



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

ALYSSON JOSÉ DOS SANTOS

**ESTUDO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES  
ÓPTICAS WDM/OCDM BASEADA EM INTELIGÊNCIA DE  
ENXAME DE PARTÍCULAS**

---

Londrina  
2015

ALYSSON JOSÉ DOS SANTOS

**ESTUDO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES  
ÓPTICAS WDM/OCDM BASEADA EM INTELIGÊNCIA DE  
ENXAME DE PARTÍCULAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina (UEL), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand.

Londrina  
2015

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da  
Universidade Estadual de Londrina.**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

S237e Santos, Alysson José dos.  
Estudo de Alocação de Recursos em Redes Ópticas WDM/OCDM Baseada em Inteligência de Enxame de Partículas / Alysson José dos Santos. – Londrina, 2015.  
74 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Abril, 2015.  
Inclui bibliografia.

1. Redes Ópticas. 2. WDM/OCDM 3. PSO. 4. Restrições da Camada Física. I. Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Engenharia Elétrica II. Estudo de Alocação de Recursos em Redes Ópticas WDM/OCDM Baseada em Inteligência de Enxame de Partículas. III. Título.

CDU 621.3

ALYSSON JOSÉ DOS SANTOS

**ESTUDO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS  
WDM/OCDM BASEADA EM INTELIGÊNCIA DE ENXAME DE  
PARTÍCULAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina (UEL), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR

---

Prof. Dr. Bruno Bogaz Zarpelão  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Sidney Alves Lourenço  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR

Londrina, 03 de julho de 2015.

*Aos meus pais, mestres e professores...*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida, à minha esposa Daniele, por sua paciência, apoio e compreensão durante todo este tempo.

Aos meus pais José Antonio e Nilva, e aos meus irmãos Júnior e Viviane pelo incentivo e palavras de coragem para seguir em frente.

Aos colegas de curso que sempre me ajudaram nas horas de dificuldade e me proporcionaram excelentes momentos de risadas e convívio, Thales Nathalia, Matheus, Luis Mathias e Reginaldo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Renan Durand, não só pela constante orientação neste trabalho, mas acima de tudo pela sua amizade, paciência, tempo e conhecimento que foi compartilhado e principalmente pelo exemplo a ser seguido como mestre e amigo.

Ao Prof. Dr. Taufik Abrão por seu apoio e suporte durante a realização deste trabalho, por sua compreensão, conselhos e orientação.

A Cida, por toda sua paciência e auxílio através dos inúmeros contatos que tivemos durante o desenvolvimento deste trabalho,

Aos professores Dr. Bruno e Dr. Sidney por suas contribuições sempre positivas.

Aos companheiros da WEG e a todos aqueles que de uma forma direta ou indireta contribuíram para que fosse possível a execução deste trabalho.

A todos vocês, não há palavras que possam descrever o quanto se tornaram e o quanto foram importantes para que fosse possível finalizar este trabalho.

Agradeço também a CAPES pelo suporte financeiro.

*“Você pode encarar um erro como uma  
besteira a ser esquecida, ou como um  
resultado que aponta uma nova direção.”  
Steve Jobs*

SANTOS, Alysson José dos. **Estudo de Alocação de Recursos em Redes Ópticas WDM/OCDM Baseada em Inteligência de Enxame de Partículas**. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR, 2015.

## RESUMO

Neste trabalho é investigada a alocação de recursos em redes ópticas com tecnologia de multiplexação por divisão de comprimentos de onda/multiplexação por divisão de códigos ópticos (WDM/OCDM) baseada na otimização por enxame de partículas (PSO). O algoritmo PSO é empregado para otimizar a intensidade da potência transmitida com intuito de obter a relação sinal-ruído (SNIR) adequada, de acordo com os requisitos de qualidade de serviço (QoS). No modelo de cálculo da SNIR foram considerados códigos ópticos bidimensionais (2-D) com espalhamento temporal e espectral. Neste modelo também foram considerados os efeitos das restrições da camada física, tais como os efeitos da dispersão de polarização modal (PMD), dispersão de velocidade de grupo (GVD), ruído de emissão espontânea (ASE), além da influência da variação da temperatura ambiente nas fibra ópticas. Os principais resultados obtidos consistem na determinação dos parâmetros otimizados para o algoritmo PSO, bem como a obtenção dos valores adequados de potência transmitida conforme as restrições de QoS. Neste sentido, os resultados também ilustram os valores de potência transmitida com intuito de obter elevada eficiência energética. Finalmente, os resultados mostraram que o algoritmo PSO é eficiente para alocação de potência transmitida com intuito de mitigar os efeitos da variação de temperatura em redes ópticas.

**Palavras-chave:** Redes ópticas. WDM/OCDM. PSO. Restrições da camada física.



SANTOS, Alysson José dos. **Resource Allocation Study on Optical Networks WDM / OCDM based on particle swarm intelligence**. 74 p. Text of Dissertation (Master Degree in Electric Engineer) – State University of Londrina, Londrina-PR, 2015.

### **ABSTRACT**

In this work, a resource allocation in optical networks with wavelength division multiplexing/optical code division multiplexing (WDM/OCDM) based on particle swarm optimization (PSO) have been investigated. The transmitted power intensity is utilized to obtain an adequate signal-to-interference plus noise (SNIR), according requests of quality of service (QoS). In the SNIR model, two dimensions optical codes (2-D) with temporal/spectral spreading was adopted. In addition, in this model, the effects of physical layer restrictions, such polarization mode dispersion (PMD), group velocity dispersion (GVD), amplifier spontaneous emission noise (ASE), as well the effects of temperature are considered. In the main results, the PSO parameters tuning were performed and the transmitted power intensity according requests of QoS were correctly obtained. The transmitted power obtained results in the high energy efficiency. Finally, the results have showed the potential to mitigate the temperature variations effects over optical fibers.

**Keywords:** Optical networks. WDM/OCDM. PSO. Physical layer restrictions.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> –	Princípio do sistema WDM .....	22
<b>Figura 2</b> –	Esquema básico de um sistema de óptico de comunicação utilizando tecnologia WDMA e PCM.....	24
<b>Figura 3</b> –	Componentes de um transmissor óptico .....	25
<b>Figura 4</b> –	Componentes básicos de um receptor óptico.....	26
<b>Figura 5</b> –	Amplificador de potência, amplificador de linha e pré-amplificador.....	28
<b>Figura 6</b> –	Arquitetura de Rede OCDMA .....	33
<b>Figura 7</b> –	Arquitetura de roteamento de rede OCDM/WDM .....	34
<b>Figura 8</b> –	(a) Representação dos códigos ópticos OCDMA. (b) Esquema de codificadores e decodificadores para códigos 2-D baseados em <i>fiber Braggs gratings</i> (FBG's) .....	37
<b>Figura 9</b> –	Amplificadores em cascata .....	41
<b>Figura 10</b> –	Erro médio quadrado normalizado (NMSE) para diferentes valores de $C_1$ combinando com $C_2 = 2$ em um sistema com número de OCPs igual a 7, considerando 1span.....	53
<b>Figura 11</b> –	Somatório da evolução do vetor potência durante 800 iterações para 7 OCPs sob diferentes coeficientes de aceleração de $C_1$ e $C_2 = 2$ para 1 span.....	53
<b>Figura 12</b> –	NMSE para um número de OCPs para ( $C_1 = 1,8$ e $C_2 = 2,0$ ) e ( $C_1 = 2,0$ e $C_2 = 2,0$ ), considerando 1 span .....	54
<b>Figura 13</b> –	NMSE para o número de spans para 7 OCPs .....	55
<b>Figura 14</b> –	Taxa de convergência <i>versus</i> o número de iterações para 1 até 6 spans para (a) 4 OCPs e (b) 8 OCPs .....	56
<b>Figura 15</b> –	Somatória da evolução da potência PSO para a) 4 OCPs; b) 8 OCPs, considerando 1 span como referência com $R = 10$ Gbps. Duas situações avaliadas: i) efeito da ASE; ii) ASE, GVD e PMD .....	57
<b>Figura 16</b> –	Soma da energia por bit por OCPs em função da taxa de convergência utilizando o algoritmo PSO. Três diferente SNIR alvo, 17, 20 e 22 dB; a) 4 OCPs e b) 8 OCPs.....	59
<b>Figura 17</b> –	Penalidade da potência para a flutuação da temperatura considerando o espaçamento espectral de 0.4nm e 0.8nm, e distância de 25 e 50km para códigos de peso 8 (a) e 4 (b) .....	62

<b>Figura 18</b> – Distâncias dos nós da rede (a) transmissores para o acoplador estrela e (b) do acoplador para os receptores .....	63
<b>Figura 19</b> – Variação da temperatura dentro da rede óptica.....	63
<b>Figura 20</b> – Somatória da potência transmitida para um número de interações considerando o espaçamento espectral de 0.4 e 0.8nm para o código de peso 8 (a) e 4 (b). .....	65
<b>Figura 21</b> – Potência transmitida para cada nó considerando o espaçamento espectral de 0,4 e 0,8 nm para um código de peso 8 (a) e peso 4. (b).....	67

