabelecidas com o intuito de otimização OSNR são ilustradas na Tabela 3.

Tabela 3- Rotas selecionadas da rede do Sul da Finlândia

Rota	Link Bi-direcional	Distância (km)	Caminho
R_1	1 - 11	302	1 - 2 - 6 - 10 - 11
R_2	3 – 9	252	3 - 7 - 6 - 10 - 9
R_3	12 – 3	258	12 - 10 - 6 - 7 - 3
R_4	1 – 12	269	1 - 2 - 6 - 10 - 12
R_5	11 – 3	291	11 - 10 - 6 - 7 - 3
R_6	8 – 3	280	8 - 9 - 10 - 6 - 7 - 3

Com o intuito de obter diversidade com relação à distância e ao número de saltos, as rotas não foram necessariamente escolhidas pelo caminho mais curto, por outro lado, é importante saber o caminho. A Tabela 4 ilustra os parâmetros dos enlaces de fibra óptica com seus respectivos valores de entrada, neste sentido para tanto, foram empregados valores típicos relacionados dos dispositivos, componentes e equipamentos.

Tabela 4- Parâmetros dos enlaces de fibra óptica

Parâmetros	**Valores Adotados**
α_f – Coeficiente de perda da fibra	0,2 (dB/km)
L_s – Comprimento do *span*	65 (km)
h – Constante Planck	$6{,}63 \times 10^{-34}$ (J/Hz)
f - Frequência	193,1 (THz)
B_o – Largura de banda óptica	30 (GHz)
n_{sp} – Fator de Emissão espontâneo	2
γ_i^*- OSNR alvo	20 (dB)
G_0 – Ganho espectral do amplificador EDFA	$15 - 4 \times 10^{16}(\lambda - 1555 \times 10^{-9})^2$

A Tabela 5 ilustra a precisão dos equipamentos empregados no processo de monitormanento.

Tabela 5- Precisão requerida dos parâmetros de monitoramento.

Parâmetros	**Precisão**
Δ_P - Medidor de potência	$< \pm$ 0,5 dB
Δ_{OSNR} - Monitor de OSNR	$< \pm$ 0,5 dB
Δ_{PMD} – Monitor de PMD	$< \pm$ 7,0 %
Δ_{CD} – Monitor de CD	$< \pm$ 2,0 %

Os parâmetros de entrada do PSO são ilustrados na Tabela 6. A abordagem baseada em PSO é atraente em função das características de desempenho-complexidade quando comparada a outras técnicas heurísticas, métodos numéricos ou métodos de inversão de matrizes. Estes parâmetros

foram previamente obtidos visando alcançar velocidade de convergência e qualidade de respostas adequadas para o problema de alocação de recursos em redes ópticas (DURAND; ABRÃO, 2011)

Tabela 6- Parâmetros do PSO

Variáveis	**Valores**
$\mathcal{P}$ – Número de partículas	$\mathcal{P} = K + 2$
C_1 – Aceleração de partícula	1,8
C_2 – Aceleração global	2
p_{max} – Potência máxima	20 dBm
p_{min} – Potência mínima	$p_{max} \times 10^{-12}$
ω - Valor inercial	$\omega[t] = (\omega_i - \omega_f)\left(\frac{\varphi - t}{\varphi}\right)^m + \omega_f$
m – Índice não-linear	[0,6; 1,4]
$\mathcal{G}$ – Número de interações	1000
ω_i – Valor inicial inercial	1
ω_f – Valor final inercial	0.4
V_{max} – Velocidade máxima	$V_{max} = 0{,}2(p_{max} - p_{min})$
V_{min} – Velocidade mínima	$V_{max} = -V_{min}$

A Figura 7 ilustra a taxa de convergência média em relação ao número de iterações considerando as rotas ilustradas na Tabela I. Foram considerados valores do erro de estimativa de canal de 0, 10, 20, 40 e 60%. Nas simulações, foram adotadas 100 realizações (*trials*) em cada interação com o objetivo de obter resultados com elevada confiabilidade.

Em análise numérica, a velocidade com que uma série convergente se aproxima do seu limite é chamada de taxa de convergência. Embora, estritamente falando, o comportamento assintótico de uma sequência não forneça informações sobre qualquer primeira parte finita desta, este conceito é de importância prática se lidamos com uma sequência de sucessivas aproximações para um método iterativo, assim, poucas iterações são necessárias para se obter uma boa aproximação quando a taxa de convergência é alta.

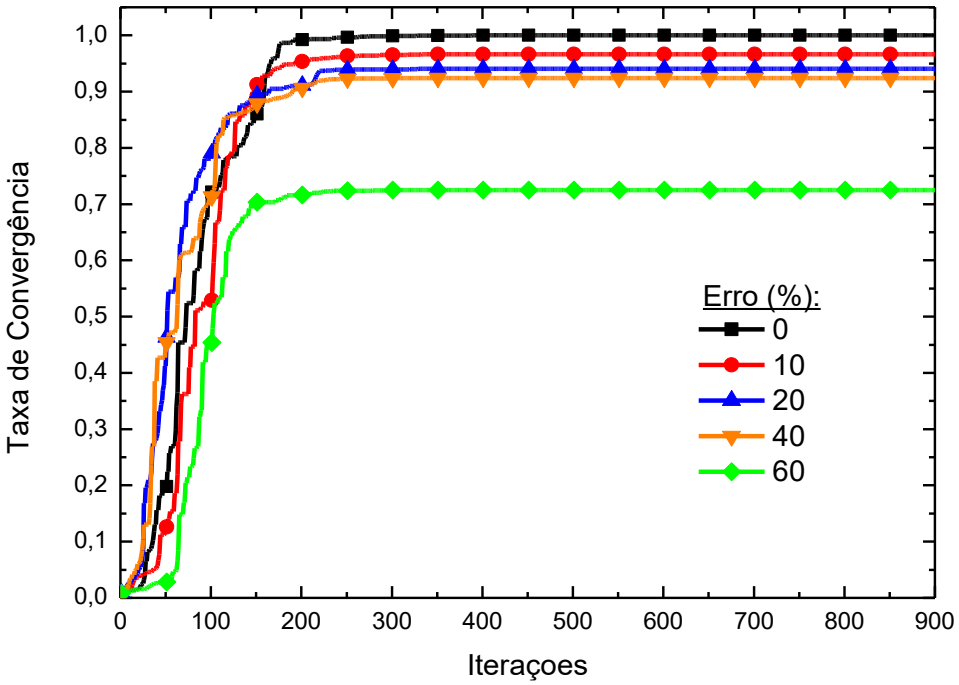


Figura 7- Taxa de convergência em função do número de iterações

Por meio da Figura 7, verifica-se que a taxa de convergência alcança o valor previsto para convergência após aproximadamente 200 quando a estimativa de erro de canal é igual a zero, ou seja, a estimativa do canal óptico é perfeita. Por outro lado, observa-se o impacto de estimativa de erro de canal sobre a taxa de convergência. Desta forma, o aumento do erro de estimativa de canal resulta na diminuição da taxa de convergência do algoritmo de alocação de potência. Neste sentido, considera-se o limiar aceitável de convergência do algoritmo uma taxa de convergência de 0,9, assim pode-se observar que um erro de estimativa de canal de até 40 % pode ser superada pelo algoritmo PSO utilizado neste trabalho.

Com o intuito de verificar o impacto do erro de estimativa de canal na OSNR, é ilustrada, na Figura 8, a OSNR média em função do erro de estimativa de canal.