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela I</b> –	Otimização dos aspectos de QoS .....	58
<b>Tabela II</b> –	Somatória da energia por bit em [pJ] para uma SNIR alvo de 20 dB.....	60
<b>Tabela III</b> –	Parâmetros do sistema.....	61
<b>Tabela IV</b> –	Título da tabela .....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Modulação em Amplitude ( <i>Amplitude Modulation</i> )
ASE	Emissão Espontânea Amplificada ( <i>Amplified Spontaneous Emission</i> )
BER	Taxa de Erro de Bit ( <i>Bit Error Rate</i> )
CATV	( <i>Community Antenna Television</i> )
CDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código ( <i>Code Division Multiple Access</i> )
CIR	Relação Portadora-Interferência ( <i>Carrier to Interference Ratio</i> )
DEMUX	Demultiplexador ( <i>Demultiplexer</i> )
GVD	Dispersão da Velocidade de Grupo ( <i>Group Velocity Dispersion</i> )
ITU-T	União Internacional de Telecomunicações - Setor de Padronização de Telecomunicações ( <i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector</i> )
LED	Diodo Emissor de Luz ( <i>Light-Emitting Diode</i> )
MAI	Interferência de Múltiplo Acesso ( <i>Multiple Access Interference</i> )
MUX	Multiplexador ( <i>Multiplexer</i> )
NMSE	Erro Quadrático Médio Normalizado ( <i>Normalized Mean Square Error</i> )
OCDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código em Domínio Óptico ( <i>Optical Code Division Multiple Access</i> )
OOC	Código Óptico Ortogonal ( <i>Optical Orthogonal Code</i> )
OSNR	Relação Sinal-Ruído Óptica ( <i>Optical Signal to Noise Ratio</i> )
PCM	Modulação por Código de Pulso ( <i>Pulse Code Modulation</i> )
PMD	Dispersão por Polarização Modal ( <i>Polarization Mode Dispersion</i> )
PSO	Otimização por Enxame de Partículas ( <i>Particle Swarm Optimization</i> )
QoS	Qualidade de Serviço ( <i>Quality of Service</i> )
SBS	Espalhamento de Brillouin Estimulado ( <i>Stimulated Brillouin Scattering</i> )
SIR	Relação Sinal-Interferência ( <i>Signal to Interference Ratio</i> )
SNIR	Relação Sinal-Ruído mais Interferência ( <i>Signal to Noise Plus Interference Ratio</i> )
SNR	Relação Sinal-Ruído ( <i>Signal to Noise Ratio</i> )
WDM	Multiplexação por divisão de comprimento de onda

## CONVENÇÕES E LISTA DE SÍMBOLOS

Na notação das fórmulas, as seguintes convenções foram utilizadas:

- letras maiúsculas são conjuntos, exemplo:  $\mathcal{P}, \mathcal{G}$ ;
- letras minúsculas são elementos de conjunto, exemplo:  $\rho \in \mathbb{R}$ ;
- subscrito diferencia um elemento de um conjunto de outro, exemplo:  $g_{\text{seleção}}$ ;
- letras minúsculas em negrito expressam vetores, exemplo:  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{p}$ ;
- letras maiúsculas em negrito expressam matrizes, exemplo:  $\mathbf{G}$ ;
- $\{ \}^T$  é o operador de transposição;
- $\{ \}^{-1}$  é operador matriz inversa;
- $i$  e  $j$  são indexadores de usuários receptores e transmissores, respectivamente;
- $\| \cdot \|^2$  é a distância Euclidiana quadrática em relação à origem;
- $\mathbb{E} [ \ ]$  é o operador esperança;

Os seguintes símbolos serão utilizados:

### **Símbolo**   **Descrição**

$K$	número de usuários ativos na rede óptica
$\text{Tx}_i$	nó transmissor
$\text{Rx}_i$	nó receptor
$P_i$	potências dos lasers
$L_{ij}$	comprimento da fibra óptica
$P_r$	potência recebida
$P_t$	potência transmitida
$a$	coeficiente de atenuação da fibra
$a_{\text{estrela}}$	atenuação do acoplador estrela
$\alpha$	atenuação da fibra
$\gamma$	relação de perda excessiva
$\mathbf{G}$	matriz de atenuação da fibra
$\sigma^2$	variância
$\mathbf{P}$	vetor de potência óptica
$P_E$	probabilidade de erro de bit
$\Gamma$	interferência de onda portadora (CIR)

$\mathbf{1}^T$	$[1, \dots, 1]$
$G_{ij}$	atenuação da fibra entre o $j$ -ésimo nó transmissor e o $i$ -ésimo nó receptor
$\mathbf{I}$	matriz identidade
$\mathbf{H}$	matriz interferência normalizada
$\mathbf{P}^*$	vetor potência otimizado
$\mathcal{P}$	tamanho da população do PSO
$c_1$	coeficiente de aceleração para soluções locais no PSO
$c_2$	coeficiente de aceleração para soluções globais no PSO
$w$	inércia da partícula no PSO
$\sigma_D$	espalhamento do pulso devido aos efeitos da GVD e PMD

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	PUBLICAÇÕES E SUBMISSÕES .....	20
<b>2</b>	<b>REDES ÓPTICAS WDM/OCDM</b> .....	21
2.1	INTRODUÇÃO .....	21
2.2	COMPONENTES DO SISTEMA ÓPTICO WDM .....	23
2.3	TRANSMISSORES .....	24
2.4	RECEPTORES .....	25
2.5	MULTIPLEXADORES E FILTROS .....	27
2.6	AMPLIFICADORES ÓPTICOS .....	27
2.7	EVOLUÇÃO DO SISTEMA WDM .....	29
2.8	LIMITAÇÕES DO SISTEMA WDM .....	30
2.9	TECNOLOGIA OCDM .....	31
2.10	REDE ÓPTICA HÍBRIDA WDM/OCDM .....	32
<b>3</b>	<b>ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS</b> .....	35
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	37
3.2	RESTRIÇÕES DA CAMADA FÍSICA .....	39
3.3	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO) .....	42
3.4	ALOCAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS .....	44
3.5	OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	46
3.6	EFEITOS DA TEMPERATURA .....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS NUMÉRICOS</b> .....	50
4.1	OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS .....	50
4.2	ALOCAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS .....	55
4.3	OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	59
4.4	EFEITOS DA TEMPERATURA .....	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	69
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	71



# 1. INTRODUÇÃO

A evolução da sociedade vem contribuindo para o aumento da demanda por serviços de telecomunicações, desta forma vem sendo exigido constantemente que as estruturas de redes possuam elevada largura de banda com garantia de taxa de transmissão, segurança e Qualidade de Serviço (QoS).

Com a modernização das redes de comunicação ópticas espera-se poder atender a uma gama cada vez maior de serviços com diferentes taxas de transmissão, duração de conexão, frequência de utilização e também tempo de configuração [1]. Assim, é necessária a concepção de redes ópticas flexíveis em que os recursos sejam compartilhados de maneira dinâmica entre os usuários.

As redes ópticas são concebidas para transmissão de dados em alta velocidade com o roteamento e a comutação no domínio óptico. Neste sentido, ocorre o aumento da flexibilidade e a funcionalidade da rede, além de proporcionar a transparência com relação aos protocolos e formatos de transmissão atendendo os requisitos mínimos de QoS [2].

O sucesso do desempenho da tecnologia de Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA) nas redes sem fio, no qual o espalhamento espectral oferece maior resistência ao desvanecimento seletivo em diferentes frequências, despertou o interesse para a utilização desta técnica em redes ópticas. A fibra óptica não possui problemas com o desvanecimento seletivo, porém o espalhamento espectral pode ser empregado para combater outros efeitos físicos.

A utilização da técnica CDMA em redes ópticas permite o acesso múltiplo com flexibilidade para transmissões assíncronas, com baixa degradação na presença de agentes interferentes, podendo satisfazer as taxas de erro com a escolha correta dos códigos ópticos. Neste sentido, a utilização do CDMA nas redes ópticas tem o propósito de aproveitar toda a largura de banda disponível na fibra óptica [1][2].

O CDMA óptico ou OCDMA atraiu o interesse para pesquisas devido às suas inúmeras vantagens, tais como operação assíncrona, flexibilidade de rede, transparência nos protocolos, controle simplificado e também por deixar a rede potencialmente mais segura [3]. Porém, os níveis de interferência de múltiplo acesso (MAI) podem degradar o desempenho do sistema, principalmente considerando o efeito *near-far*. Assim, tendo em vista que todos os nós transmitem o mesmo nível de potência, os nós que estão mais perto dos

nós receptores terão seu sinal recebido com um maior nível de potência. Neste contexto, também ocorre a variação do nível de MAI em função do número de nós ativos na rede.