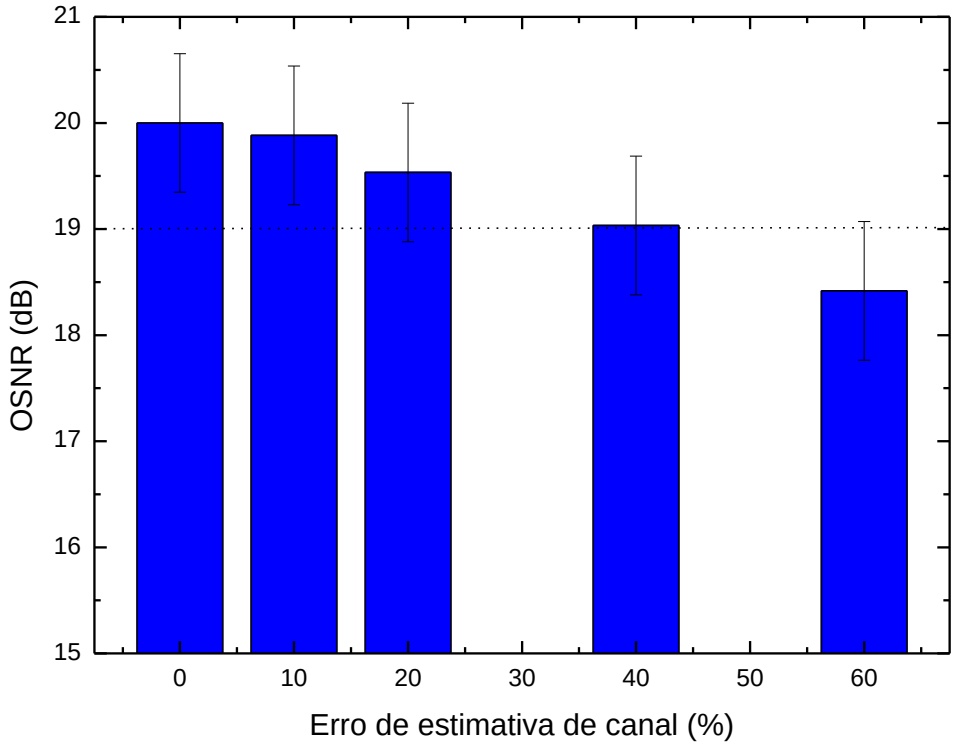
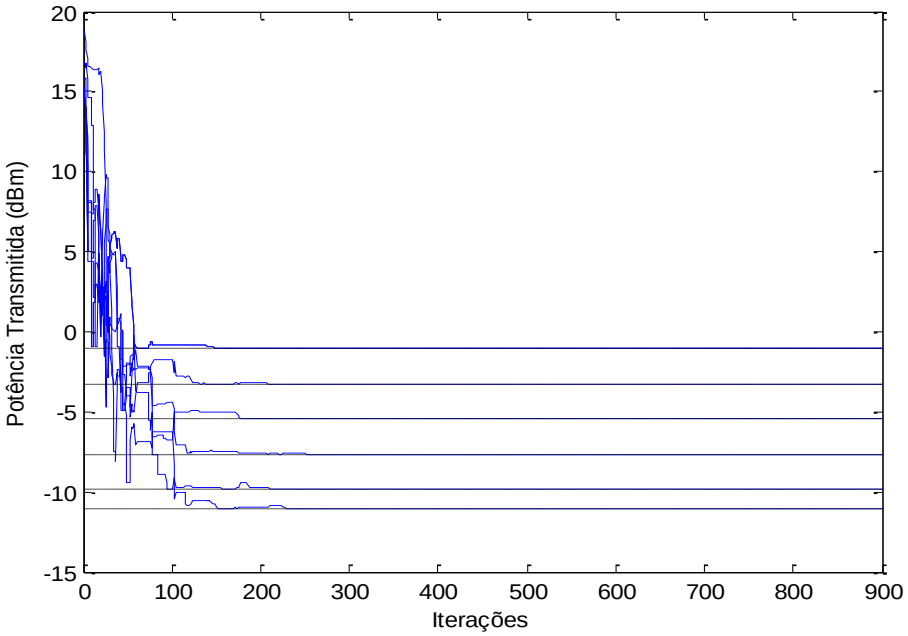


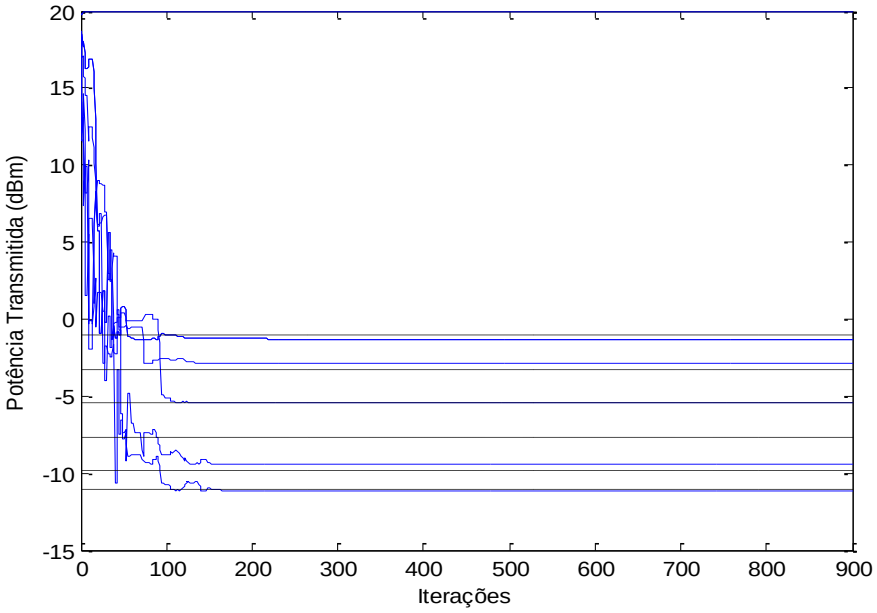
Figura 8- OSNR média em função dos números de iterações

Por meio da Figura 8, verifica-se o efeito do erro de estimativa de canal na OSNR, assim o aumento do erro reflete na diminuição da OSNR. Neste sentido, considerando uma penalidade máxima de 1 dB na OSNR, é possível verificar que, até aproximadamente 20% de erro de estimativa de canal, a OSNR das rotas ópticas terá penalidade inferior a 1 dB. Por outro lado, para erros de estimativa de canal de 40 e 60%, as penalidades de OSNR nas rotas ópticas serão maiores que 1 dB.