As redes ópticas baseadas na tecnologia OCDMA apresentam dois cenários promissores de desenvolvimento: a tecnologia de rede de transporte (*backbone*), ou seja, a camada física, com a tecnologia híbrida da divisão por multiplexação por comprimento de onda (WDM) em conjunto com o OCDM, e o segundo cenário é a rede de acesso, utilizando a técnica OCDMA. Para estes dois casos, rede de transporte WDM/OCDM e rede de acesso com o OCDMA, cada código define um usuário específico ou um canal lógico de transmissão dentro de um canal físico ou espectral comum. Dentro de um mesmo canal pode surgir a interferência entre os diferentes códigos dos usuários conhecida como MAI, que pode limitar o número de usuários simultâneos dentro do sistema [3].

Neste trabalho, um dos focos será o estudo de redes de transporte WDM/OCDM, onde os sinais são roteados através de um caminho de código óptico (OCP) a partir de um nó transmissor até um nó de destino, passando por diversos outros nós sem regeneração no domínio elétrico. Porém, neste tipo de transmissão surgem dois problemas: o primeiro com o roteamento do canal (RCA), utilizando código e comprimento de onda e o segundo é a alocação de recursos, onde os caminhos adequados são cuidadosamente selecionados entre as inúmeras possibilidades de escolha para as conexões necessárias [2].

Com o estabelecimento de um OCP, utilizando uma maior relação sinal ruído e interferência (SNIR) é possível reduzir o número de retransmissões nas camadas mais acima, aumentando assim o aproveitamento da rede. As técnicas de RCA que levam em conta as deficiências das camadas físicas para o estabelecimento dos OCPs com uma qualidade de transmissão (QoT) contribuem para o aumento do desempenho da rede [4][5]. Em um cenário de tráfego dinâmico, o objetivo principal é minimizar a probabilidade de bloqueio das conexões através do roteamento e alocação de canais, mantendo um nível aceitável de potência óptica e de SNIR através de todos os possíveis OCPs [6]. Além disso, é possível transmitir através de diferentes canais em diferentes rotas ópticas, com diferentes níveis de QoS, que dependem da SNIR, da dispersão e de efeitos não lineares inerentes às fibras [6]. Sendo assim, é desejável ajustar os recursos da rede (taxa de transmissão, potência transmitida, ganho dos amplificadores, entre outros), baseados em algoritmos distribuídos ao longo da rede [7].

Como resultado desta otimização dinâmica, temos um aumento da flexibilidade e da capacidade da rede [6][7]. Entretanto, a degradação da SNIR vem como um grande desafio, uma vez que o problema do efeito *near-far* aparece juntamente com a MAI

[7]. Portanto, se faz necessário estabelecer um controle eficiente da alocação de recursos, como por exemplo, o controle da potência, necessário para que seja possível superar esse problema, aumentando o desempenho e otimizando a utilização da rede. Esta solução pode ser alcançada através da otimização da SNIR [6].

No estudo de alocação de recursos em redes ópticas, o controle de potência do sinal transmitido vem sendo avaliado dentro dos contextos das redes de acesso, visando solucionar o problema do efeito *near-far* [7][8] e estabelecer níveis aceitáveis de QoS na camada física [9][11]. O impacto deste controle de potência em protocolos de acesso aleatórios foi investigado em [7]. O efeito do problema do *near-far* e uma revisão detalhada sobre controle de potência utilizando algoritmos distribuídos foi apresentado em [8]. De outra forma, o conceito de várias classes transmitindo em diversos níveis de QoS foi aplicado em [9]-[12].

Diversos níveis de potência foram obtidos através da utilização de atenuadores [10], com o ajuste de codificadores e decodificadores [11], e ajustando os transmissores [12]. Por outro lado, a otimização de parâmetros do sistema, tais como potência de transmissão e taxa de informação vem sendo estudados [13][15]. A evolução de componentes e dispositivos em conjunto com as técnicas de otimização heurísticas aplicadas ao problema de alocação de recursos, tais como Busca Local, Algoritmos Genéticos (GA), Inteligência por Enxame de Partículas (PSO), Otimização por Colônia de Formigas (ACO) e Teoria de Jogos vem sendo aplicados para regular a potência de transmissão, variação da taxa de transmissão e número de usuários ativos para maximizar a transferência de dados, otimizando o desempenho das redes de uma forma geral [16-17].

Neste contexto, foi verificado que as redes WDM/OCDM trazem uma combinação de desafios para alocação de recursos, como por exemplo enlaces longos, múltiplos enlaces, geração e acúmulo de ruído de emissão espontânea (ASE) e também a MAI gerada pelos OCPs. Assim, os efeitos da camada física como a dispersão cromática ou GVD (Dispersão de Velocidade de Grupo) e dispersão por polarização modal (PMD), que são mecanismos que afetam significativamente o desempenho geral dos sistemas ópticos de comunicação devem ser considerados no processo de alocação de recursos [6][18]-[21].

Outro ponto avaliado e apresentado no trabalho consiste no estudo da alocação de recursos em redes de acesso com tecnologia OCDMA para combater os efeitos da temperatura. Recentemente, foi verificado que redes OCDMA, mesmo utilizando fibras de compensação de dispersão, vem sofrendo diminuição de desempenho em função da variação da temperatura externa [22][23]. A variação da temperatura causa o deslizamento entre as

janelas de tempo destinadas para os diferentes pulsos ópticos em comprimentos de onda distintos, em códigos ópticos espalhados em comprimento de onda e tempo. Estes códigos são conhecidos como códigos bidimensionais (2-D) [20]. Com intuito de combater os efeitos da temperatura ambiente sobre as redes OCDMA com códigos 2-D, vem propondo-se a otimização dos parâmetros dos códigos como por exemplo, a redução do espaçamento espectral [22] ou adequação do melhor peso do código por meio de sistemas de inteligência *fuzzy* [23]. Assim, em [22] a distorção temporal durante a transmissão é controlada com base no ajuste da distância espectral e o espaçamento entre os comprimentos de onda individuais utilizados na formação dos códigos 2-D. Por outro lado, em [23] foi proposto um sistema baseado em lógica *fuzzy* para ajustar o peso do código no codificador, estimando as variações das temperaturas ambiente que são monitoradas pelos sensores externos nas redes

Neste contexto, a otimização da SNIR por meio da alocação de recursos, como por exemplo a potência transmitida, pode combater de forma dinâmica os efeitos da variação da temperatura ao longo da rede. O controle da alocação de recursos consiste de uma solução de baixo custo e complexidade. A intensidade do sinal óptico que é transmitido pode ser ajustada diretamente em função da SNIR desejada.

Para este trabalho, serão consideradas somente as fibras ópticas enterradas, pois não foi encontrado na literatura atual, trabalhos relacionados a variação da temperatura para as fibras instaladas em meio aéreo, mesmo sendo conhecido que estas instalações também sofrem este mesmo tipo de influência.

O objetivo geral desta dissertação é investigar a alocação de recursos em redes ópticas empregando o PSO como técnica de otimização da SNIR em função das características das redes abordadas. 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 [9][17]. Os códigos ópticos que serão adotados neste estudo são os códigos 2-D (tempo/comprimento de onda), que aumentam o desempenho da rede quando comparados com códigos unidimensionais [24][25]. Desta forma, os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Estabelecer a relação de parâmetros adequados do algoritmo PSO para obter o melhor desempenho na alocação de recursos.
- Investigar a utilização do PSO na alocação de recursos em redes WDM/OCDM para alocação de recursos considerando as restrições da camada física (ASE, GVD, PMD), considerando as restrições de QoS e aumento da eficiência energética da rede.
- Propor a utilização da alocação de recursos baseado em PSO para combater

os efeitos da temperatura em redes OCDMA.

A pesquisa e os resultados obtidos nesta dissertação estão divididos da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma breve conceituação das redes ópticas que são objeto de estudo neste trabalho, suas características principais, funcionamento e equipamentos transmissores e receptores, bem como uma descrição do meio óptico.

O capítulo 3 traz as informações sobre a codificação OCDM e a descrição do modelo proposto para o controle de potência em redes WDM/OCDM através da otimização por inteligência de espalhamento de partículas (PSO).

No capítulo 4 são demonstrados os resultados obtidos através do modelo proposto junto com as discussões dos resultados. O capítulo mostra que o algoritmo para a otimização da alocação de potência utilizando o PSO aparece como uma excelente solução para este tipo de problema.

Em 5, são apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho, junto com as perspectivas de trabalhos futuros relacionados ao tema desta pesquisa.

## 1.1 PUBLICAÇÕES

Esta pesquisa possibilitou o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Fábio Renan Durand, Larissa Melo, Lucas Ricken Garcia, Alysson José dos Santos e Taufik Abrão, **“Optical Network Optimization Based on Particle SwarmIntelligence”** , In: Taufik Abrão. (Org.). Search Algorithms for Engineering Optimization. 1ed.Rijeka, New York, Shanghai: InTech, 2013, v. 1, p. 143-172.
- Alysson José dos Santos, Fábio Renan Durand and Taufik Abrão, **“Mitigation of Environmental Temperature Variation Effects in OCDMA Networks Using PSO-Power Control”**, *JOCN - Journal of Optical Communications and Networking (in press)*.