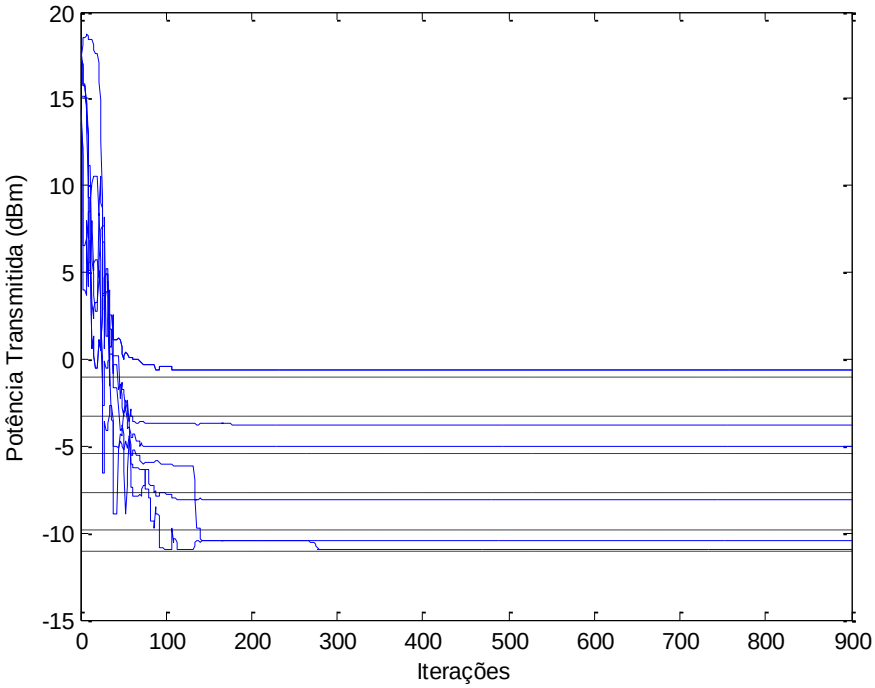
Neste sentido, para visualizar o impacto do erro de estimativa de canal na potência transmitida, é ilustrada, na Figura 9, a potência transmitida em função do número de iterações considerando o erro de estimativa de canal de (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 40% e (e) 60%.



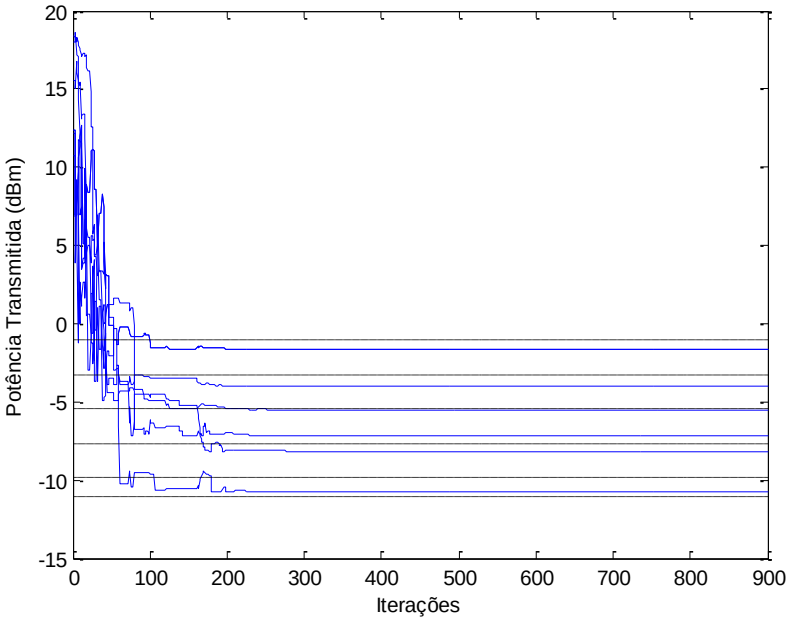
$\varepsilon = 0\%$ (a)



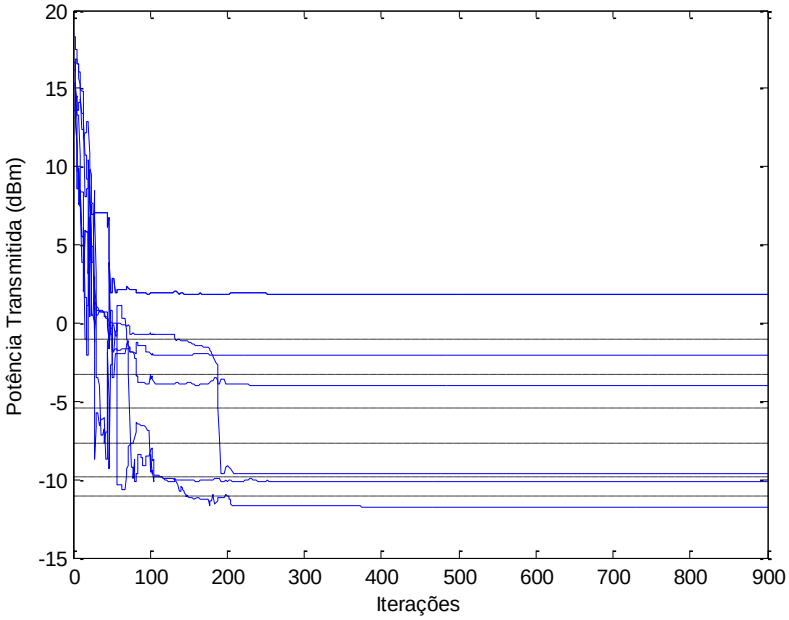
$\varepsilon = 10\%$ (b)



$\varepsilon = 20\%$ (c)



$\varepsilon = 40\%$ (d)



$\varepsilon = 60\%$ (e)

Figura 9- Potência transmitida em função do número de interações para erro de estimativa de canal de (a) 0%, (b) 10%, (c) 20% (d) 40% (e) 60% erro.

Pode-se observar que o aumento das iterações faz com que a convergência da potência transmitida por nó, obtida pelo algoritmo PSO para os valores calculados pela estratégia de controle centralizado, é representado por linhas de pontos horizontais. A estratégia de controle centralizado é baseada na inversão de matriz. No entanto, quanto maior o erro de estimativa de canal, mais iterações são necessárias para a convergência da curva de potência transmitida.

A fim de avaliar a distância entre a potência transmitida otimizada pelo algoritmo PSO por cada nó e os valores calculados pela estratégia de controle centralizado, considerando o aumento dos valores de incerteza, ilustra-se, na Figura 10, a NMSE em função do número de iterações com diferentes valores de erro de estimativa de canal.