## 2. REDES ÓPTICAS WDM/OCDM

Neste capítulo serão abordadas as principais características das redes ópticas WDM/OCDM e OCDMA. Desta forma, será demonstrada a evolução das redes WDM e técnicas empregadas para a integração entre o protocolo de Internet (IP) e estas redes. Também serão apresentadas as características técnicas das redes OCDM e investigados os tipos de códigos utilizados.

### 2.1 INTRODUÇÃO

As redes de transmissão ópticas se tornaram comerciais ao final da década de 1970, quando começaram a ser empregadas na indústria de telecomunicações, redes de dados e em televisão a cabo (CATV) [26].

Inicialmente, os sistemas ópticos utilizavam padrões proprietários, e foram implementados nas redes públicas de telefonia. Existiam então, diferentes tecnologias que eram adotadas por cada um dos fornecedores, o que dificultava a interconexão destas redes deixando as mesmas com um custo elevado.

O padrão de rede óptica mais utilizado para as redes de primeira geração é o de rede óptica síncrona (SONET/SDH), pois este padrão incorpora diversos benefícios, como por exemplo interconexão de diferentes equipamentos e fabricantes, facilidade do gerenciamento de rede, multiplexação dos sinais, entre outros. A amplificação, repetição, comutação e roteamento das mensagens nessa rede se dão no domínio elétrico, através de circuitos eletrônicos, e estas redes utilizam normalmente um único comprimento de onda durante a transmissão, que pode ser 1310 ou 1550nm.

As fibras ópticas tem como principais características sua elevada largura de banda, perdas de transmissão baixas, imunidade a interferência eletromagnética e sua segurança durante o transporte de informações [26]. A busca para a utilização completa de toda a capacidade de transmissão das redes ópticas, através da utilização de toda a largura de banda disponível na faixa de comprimentos de onda entre 1300 e 1600 nm em fibras monomodo vem sendo discutida desde o início da aplicação comercial das fibras em redes de transmissão [27].

A forma mais eficiente de aproveitar toda esta largura de banda existente nas redes ópticas é a utilização de diferentes comprimentos de onda dentro de uma mesma fibra, através da multiplexação WDM [28]. O WDM é uma tecnologia em que a informação é

transmitida através de diferentes comprimentos de onda, que são combinados por meio de um multiplexador óptico e transportados através de um único par de fibras como ilustra a Figura 1.

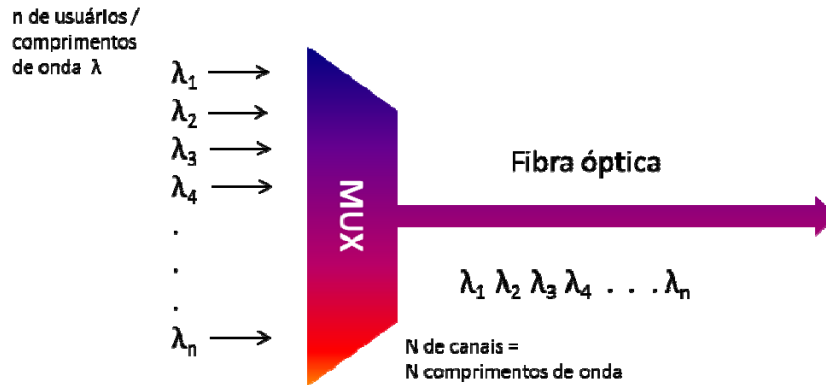


Figura 1 – Princípio do sistema WDM

A tecnologia WDM vem sendo utilizada extensivamente na camada de transporte [29][30], e os caminhos virtuais são configurados no meio físico, ou seja, dentro dos equipamentos ópticos, com conexões baseadas em comutadores ópticos. Como consequência deste esquema, a rede de transporte WDM proporciona transparência e flexibilidade de configurações reforçando a capacidade da rede já existente, porém, o espaçamento entre os canais WDM está sujeito a estabilidade das fontes emissoras de luz, tornando de grande importância o controle e alocação de recursos de comprimento de onda desde os comprimentos de onda disponíveis até a quantidade de nós na rede.

As primeiras redes WDM comerciais surgiram nos anos 90, junto com o desenvolvimento dos amplificadores ópticos de érbio (EDFA), que são compostos de uma fibra óptica de sílica com núcleo dopado com átomos ionizados de érbio,  $\text{Er}^{3+}$ . Tais sistemas comportavam de 2 a 4 canais ópticos com espaçamento em 3 e 5 nm. O aparecimento de dispositivos mais seletivos com relação aos comprimentos de onda e que, diminuía a separação entre os canais ópticos implicou então no surgimento de sistemas WDM comerciais que comportavam maior quantidade de canais, por exemplo, 8, 16, 40 canais, entre outros.

Inicialmente os sistemas utilizando as redes WDM eram empregados somente em enlaces ponto-a-ponto, tendo como objetivo principal o aproveitamento de toda a largura de banda disponível nas fibras ópticas, sendo assim uma alternativa à instalação de novas fibras. Com a necessidade de se ter o controle de tráfego dentro do domínio óptico através de pontos intermediários existentes entre os enlaces ponto-a-ponto, foram inseridos



dentro destes enlaces elementos multiplexadores que adicionavam e retiravam comprimentos de onda (OADM) [28].

Tais dispositivos podem inserir e retirar informações dentro de comprimentos de onda determinados, e no início, estes OADMs utilizavam uma configuração estática, depois, com o desenvolvimento da tecnologia os OADMs se tornaram dinâmicos podendo inserir e retirar as informações de comprimentos de onda dinâmicos [31].

## **2.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA ÓPTICO WDM**

Na arquitetura da rede WDM cada um dos nós é equipado com poucos transmissores e receptores ópticos [32]. Neste modelo de rede, cada um dos lasers transmissores opera em um único comprimento de onda durante a transmissão e cada receptor pode fazer com que um sinal originado em um determinado nó de acesso possa ser roteado para algum nó dentro da rede (inclusive nós intermediários), após um determinado número de saltos. A conversão do comprimento de onda é determinante para que seja estabelecido o caminho virtual.

Os transmissores destas redes consistem em um conjunto de laser semicondutor com realimentação distribuída (DFB), que pode ter modulação interna ou externa para cada comprimento de onda, combinando os sinais de diferentes comprimentos de onda dentro da mesma fibra através de um multiplexador óptico. Neste modo de transmissão, pode ser utilizado um amplificador óptico de potência para aumentar a potência transmitida.

Conforme a distância entre os transmissores e receptores aumenta podem ser utilizados equipamentos que fazem a compensação da dispersão, que é o alargamento do pulso óptico ao longo da transmissão. O sinal poderá ser amplificado por um pré-amplificador antes que seja passado através de um demultiplexador, onde então, cada comprimento de onda é recebido separadamente por cada fotodetector. Neste sentido a multiplexação e demultiplexação ocorrem dentro do meio óptico, sendo cada um dos usuários devidamente identificado por um comprimento de onda.

A capacidade de transmissão destas redes está diretamente ligada ao número de usuários (comprimentos de onda) disponíveis, e como cada um dos usuários é considerado ortogonal, eles não são interferentes entre si desde que não estejam sob efeitos degenerativos inerentes as fibras [23], porém, existem algumas limitações relacionadas aos efeitos dispersivos que provocam a interferência intersimbólica [23].

As redes ópticas convencionais podem ser divididas em três etapas: geração, transmissão e recepção dos sinais. A Figura 2 mostra um exemplo desta rede, onde é possível visualizar a geração e a codificação do sinal no domínio elétrico e sua conversão para o meio óptico, onde este é transmitido em taxas mais altas.

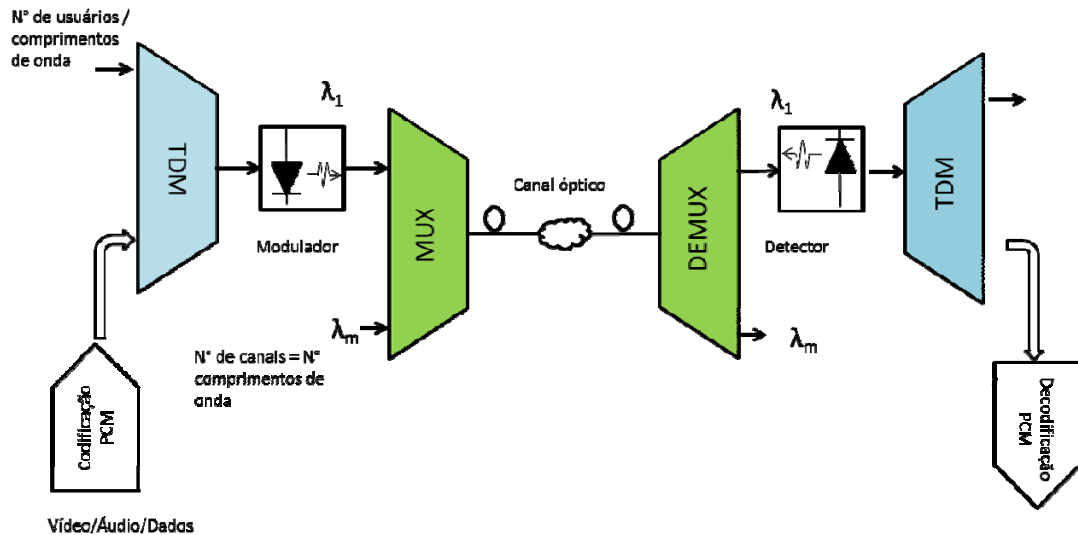


Figura 2 – Esquema básico de um sistema de comunicação utilizando tecnologia WDM.

### 2.3 TRANSMISSORES

Os transmissores ópticos tem como papel principal realizar a conversão de um sinal elétrico à forma óptica e lançar este sinal no enlace. Normalmente são fontes de luz, tais como LED's e Lasers. Dentro do sistema WDM, a fonte de luz mais importante é o laser, que é basicamente um amplificador óptico fechado dentro de uma cavidade de reflexão. Estes lasers são compactos, geralmente da ordem de micrometros, e podem ser fabricados em grandes volumes com a tecnologia avançada de semicondutores.

Dentre os lasers transmissores, temos o laser de fibra de érbio (*erbium fiber lasers*) que pode conseguir altas potências de saída, tipicamente entre 0 e 20 dBm, apesar de lasers semicondutores usados como fontes WDM tipicamente terem potência de saída entre 0 e 10dBm [33]. Para os sistemas WDM é desejável a utilização de lasers sintonizáveis. Lasers DFB para comprimentos de onda fixos trabalham bem para diversas aplicações atuais, entretanto, para cada comprimento de onda é necessário um único laser, o que implica por exemplo, que para um sistema com 100 diferentes comprimentos de onda sejam utilizados

100 diferentes lasers transmitindo. Estes lasers sintonizáveis são constantes em diversos laboratórios WDM e em ambientes de testes [33], em que são largamente aplicados para caracterizar e testar os mais diversos tipos de equipamentos ópticos que provocam oscilações através de retornos positivos.

A potência transmitida na fibra é um parâmetro extremamente importante para projetos, e com o seu controle é possível aumentar o espaçamento entre os amplificadores, porém a ocorrência de efeitos não lineares acaba por limitar esta potência de entrada do sistema.

A figura 3 nos mostra os componentes de um transmissor óptico.

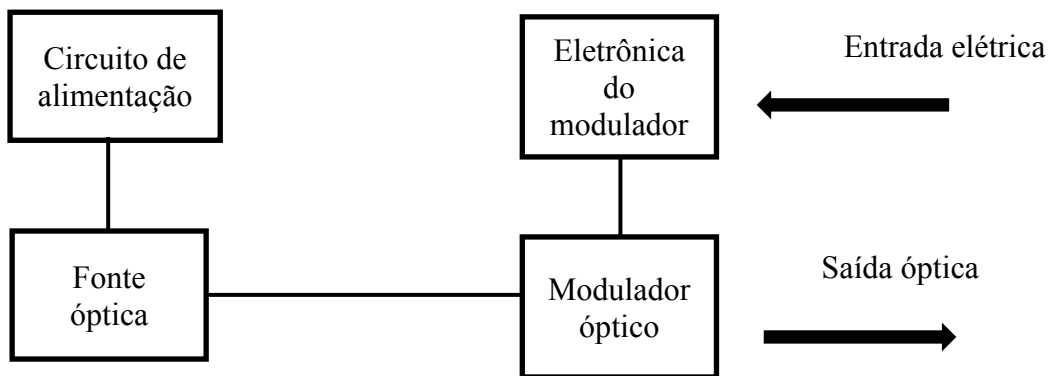


Figura 3 – Componentes de um transmissor óptico

## 2.4 RECEPTORES

Os receptores ópticos tem como papel principal a conversão dos sinais ópticos novamente em sinais elétricos e para que seu projeto seja eficiente, ou seja, para que ele detecte e decodifique o sinal da melhor forma, o projeto depende diretamente da definição da modulação utilizada no sistema e esta modulação é feita por um sistema que identifica os bits em 1 e 0, dependendo da amplitude do sinal transmitido.

Os principais parâmetros que são associados aos receptores dentro de uma rede estão diretamente ligados à sua sensibilidade e sobrecarga. Pode-se definir a sensibilidade do receptor como sendo a potência média óptica que é necessária para se transmitir uma certa quantidade de dados, e ela é determinante nos projetos ópticos e geralmente é definida como a menor taxa de erro de bit (BER) necessária para garantir o recebimento do pacote transmitido. Normalmente esta taxa é medida na faixa de  $10^{-12}$ , utilizando uma sequência de bits pseudo-aleatória  $2^{23}-1$ . Já os parâmetros de sobrecarga tratam da potência máxima de entrada que o receptor pode aceitar.

A precisão do circuito óptico, transmissor e receptor, depende diretamente da SNR do sinal que é gerado no fotodetector.

Abaixo uma demonstração básica dos componentes do receptor óptico.

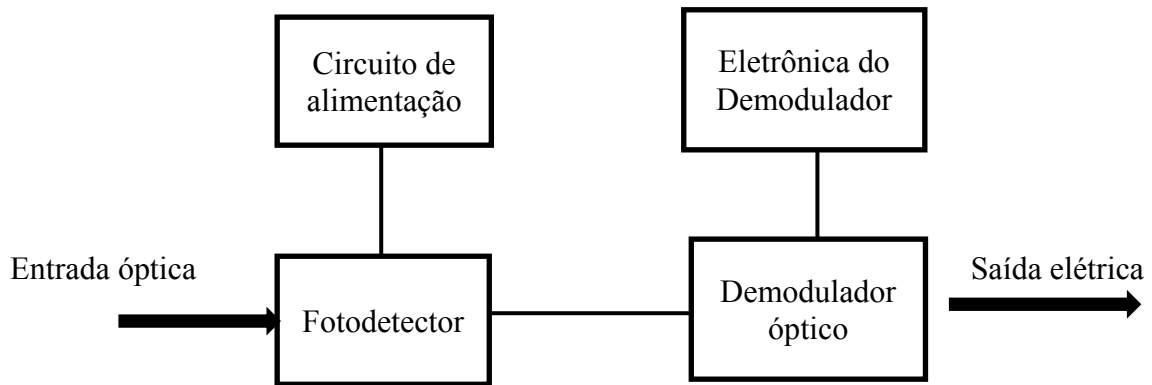


Figura 4 – Componentes básicos de um receptor óptico

Os fotodetectores tem como função principal receber o sinal luminoso transmitido e converter esta intensidade luminosa, que tem uma certa potência em uma corrente elétrica, para que possa ser posteriormente amplificada e demodulada. Geralmente, são feitos de material semiconductor baseados no mecanismo elétrons-lacuna, o que significa que quando expostos a incidência de fótons, os mesmos são absorvidos na camada de valência, então temos uma redução na sua resistência ôhmica, e se energia absorvida através dos fótons for maior que a energia necessária para romper a banda proibida, com esta ocorrência os elétrons absorvem esta energia e passam para a camada de condução, deixando lacunas na camada de valência.

No processo de fotodeteção que ocorre no receptor são adicionados ruídos, tais como ruído quântico e ruído balístico, cuja origem está na natureza dos elétrons. Nenhum receptor prático opera no limite do ruído quântico, pois eles sofrem influência de diversas outras fontes de ruído, como por exemplo o ruído térmico, que é interno no receptor, entretanto, diversas outras tem origem no enlace durante a propagação do sinal na fibra ou nos transmissores ópticos.

Um exemplo de influência ao qual o sistema está exposto é o ruído causado pela amplificação do sinal óptico no enlace de fibra, chamado ruído de amplificação que é originado no processo fundamental da emissão espontânea, seguido da dispersão cromática

nas fibras, sendo esta última uma influência que adiciona ruído na transmissão através da interferência intersimbólica e ruído de partição modal.

Desta forma, a sensibilidade de um receptor pode ser determinada através da consideração do efeito cumulativo de todos os possíveis mecanismos de ruído que podem vir a degradar a SNR no circuito de decisão.

## **2.5 MULTIPLEXADORES E FILTROS**

Os filtros ópticos são componentes essenciais em sistemas de transmissão para aplicações de multiplexação e demultiplexação de comprimentos de onda nos sistemas WDM [33]. A necessidade de multiplexação veio motivada devido ao fato de ser muito mais econômico transmitir dados em altas taxas através de uma única fibra, do que transmiti-los em baixas taxas sobre múltiplas fibras [33].