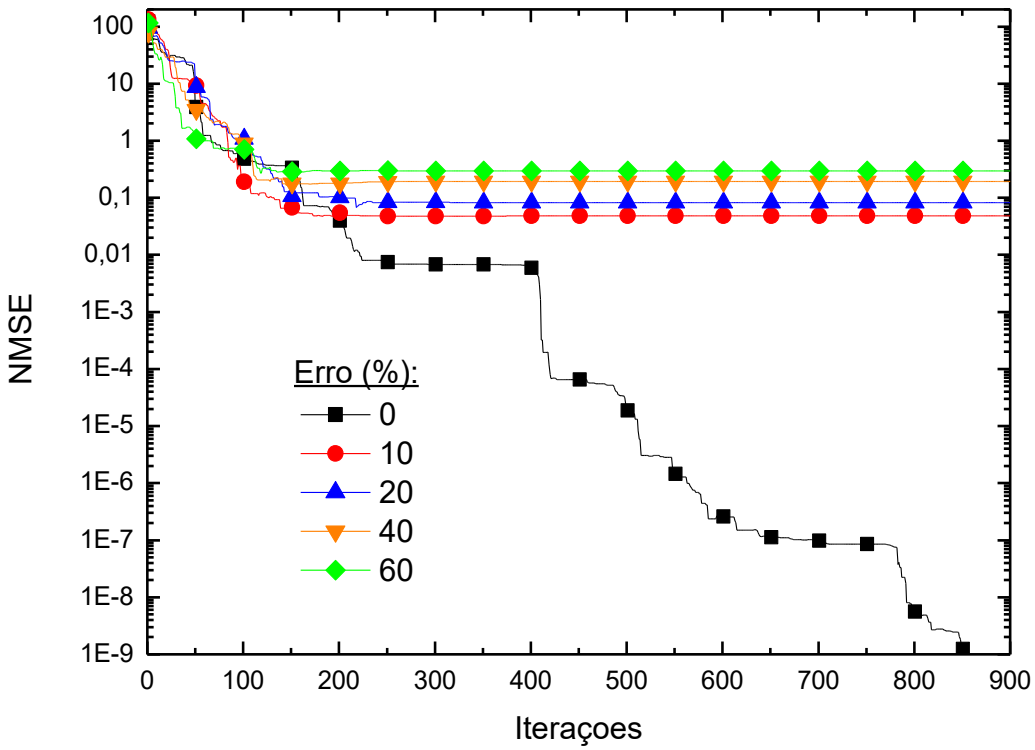
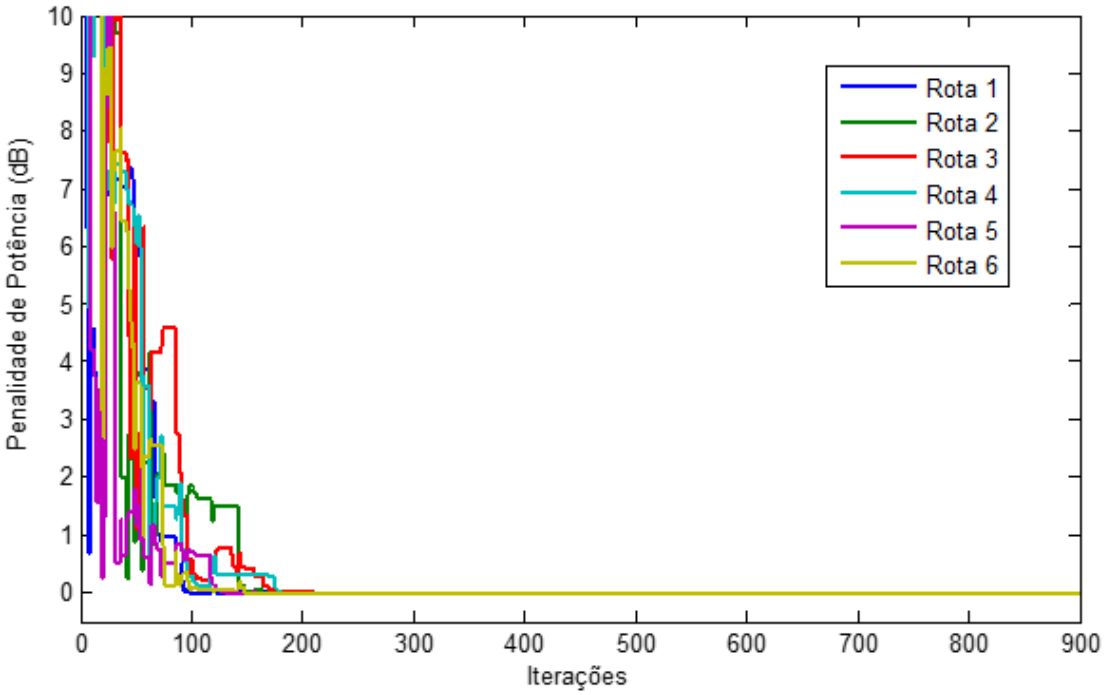


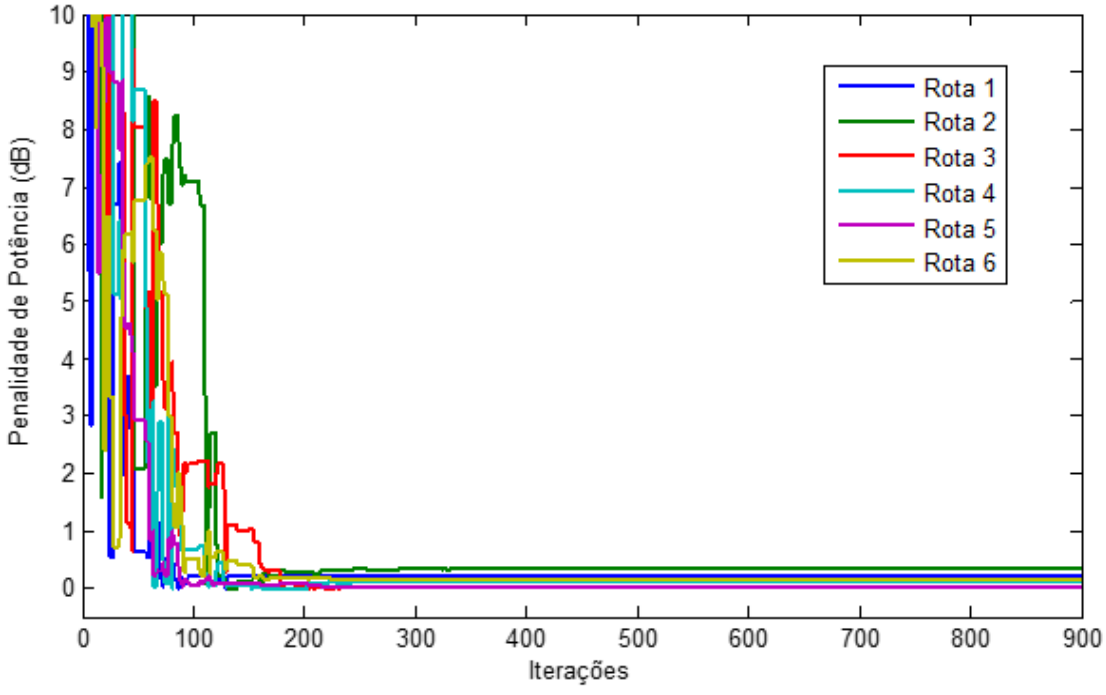
Figura 10- NMSE para os números de interações considerando uma potência estática com incertezas de 0,10, 20, 40 60%.

Por meio da Figura 10, pode-se obervar a evolução da NMSE em função do aumento do número de iterações. Os valores de NMSE de convergência são fortemente afetados pelo erro de estimação de canal. Assim, os valores de NMSE aumentam em função do aumento do erro de estimativa de canal. Neste sentido, o menor valor de NMSE (~10^{-9}) reflete a utilização de OPMs ao longo dos caminhos ópticos com perfeição nas medidas realizadas. Por outro lado, o pior valor de NMSE (~10^{-1}) ocorre quando não são empregados muitos OPMs ao longo do caminho óptico e o nível de incerteza das medidas é elevado.

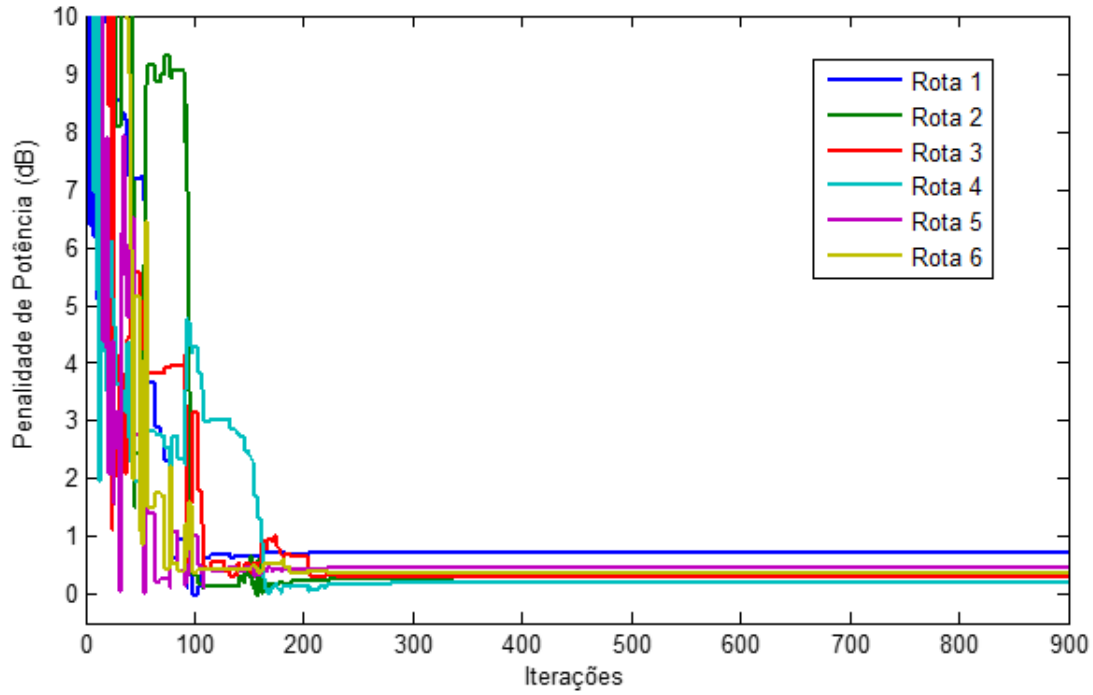
A evolução da penalidade de potência em função do número de iterações é ilustrada na Figura 11, que considera o erro de estimativa de canal sendo (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 40 e (e) 60%.


Penalidade de Potência (dB)
Iterações
Rota 1
Rota 2
Rota 3
Rota 4
Rota 5
Rota 6
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900

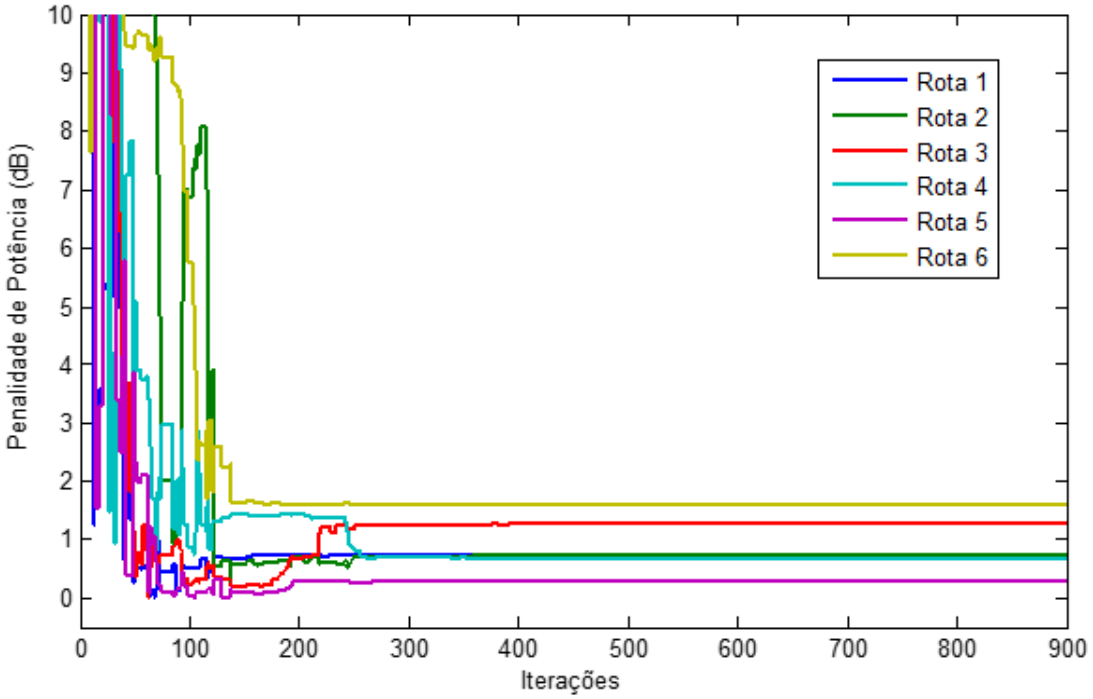
(a)


Penalidade de Potência (dB)
Iterações
Rota 1
Rota 2
Rota 3
Rota 4
Rota 5
Rota 6
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900

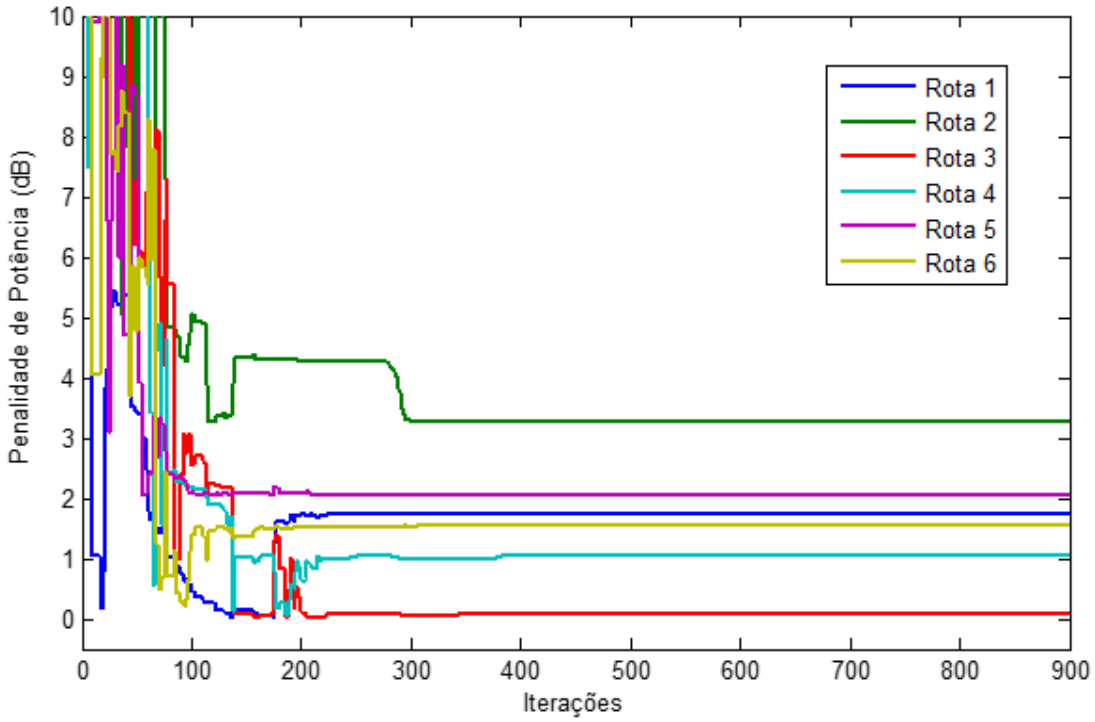
(b)


Penalidade de Potência (dB)
Iterações
Rota 1
Rota 2
Rota 3
Rota 4
Rota 5
Rota 6

(c)


Penalidade de Potência (dB)
Iterações
Rota 1
Rota 2
Rota 3
Rota 4
Rota 5
Rota 6

(d)



(e)

Figura 11- Evolução da penalidade de potência em função do número de iterações para rotas da Tabela II; canal de estima de erro de 0,10, 20, 40 60%

Por meio da Figura 11, pode ser visualizada a magnitude da penalidade de potência em cada rota óptica. A variação da penalidade de potência para diferentes rotas é afetada pelos mesmos elementos que afetam a variação da potência transmitida, isto é a distância, o ASE acumulado e a interferência entre os comprimentos de onda nos mesmos caminhos ópticos. Além disso, quando as curvas de penalidade de potência da Figura 11 (a), (b), (c), (d) e (e) são comparadas, pode-se observar o aumento dos valores da penalidade de potência com o aumento do erro de estimativa de canal. Por outro lado, pode-se observar que, para algumas rotas, há uma diminuição da penalidade de potência. Este efeito ocorre porque, quando a estimativa de erro de canal é adicionada ao algoritmo de otimização do processo, a melhor solução para cada potência de transmissão é alcançada quando o OSNR alvo é estabelecido.