Os multiplexadores tem uma função dupla nas redes ópticas, WDM, pois podem permitir a inserção ou retirada de determinados números de comprimentos de onda que serão regenerados, e a outra função seria amplificar o sinal total transmitido regenerado, ou seja, o sinal teria sua relação sinal ruído corrigida.

## **2.6 AMPLIFICADORES ÓPTICOS**

Em sistemas ópticos, mesmo sendo possível transmitir os sinais por longas distâncias, eles necessitam antes ser amplificados. Os receptores irão converter o sinal óptico em um sinal elétrico através de um fotodiodo e irão amplifica-lo, convertendo este sinal novamente em um sinal elétrico.

Os amplificadores ópticos são dispositivos cuja principal finalidade é amplificar um sinal fraco e distorcido, com o objetivo de regenerar este sinal. Este tipo de equipamento realiza a amplificação dentro do domínio óptico, sem realizar a conversão do sinal óptico em um pulso elétrico. Como estes amplificadores somente operam em uma determinada largura de banda específica no espectro de frequência, a faixa de frequência de sistemas ópticos tem grande dependência destes, porém, a amplificação óptica não depende da taxa de transmissão de dados.

A amplificação óptica se dá através da emissão estimulada, onde tem-se uma fonte de energia com comprimento de onda adequado, normalmente entre 980 nm ou 1480 nm, que é propagada dentro do núcleo da fibra, causando assim a excitação de seus íons.

Quando esta amplificação é totalmente óptica ela pode apenas aumentar o nível de potência de sinal ao invés de restaurar também a forma de onda e o tempo de duração, o que acaba por diferenciá-la da amplificação optoeletrônica. Este modo de amplificação é conhecido como 1R (regeneração) e proporciona total transparência nos dados, pois o processo de amplificação não depende do formato de modulação do sinal óptico. Na maioria das redes atuais, que utilizam fibra óptica somente como meio de transmissão, os sinais ópticos são primeiro convertidos para sinais eletrônicos para posteriormente serem amplificados e retransmitidos como sinais ópticos. Este tipo de amplificação é chamado de 3R (regeneração, reformatação e retemporização), porém esta técnica proporciona menor transparência do que a técnica 1R, e este é um fator essencial a se considerar nas redes ópticas de nova geração.

Nas redes WDM que possuem um sistema de amplificação eletrônica, cada um dos comprimentos de onda deve ser separado antes da amplificação eletrônica, e posteriormente estes sinais são recombinaados antes da retransmissão. Para que seja possível eliminar a necessidade de multiplexadores e demultiplexadores ópticos, é necessário que estes amplificadores ópticos aumentem a força do sinal óptico sem convertê-lo para sinais na forma elétrica.

O amplificador mais comum nos sistemas WDM é o amplificador a fibra dopada com érbio (EFDA) [33], que tem como principal vantagem a capacidade de amplificar muitos canais e comprimentos de onda simultaneamente.

O érbio é um elemento que quando excitado emite luz. Ele recebe um sinal fraco, e uma luz de comprimento de onda de 980nm ou 1480nm é injetada por um laser no sistema, estimulando os átomos do érbio a liberar a energia armazenada como luz na faixa de 1550nm.

Os amplificadores são utilizados com três diferentes configurações, conforme a figura 5. Os pré amplificadores são utilizados apenas em frente a um receptor para melhorar sua sensibilidade. Já os amplificadores de linha são utilizados tipicamente no meio do enlace para proporcionar uma compensação das perdas.

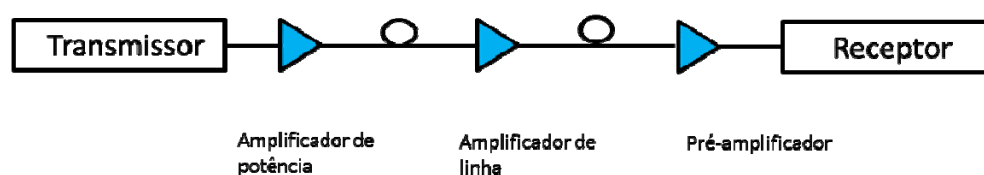


Figura 5 – Amplificador de potência, amplificador de linha e pré-amplificador

Como os amplificadores não são dispositivos perfeitos, os projetistas dos sistemas devem se preocupar com estas imperfeições quando são usados amplificadores. Deve ser levado em conta que eles produzem ruído, que o ganho na entrada do amplificador depende de forma direta da potência de entrada e que para altas potências de entrada, o EDFA tende a saturar diminuindo o ganho. Os EDFAs são atrativos para as redes WDM, pois o ganho dos mesmos não é fixo ao longo de todo o caminho, então alguns canais tem mais ganho do que outros e isso se agrava se utilizados em uma série com amplificadores em cascata.

## 2.7 EVOLUÇÃO DO SISTEMA WDM

A evolução dos sistemas WDM se deu através de diversos pontos, tais como transporte ponto-a-ponto, com alta capacidade de transmissão, transporte multiponto WDM, com acesso aos canais fixos e com o roteamento óptico WDM que proporcionou conexões dinâmicas e capacidade de restauração das rotas ópticas. A necessidade de manipulação no domínio óptico de parte do tráfego transmitido em pontos intermediários dos enlaces ponto-a-ponto ocasionou a agregação ao enlace de multiplexadores de adição e retirada de comprimentos de onda, OADM, [28].

Os primeiros OADMs retiravam apenas um comprimento de onda pré determinado, e isso ocasionava um problema de mobilidade, sendo necessário ter disponível muitas unidades em estoque, para trocas e reposições nas redes. Com a evolução dos OADMs, e a continuidade da busca da flexibilização das redes WDM multipontos foram desenvolvidos os OXCs (*optical crossconnects*), que possuem funcionamento similar aos OADMs, porém diferenciam-se no número de fibras que entram e saem dos dispositivos. Este tipo de equipamento tem a função de realizar o roteamento de comprimentos de onda em nível óptico, permitindo minimizar o número de equipamentos nas redes WDM e assim diminuir os pontos de possíveis defeitos, além de otimizar o espaço ocupado nas estações.

A função dos OXCs é conectar qualquer comprimento de onda que chega a uma das portas de entrada com a outra interface de saída do dispositivo. A porta de saída é escolhida através do controle de rede e a tecnologia que vem apresentando o melhor desempenho na fabricação dos comutadores ópticos que compõem os OXCs é a tecnologia dos MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Switches*), que consistem em um conjunto de

pequenos espelhos que funcionam alterando o ângulo de reflexão da luz em concordância com o sinal do controle elétrico.

Atualmente existem OCXs baseados em MEMS que possuem capacidade de comutação de 256 comprimentos de onda. Também são utilizadas outras tecnologias tanto em OADMs como em OCXs, tais como os cristais líquidos ferroelétricos FLCs (*Ferroelectric Liquid Crystals*), redes de arranjo de guia de comprimento de onda AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*) e redes de Bragg em fibra FBG (*Fiber Bragg Grating*) [34].

As principais características das redes WDM são:

- Reutilização dos comprimentos de onda: apesar da limitação de comprimentos de onda dentro do mesmo enlace, esta possibilidade aumenta a capacidade da rede, permitindo que ela tenha um número grande de caminhos, mesmo com número limitado de comprimentos de onda;
- Chaveamento: estes caminhos podem ser ativados e desativados conforme a necessidade da rede, como num processo de uma rede por comutação de circuitos, porém, a velocidade deste processo em redes ópticas tendem a ser mais rápidas devido a diferença da largura de banda alocada;
- Confiabilidade: a rede pode se rearranjar em caso de falhas nos enlaces, ou seja, ela evita que a comunicação seja perdida. Para que isso ocorra, o tempo de reconfiguração deve ser muito pequeno;
- Transparência: é a capacidade de se transportar dados em uma variedade de taxas, protocolos, variedades, protocolos e formato, suportando várias camadas superiores operando simultaneamente.

## 2.8 LIMITAÇÕES DO SISTEMA WDM

Um dos grandes limitadores do sistema WDM é a interferência existente entre os canais (*crosstalk*), pois quase todos os componentes do sistema WDM introduzem *crosstalk* de alguma forma [33], por exemplo os filtros, multiplexadores/demultiplexadores de comprimento de onda, amplificadores e até mesmo a própria fibra devido a não linearidade da mesma.

A crescente demanda por largura de banda vem forçando as operadoras a aumentar cada vez mais a capacidade de seu *backbone* de transporte. Das limitações que as redes ópticas vem apresentando devido a limitação do número de comprimentos de onda na



camada WDM como tecnologia de transporte, surgiram as redes ópticas híbridas WDM/OCDM, em que a camada de transporte é composta por caminhos ópticos virtuais baseados em códigos e comprimentos de onda [32][35].

## 2.9 A TECNOLOGIA OCDM

A utilização da tecnologia CDMA no meio óptico vem com o propósito de aproveitar toda a largura de banda disponível nas fibras ópticas. Considerando que os sistemas OCDMA fornecem um meio para a multiplexação assíncrona dos sinais ópticos, eles acabam por remover os atrasos que existem com a multiplexação eletrônica.