A relação entre a penalidade de potência e erro de estimativa de canal é ilustrada na Figura 12.

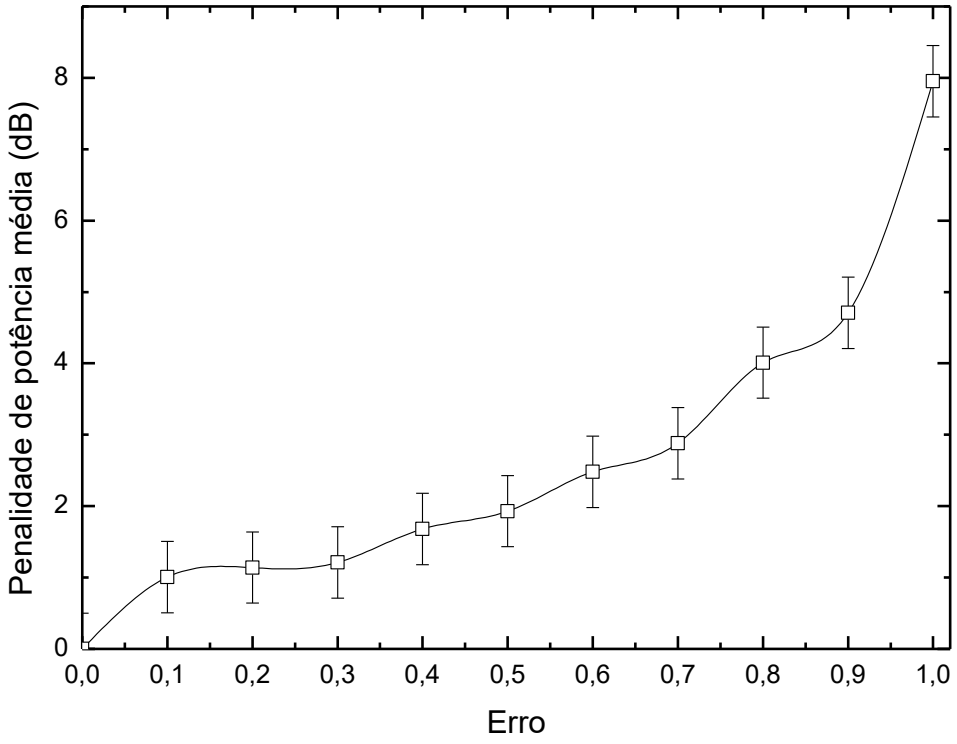


Figura 12- Evolução da penalidade de potência média em função do erro de estimativa

Por meio da Figura 12, pode ser evidenciado o aumento do nível de penalidade de potência quando ocorre o aumento de erro de estimativa de canal. O algoritmo de otimização atua para tentar atingir o OSNR determinado ao custo do aumento de potência transmitida no cenário com erro de estimativa de canal. O impacto da estimativa de erro de canal está relacionado com a necessidade do aumento do número de regeneradores na rede óptica. A estimativa de erro de canal de 0,1 a 0,6 resulta na penalidade de potência de cerca de 0,68 dB a 2,5dB. Para comparação, as incertezas de potência de 1 dB podem resultar em um aumento de 20% a mais de regeneradores ao longo das rotas de rede ópticas (ZAMI; LEPLINGARD; BROGARD, 2008).

.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram investigados os efeitos das incertezas de estimativa de erro de canal na otimização da relação sinal-ruído óptica (OSNR) em redes ópticas (WDM). Os algoritmos de otimização da OSNR estão relacionados com a estimativa de canal óptico realizada pelas combinações de medições de desempenho de monitores ópticos (OPM), modelos analíticos e simulações. Além disso, as incertezas de estimativa são introduzidas por vários fatores, como a disponibilidade de informações de monitoramento, precisão do monitoramento, a imperfeição da camada física e a dinâmica de alocação de canal. O desempenho do algoritmo de controle de potência óptica baseada em enxame de partículas (PSO) considerando as incertezas das estimativas foi investigado, e suas características são atrativas devido a seu desempenho e complexidade quando comparado a outros métodos numéricos, inversão de matrizes e outras heurísticas. Os principais resultados de simulação numérica, em termos de taxa de convergência, erro quadrático médio normalizado e potência de transmissão alocada, demonstraram a eficácia de convergência alcançada pelo algoritmo PSO quando incertezas de diferentes ordens deterioram o sinal estimado.

Os resultados numéricos considerando uma quantidade diferente de incertezas na estimativa de erro de canal foram analisados; assim, a introdução de uma estimativa de erro de canal de $\varepsilon = 0,1$; $\varepsilon = 0,2$; $\varepsilon = 0,4$ e $\varepsilon = 0,6$ mostrou a viabilidade da utilização do PSO para a resolução do problema de alocação de potência para até 40% de incerteza, garantindo uma solução de qualidade e convergência com aproximadamente 200 iterações.

Como prova de conceito, um exemplo numérico foi avaliado e o erro quadrado médio normalizado (NMSE) e a Penalidade de Potência (PP) para diferentes níveis de incertezas no erro de estimativa de canal foram analisados; observou-se que há uma evolução da NMSE em função do aumento do número de iterações. Os valores de NMSE de convergência são fortemente afetados pelo erro de estimação de canal, sendo, assim, necessária a utilização de OPMs em números suficientes ao longo dos caminhos ópticos.

O controle de potência realizado pelo algoritmo PSO foi utilizado para o ajuste da potência transmitida por meio do laser e considerando uma SNIR alvo. Para os

resultados numéricos atingidos, foi observada a variação da potência transmitida de acordo com os niveis de erros que podem haver na rede. Neste contexto, o algoritmo para controle de potência baseado em PSO se mostra eficaz a fim de atenuar, de forma dinâmica, os efeitos da variação da potência, e erros nas estimativas de canal com baixo custo e baixa complexidade.

Como propostas de continuidade deste trabalho, pode-se citar:

- Utilização de técnicas como Redes Neurais Artificiais (RNA) para diminuir os efeitos da incerteza de estimação de canal;

- Empregar outras técnicas de otmização de OSNR como otimização por colônia de formigas e comparar os efeitos da incerteza de estimação de canal;

- Propor outras formulações para as incertezas de estimativa de canal.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, T. *et al* Multiple Access Network Optimization Aspects via Swarm Search Algorithms, In: NASHAT, Mansour (Org.). **Search algorithms and applications**. Vienna, Austria: InTech, ISBN 978-953-307-156-5, 2011. v. 1, p. 261-298.

AGRAWAL, G. P. **Lightwave technology**: Telecommunication systems. New Jersey, EUA: John Wiley Sons, 2005.

AGRAWAL, G. P. **Fiber-optic communication systems**. John Wiley & Sons, 2002.

AGRAWAL, G. P. 'Nonlinear fiber optics'. **Academic Press**, 2001, 3rd edn.

ASS, D. K. **O suporte ao tráfego de internet pela rede óptica**. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.

AZODOLMOLKY et al. S. A novel impairment aware RWA algorithm with consideration of QoT estimation inaccuracy **J. Opt. Commun**. Netw, v. 3, p. 290-299, Apr. 2011.

AZODOLMOLKY, S. *et al.* A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks. **Comput. Netw.**, The Int. J. Comput. Telecommun. Netw, n. 53, p. 926-944, 2009.

BECKER, P. C.; OLSSON, N. A.; SIMPSON, J. R. **Erbium-Doped Fiber Amplifiers**: Fundamentals and technology. New York, USA: Academic Press, 1999.

BENLACHTAR, Y. *et al.* Robust long-haul transmission utilizing electronic precompensation and MLSE equalization. **Proc. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conf.** (OFC/ NFOEC), paper JWA52, 2007.

BERTHOLD, J. *et al.* Optical networking: Past, present and future. **Journal Lightwave Technology**, v. 26, n. 9, p. 1104-1118, 2008.

BIRAND, B. *et al*Real-time power control for dynamic optical networks – algorithms and experimentation. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications***,* v. 32, n. 8, p. 1615-1628, Aug. 2014.

BOFFI, P*et al..*: Measurement of PMD tolerance in 40-Gbps polarization-multiplexed RZ-DQPSK. **Opt. Express**, v. 16, n. 17, p. 13398-13404, 2008.

BREGNI, S. A historical perspective on telecommunications network synchronization. **IEEE Communications Magazine**, v. 36, n. 6, p. 158-166, 1998.

BRUYERE, F.: Impact of first and second-order PMD in optical digital transmission systems. **Opt. Fiber Technol.**, v. 2, n. 3, p. 269-280, 1996.

BUCHALI, F., BULOW, H.: Adaptive PMD compensation by electrical and optical techniques. **J. Lightwave Technol.**, n. 22, p. 1116–1126, 2004.

CHATTERJEE, A.; SIARRY, P. Nonlinear inertia weight variation for dynamic adaptation in particle swarm optimization. **Computers & Operations Research**, v. 33, n. 3, p. 859-871, March 2006.

CHEN, W. *et al.* Adding OSNR monitoring functionality on AWG based power monitoring circuits'. **Proc. Optical Fiber Communication Conf**. (OFC 2002), paper ThG40, 2002.

CHEN, Y. *et al.* Mach-zehnder fibergrating based fixed and reconfigurable multichannel optical add-drop multiplexers for dwdm networks. **Optics Communications**, v. 169, p. 245-262, Oct. 1999.

CLERC, M.; KENNEDY, J.; "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space". IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6 (1): 58–73, 2002.

DAHAN, D. *et al.* Optical performance monitoring for translucent/ transparent optical networks. **IET Optoelectron**, v. 5, Iss. 1, p. 1-18, 2011.

DOVERSPIKE, R.; YATES, J.Optical network management and control. ***Proc. IEEE***, v. 100, n. 5, p. 1092-1104, May 2012.

DURAND, F. R. **Contribuições ao estudo de redes ópticas híbridas wdm/ocdm**. Ph.D. dissertation, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, dez. 2007.

DURAND, F. R.; ABRÃO, T. Distributed SNIR Optimization Based on the Verhulst Model in Optical Code Path Routed Networks With Physical Constraints. **J. Opt. Commun. Netw.**, v. 3, n. 9, p. 683-691, Sep. 2011. doi:10.1364/JOCN.3.000683

ELKAMCHOUCHI, H., EL-RAGAL, H.; MAKAR, M. Power control in cdma system using particle swarm optimization. **24th National Radio Science Conference**, p. 1-8, 2007.

EBERTHART, R. C.; AND SHI. Y.; Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. Evolucionary Programmong VII, vol. 1447, p. 611-616, San Diego, CA, dez 2005.

FERGUSON, A.; O'SULLIVAN, B.; KILPER, D. C.Transparent path length optimized optical monitor placement in transparent mesh networks. **Proc. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conf**. (OFC/NFOEC 2008), paper OThI3, 2008.

GENIE, L. G. M. L. **Contribuição ao encaminhamento de comprimentos de onda em redes ópticas wdm**. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, set. 2003.

GIOZZA, W. F.; CONFORTTI, E.; WALDMAN, H. **Fibras ópticas**. Tecnologia e Projeto de Sistemas. São Paulo: Makron Books, 1991.

GUDISZ V. G.; VENAYAGAMOORTHY G.K.; "Comparison of particle swarm optimization and backpropagation as trainning algorithms for neural networks," IEE Swarm Intelligence Symposium 2003 (SIS 2003), Indianápolis, Indiana, EUA, p. 110-117, abr 2003.

HANSRYD, J. *et al.* Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications. **IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.**, v. 8, n. 3, p. 506-520, 2002.

HERBSTER, A. F. **Extensão da faixa dinâmica de edfas por compensação da emissão espontânea amplificada no controle eletrônico de ganho**. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, ago. 2010.

ISLAM, M. N.Raman amplifiers for telecommunications. **IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.**, v. 8, n. 3, p. 548-559, 2002.

KENNEDY, J. EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. In: **Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks**, Piscataway, USA, p. 1942-1948, 1995.

KILPER, D. *et al.* Optical performance monitoring. **J. Lightw. Technol.**, v. 22, n. 1, p. 294-304, Jan. 2004.

KILPER, D. *et al.* Optical Networks Come of Age. **OSA Optics and Photonics News**, p. 50-57, Sep. 2014.

KIM, C*et al*. Performance of an OSNR monitor based on the polarization-nulling technique, **J. Opt. Netw.**, v. 3, n. 6, p. 388-395, 2004.

KOBRISNKI, H.; ZUCKERMAN, D. Applications of automated cross-conection in the optical layer **Proc ECOC 98**, v. 1, p. 64-65, 1999.

KOGELNIK, H.; JOPSON, R. M.; NELSON, L. E. Polarisation mode dispersion. In: **Optical fiber telecommunications systems IV-B.** Academic press Inc., London, 2002.

LASKOSKI, G. T. **Padrão sonet/sdh para sistemas ópticos**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba: Tech. Rep., jul. 2006.

LEE, J. H. *et al.* OSNR monitoring technique using polarization-nulling method. **IEEE Photonics Technol.** Lett, v. 13, n. 1, p. 88-90, 2001.

LEPLINGARD, F. *et al.* Determination of the impact of a quality of transmission estimator margin on the dimensioning of an optical network. **Proc. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conf**. (OFC/NFOEC), Paper OWA6, 2008.

LIMA, C. A. **Redes ópticas wdm sem bloqueio**. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, jun. 2000.

LINS, F. G. **Desempenho de redes wdm com restrições sobre o número de transceptores por nó**. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, fev. 2004.

LIU, K. *et al.* Performance and testbed study of topology reconfiguration in ip over optical networks, **IEEE Transactions on Communications**, v. 50, n. 10, Oct. 2002.