A aplicação da tecnologia CDMA em meio óptico consiste em efetuar operações de codificação e decodificação em domínio totalmente óptico, provendo assim o acesso à rede. Se o objetivo for prover a multiplexação dos canais em uma rede de transporte, esta modulação é chamada de OCDM. A diferença conceitual existente entre WDM e CDM pode ser entendida da seguinte maneira: WDM são técnicas de partição do canal entre os usuários, enquanto com o CDM todos os usuários compartilham toda a largura de banda de modo aleatório [36].

Esta técnica é proveniente das técnicas de comunicação via rádio *Spread Spectrum* desenvolvidas a partir de 1950 [39], que foram desenvolvidas em decorrência da necessidade de técnicas seguras de transmissão que eram empregadas nas aplicações militares e também devido à restrição de largura de banda dos sistemas de transmissão via rádio [40].

Em [32], foram realizados estudos para implementação de uma rede de OCDMA introduzindo estratégias de múltiplos saltos (*multihop*) utilizando codificação do sinal [32]. É demonstrado que esta abordagem se mostra eficaz para a expansão de redes de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) já existentes [32]. Estes estudos demonstraram que o OCDM pode ser empregado de forma eficaz para a atual escala de redes de múltiplos saltos WDM sem uma significativa diminuição dos recursos de comprimento de onda.

Com este tipo de cenário, um caminho virtual de código óptico pode ser introduzido, sendo definido como um caminho óptico determinado por um código óptico alocado entre os enlaces do sistema.

A conversão dos códigos é a chave para a total funcionalidade da rede, pois são análogas ao papel de conversão de comprimento de onda [37] para caminhos virtuais de comprimento de onda (VWP's) dentro da rede de transporte WDM. Também em [32], é

demonstrado que a conexão cruzada óptica localizada em um nó também serve para estabelecer o VOCP na tecnologia híbrida WDM/OCDM da camada de transporte.

## 2.10 REDE ÓPTICA HÍBRIDA WDM/OCDM

Devido às limitações que as redes ópticas apresentam quando falamos das redes WDM na camada de transporte, em que estas possuem um número limitado de comprimentos de onda em função da não linearidade das fibras ópticas [38] e *crosstalk*, surgiram as redes ópticas híbridas WDM/OCDM, onde a camada de transporte é composta por caminhos ópticos virtuais baseados em códigos e comprimento de onda (*Virtual Optical Code Path/Virtual Wavelength Path*) [32] [35]. Esta é uma solução potencial para problemas de alocação de comprimento de onda que poderia limitar a expansão das redes de transportes baseadas em WDM.

Os princípios básicos da tecnologia híbrida de multiplexação de divisão por comprimento de onda e multiplexação de divisão de códigos ópticos (WDM/OCDM) permite obter uma melhora da capacidade e da escalabilidade de redes ópticas, permitindo o dimensionamento do número de canais utilizáveis em duas dimensões: código e comprimento de onda, em uma rede que ficou conhecida como caminhos virtuais de comprimento de onda e caminhos virtuais de códigos ópticos (VOCP/VWP) [35].

Este conceito (VOCP/VWP) é introduzido na camada de transporte da rede óptica, como uma potencial solução para as limitações de uso de comprimentos de onda quando utilizada a tecnologia WDM como tecnologia de transporte [32] [35]. O diferencial desta tecnologia é a conversão dos códigos ópticos em comprimentos de onda.

Nas redes WDM/OCDM, os comprimentos de onda dentro dos pulsos ópticos são combinados de maneira a formar códigos, ou seja, ao invés de cada comprimento de onda representar um único usuário, cada um destes é combinado com códigos ópticos, aumentando assim a quantidade de caminhos virtuais, e, conseqüentemente aumentando o número de usuários obtendo um melhor desempenho da rede com maior número de recursos disponíveis.

Para esta dissertação, a rede óptica WDM/OCDM considerada é formada por nós que possuem núcleos ópticos de roteamento interconectados através de links com caminhos de códigos ópticos definidos por padrões de códigos de pulso e comprimentos de onda, conforme será demonstrado na Figura 7. Os links são compostos por sequências de *span* e cada *span* é constituído de uma fibra óptica e um amplificador.

Nesta dissertação, a rede que será considerada será uma rede baseada em acoplamento estrela, conforme demonstrado na figura 6, que nos mostra um exemplo de uma arquitetura de rede óptica OCDMA.

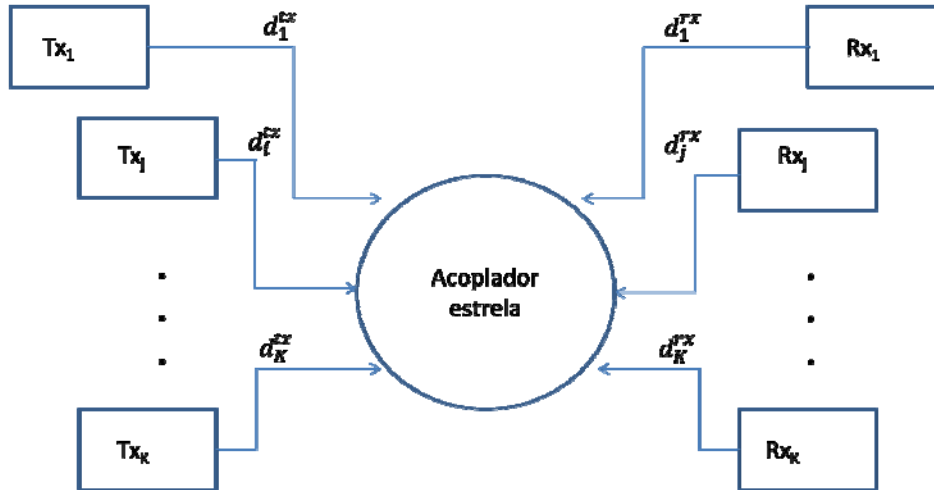


Figura 6 – Arquitetura de rede OCDMA

Os nós transmissores e receptores criam um caminho óptico virtual, baseado no comprimento total do link que é dado por:

$$d_{ij} = \sum_i d_i^{tx} + \sum_j d_j^{rx} \quad (1)$$

onde  $d_i^{tx}$  é o comprimento do span a partir do nó transmissor para o roteador óptico e  $d_j^{rx}$  é o span entre os roteadores ópticos nos OPC e os nós receptores. A potência recebida através do  $j$ -th nó é dada por  $P_r = a_{star} p_i G_{amp} \exp(-\alpha_f d_{ij})$  onde  $p_i$  é a potência transmitida através do  $i$ -th nó transmissor,  $\alpha_f$  é a atenuação da fibra ( $\text{km}^{-1}$ ),  $a_{star}$  é a atenuação do acoplamento estrela (unidades lineares) e  $G_{amp}$  é o ganho total no roteamento. Considerando as unidades em decibéis, temos  $a_{star} = 10 \log(K) - [10 \log_2(K) \log_{10} \delta]$ , onde  $\delta$  é a perda relativa [6]. A distância típica entre os amplificadores ópticos é 60 km [20].

O roteamento óptico nesta rede consiste em roteadores conversores de códigos ópticos paralelos em códigos bidimensionais [25], e cada grupo de conversores de código em paralelo é pré conectado a uma saída específica para realizar o roteamento, e esta saída será responsável por selecionar o código pré determinado dentro do tráfego entrante na transmissão.

Este tipo de roteamento não requer fontes emissoras de luz ou conversão óptica-elétrica-óptica e pode ser aumentado pela adição de novos módulos [27], tornando a configuração desta rede mais simples. O código transmitido percorre um caminho determinado por uma sequência código particular. Para as características de viabilidade foram considerados equipamentos de rede, tais como, dispositivos de processamento de código (codificadores, decodificadores no transmissor e receptor), acopladores estrela e roteadores ópticos que poderiam ser feitos de modo robusto, com baixo custo, leves e através de tecnologias comerciais [25] [27].

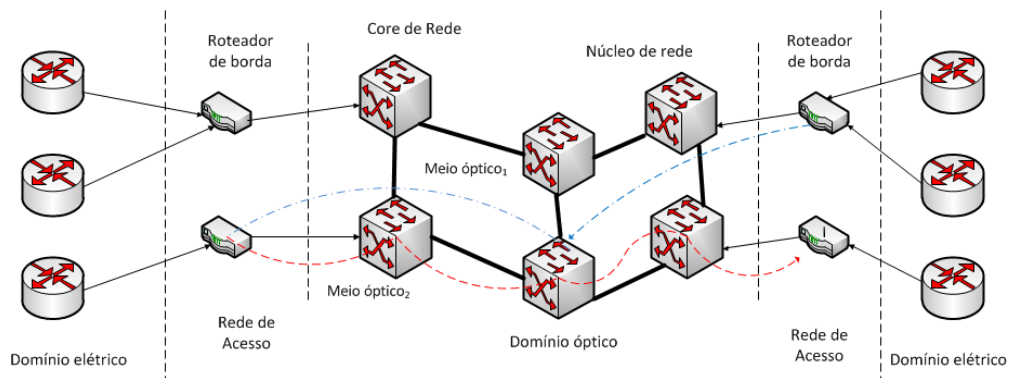


Figura 7 – Arquitetura de roteamento de rede OCDM/WDM.