MAHLAB, U.; DOLEV, E. Optical transmission links design technique. **Proc Int. Conf. Transparent Networks** (ICTON 2006), 2006. v. 1, p. 102-105.

MAS, C.; TOMKOS, I.; TONGUZ, O. Failure location algorithm for transparent optical networks. **IEEE J. Sel. Areas Commun**., v. 23, n. 8, p. 1508-1519, 2005.

MORITO, K. *et al.* Penalty free 10 Gb/s NRZ transmission over 100 km of standard fiber at 1.55 mm with a blue-chirp modulator integrated DFB laser. **IEEE Photonics Technol. Lett**., n. 8, p. 431-433, 1996.

MOUSTAFA, M.; HABIB, I.; NAGHSHINEH, M. Genetic algorithm for mobiles equilibrium. In: MILCOM 2000. 21st Century Military Communications Conference Proceedings, 2000.

MURAKAMI, M. Analyzing power consumption in optical crossconnect equipment for future large-capacity optical networks. **Journal of Networks**, v. 5, n. 11, p. 1254-1259, nov. 2010.

NEDJAH, N.; MOURELLE, L. **Swarm intelligent systems**. Springer, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2006.

PACHNICKE, S. *et al.* Physically constrained routing in 10-Gb/s DWDM networks including fiber nonlinearities and polarization effects. **J. Lightwave Technol.**, v. 24, n. 9, p. 3418-3426, Sep. 2006.

PAN, Y.; PAVEL, L. OSNR Game Optimization with Link Capacity Constraints in General Topology WDM Networks. **Optical Switching and Networking**, v. 11, part A, p. 1-15, Jan. 2014.

PAN, Z.; YU, C.; WILLNER, A. Optical performance monitoring for the next generation optical communication networks. **Opt. Fiber Technol**., v. 16, n. 1, p. 20-45, 2010.

PAPADIMITRIOU, G. Ir; PAPAZOGLOU, C.; POMPORTSIS, A. S. Optical switching: Switch fabrics, techniques, and architectures. **Journal Lightwave Technology**, v. 21, n. 2, Feb. 2003.

PAVANI, G. *et al.*Distributed approaches for impairment-aware routing and wavelength assignment algorithms in GMPLS networks. **Computer Networks**, v. 52*,* n. 10, p. 1905-1915, July 2008.

PAVEL, L. OSNR optimization in optical networks: Modeling and distributed algorithms via a central cost approach. **IEEE J. Sel. Areas Commun**., v. 24, n. 4, p. 54-65, Apr. 2006.

RAADAND, R. *et al.* Optimal resource allocation scheme in a multirate overlapped optical cdma system. **Journal Lightwave Technology**, v. 25, n. 8, p. 2044-2053, 2007.

RAMASWAMI, R. Optical fiber communication: from transmission to networking. **IEEE Comun. Mag.**, v. 40, n. 5, p. 138-147, 2002.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. **Optical Networks**: A practical perspective. San Mateo, USA: Morgan Kaufmann, 2002.

RARING', J. W. *et al.* Low dispersion penalty at 10 Gbps, over 75 km, using a quantum-well-intermixed electroabsorption-modulator/widely-tunable laser transmitter. **Proc. Conf. Optical Fiber Communication** (OFC), paper PDP13, 2004.

RIBEIRO, R. de Oliveira. **Caracterização da conversão de comprimento de onda por modulação de ganho cruzado em amplificadores ópticos semicondutores**. Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, set. 2005.

RODNEY, S. Tucker. Green Optical Communications – Part II: Energy Limitations in Networks. **IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 17, n. 2, p. 261-274, March-April 2011.

ROORDA, P.; COLLINGS, B. Evolution to colorless and directionless roadm architectures. **National Fiber Optic Engineers Conference** (NFOEC), 2008.

ROY, F. *et al.*Simple dynamic polarization mode dispersion compensator. **Proc. Conf. Optical Fiber Communication and the Int. Conf. Integrated Optics** (OFC/IOOC 1999), 1999. v. 1, p. 275-278.

SANTOS, G. C. dos; SANTOS F. D. dos.; OLIVEIRA, J. C. R. F. de. Provisionamento automático de circuitos ópticos via plano de controle gmpls aplicado a uma rede óptica reconfigurável baseada em roadms. In: **XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, 2009.

SAYEED, C. A. *et al.* Hybrid low loss architecture for reconfigurable optical add/drop multiplexer. **IEEE GLOBECOM**, p. 212-217, 2006.

SHARAIHA, A. Simultaneous in-line photodetection using semiconductor optical amplifier in presence of bi-directional transmission. **Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting**, vol. 1. p. 303-304, 1998.

SOLÉ-PARETA, J. *et al.* Cross-layer approaches for planning and operating impairment-aware optical networks. **Proc. IEEE**, v. 100, n. 5, p. 1118-1129, May 2012.

TARHUNI, N. et al; Power Control of Optical CDMA Star Networks. Optics Communications, vol. 259, pp. 655 – 664, mar 2006.

TOLSTIKHIN, V. I. et al.. Monolithically integrated optical channel monitor for DWDM transmission systems. **J. Lightwave Technol.**, n. 22, p. 146-153, 2004.

TOMKOS, I. *et al.* Dynamic impairment aware networking for transparent mesh optical networks: activities of EU project DICONET. **Proc. Int. Conf. Transparent Networks** (ICTON 2008), 2008. v. 1, p. 6-12.

TZANAKAKI, A.; ZACHAROPOULOS, I.; TOMKOS, I. Optical add/drop multiplexers and optical crossconnects for wavelength routed networks. In: **5th International Conference on Transparent Optical Networks**, v. 1, p. 41-46, 2003.

WALKER, G. R. *et al.* Noise performance of distributed fibre amplifiers, **IEE Electron. Lett.** v. 27, n. 15, p. 1390-1391, 1991.

WANG, R. *et al.* Distributed fault monitoring scheme based on optical power for optical burst switching network. **Proc. Networking, Architecture, and Storage**, 2007.

YAMAZAKI, H. *et al.* 40-channel in-line optical power monitor integrated on 2.5%-D silica PLC using out-of-plane micromirror arrays'. **Electron. Lett.** v. 45, n. 10, p. 498-500, 2009.

YANG, X.S.; Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press. ISBN 978-1-905986-10-1, 2008.

YIN, H.; RICHARDSON, D. J. **Optical code division multiple access communication networks**: theory and applications. Springer-Verlag and Tsinghua University Press, 2009.

YOO, M.; QIAO, C.; DIXIT, S. Qos performance of optical burst switching in ip- overwdm networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 18, n. 10, p. 2062-2071, 2000.

YOO, S. J. Optical packet and burst switching technologies for the future photonic internet. **Journal Lightwave Technology**, v. 24, n. 12, p. 4468-4492, dec. 2006.

ZAMI, T. Morea; LEPLINGARD, F.; BROGARD, N. The relevant impact of the physical parameters uncertainties when dimensioning an optical core transparent network. In: **Proc. European Conf. Optical Communications** (ECOC), 2008.

ZERVAS, G. S. *et al.*Multi-granular optical cross-connect: Design, analysis, and demonstration. **Journal of Optical Community Networking**, v. 1, n. 1, p. 69-84, Jun. 2009.

ZIELINSKI, K. *et al.* Optimization of power allocation for interference cancellation with particle swarm optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 13, n. 1, p. 128-150, Feb. 2009.