### 3. ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS

A alocação de recursos em redes ópticas é determinante para que seja possível termos o maior aproveitamento possível da largura de banda disponível neste modo de rede, bem como, para que as transmissões ocorram de forma a minimizar os impactos que os efeitos não lineares das fibras causam durante a transmissão.

Para isso, se faz necessário um sistema robusto, utilizando codificadores e decodificadores que possam realizar a transmissão de forma segura e eficiente.

Os codificadores e decodificadores são localizados nos transmissores e receptores e são componentes necessários dentro do sistema OCDMA. A seleção de um sinal desejado é possível através da sequência de pulsos, ou da forma de onda temporal do sinal. O codificador é responsável pelo espalhamento do sinal ao longo de um espectro, utilizando uma região maior que a largura de banda mínima que se faz necessária para a transmissão. Este espalhamento é realizado por um código único que independe do sinal transmitido e o decodificador utiliza este mesmo código para comprimir o espectro do sinal, recuperando assim os dados. De uma maneira geral, para que seja possível manter uma boa SNIR a assinatura do código deve ser ortogonal ao comprimento do código e o número de pulsos *chips* deve ser suficientemente longo.

Podem ser utilizados diversos métodos para a codificação de dados, como por exemplo, a codificação de sequência direta, o salto no tempo (*hopping*) e salto em frequência (*frequency hopping*). Os bits de dados são codificados utilizando uma sequência de assinatura ( $M$ ), chamados de *chips*, e a taxa efetiva de bits aumenta em função de  $M$  devido a codificação. O sinal está espalhado por uma região muito maior quando relacionado a largura de banda de cada um destes *chips*.

A recuperação do sinal individual partilhado dentro da mesma largura de banda necessita que as sequências de assinaturas sejam provenientes de uma família de códigos ortogonais.

Uma das características das redes OCDMA é que as informações dos usuários são codificadas antes mesmo da transmissão no canal, e que cada um dos usuários representa sua própria assinatura, então a literatura vem tendo um grande esforço para o desenvolvimento de códigos cada vez mais robustos.

Em sistemas OCDMA, a principal fonte de ruído é a interferência de múltiplo acesso MAI e uma maneira de minimizar a ocorrência dele é o dimensionamento dos códigos ópticos de forma que eles reduzam a contribuição da MAI no sinal do receptor. Em

sistemas CDMA sem fio, são utilizados códigos bipolares que consistem em sequências de  $\{-1,+1\}$ . Valores positivos e negativos são representados pela amplitude e fase do campo eletromagnético que pode ser detectado diretamente. Entretanto, para os sistemas de comunicação óptica, é empregada a detecção de potência óptica na forma de fotodetecção direta. Desta forma, os sistemas ópticos são de detecção não-negativa e os sistemas OCDMA devem ser desenvolvidos com códigos unipolares, ou não-coerentes, que são sequências de  $\{1,0\}$ . Devido a sua alta complexidade, estas tecnologias ainda são estritamente de uso laboratorial [34].

O OCDMA pode ser dividido entre a) sistemas não coerentes unipolares baseados somente na modulação da intensidade de potência óptica [20] e b) sistemas bipolares coerentes, baseados na amplitude e modulação de fase [41]. Como esperado, o desempenho dos códigos coerentes é maior do que o desempenho dos códigos não coerentes uma vez que é analisada a SNIR [42]. Esse efeito ocorre porque o código bipolar é ortogonal e o unipolar é pseudo ortogonal. Entretanto, a principal desvantagem para o OCDMA está na dificuldade de implementação técnica concomitante com a utilização da mudança de fase do sinal óptico [20][19].

Nos estudos deste trabalho, foi adotado um código do tipo não coerente devido à sua maturidade tecnológica e facilidade de implementação quando este código é comparado com os códigos coerentes [43]. Os códigos não coerentes podem ser classificados entre unidimensionais (1-D) e bidimensionais (2-D). Nos códigos 1-D os bits são subdivididos no tempo em muitos chips curtos, com um padrão de chip designado, representando um código de usuário. Por outro lado, nos códigos 2-D os bits são subdivididos em chips individuais e cada chip é atribuído a um comprimento de onda independente de um conjunto discreto de comprimentos de onda.

Os códigos 2-D possuem desempenho melhor que os códigos 1-D e eles podem aumentar significativamente o número de usuários ativos [41]. Entretanto, os códigos 2-D vem sendo aplicados somente nas redes de acesso [36], desta forma, recentemente a utilização dos códigos 2-D nas redes ópticas foi proposta, e o desempenho foi avaliado por simulação, considerando-se a codificação, topologia, condição de carga e limitações físicas [36][21][19][14][8].

Os códigos 2-D podem ser representados por matrizes  $N_\lambda \times N_T$ , onde  $N_\lambda$  é o número de linhas, que é igual ao número de comprimentos de onda e  $N_T$  é o número de colunas, que é igual ao tamanho do código. O tamanho do código é determinado pelo período de bit  $T_B$  que é subdividido em pequenas unidades chamadas de chips, com duração de  $T_c =$

$T_B/N_T$ , conforme mostrado na Figura 8 (a). Em cada código existem pequenos pulsos  $w$  com diferentes comprimentos de onda, onde  $w$  é chamado de peso do código. Um código ( $N_\lambda \times N_T$ ,  $w$ ,  $\lambda_a$ ,  $\lambda_c$ ) é o resultado de uma matriz binária  $N_\lambda \times N_T$  e para cada código  $w$  os parâmetros  $\lambda_a$  e  $\lambda_c$  são integrais não negativas representando as restrições sobre a autocorrelação e a correlação cruzada dos códigos 2-D, respectivamente [3]. O design e a seleção dos códigos 2-D são muito importantes para o bom desempenho do sistema e para uma alta escalabilidade de rede com uma baixa taxa de erro de bit (BER). Em [3] é apresentada uma lista extensa de técnicas de construção de códigos, bem como a discussão técnica sobre estas características.

O codificador 2-D cria uma combinação de dois padrões: um padrão de comprimento de onda e um padrão de espalhamento no tempo. A tecnologia mais comum aplicada para os codificadores e decodificadores 2-D é a *Fiber Bragg Gratings* (FBG's), ou redes de Bragg em fibra, e são responsáveis pela alocação espectral e linhas de atraso óptico pela alocação temporal quando o algoritmo necessitar e é demonstrada na Figura 8 (b). As perdas associadas aos codificadores e decodificadores são dadas por  $C_{Bragg} (dB) = N_\lambda a_{Bragg} + a_{Circulator}$ , onde  $a_{Bragg}$  é a perda no FBG e  $a_{Circulator}$  é a perda no circulator. O valor usual de perdas para estes componentes é  $a_{Bragg} = 0.5dB$  e  $a_{Circulator} = 3 dB$ .

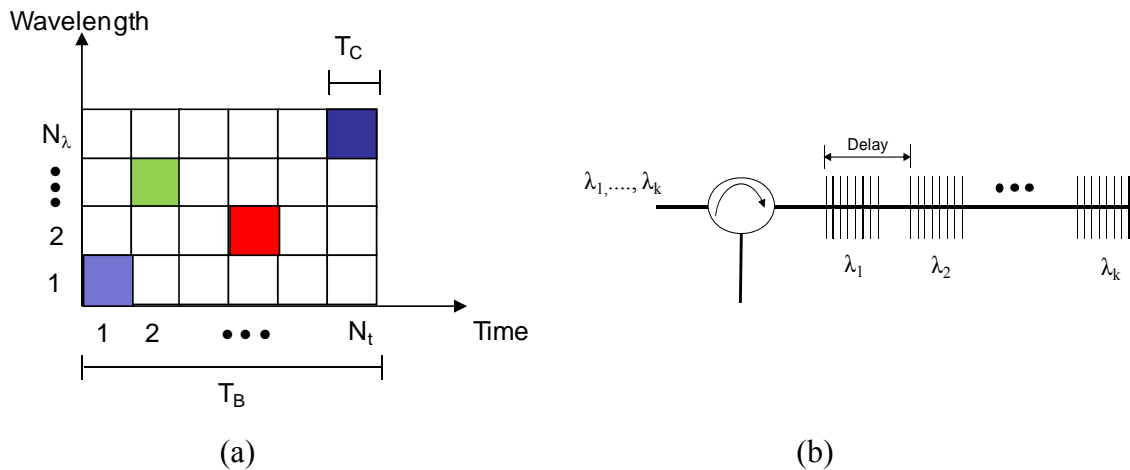


Figura 8 - (a) Representação dos códigos ópticos OCDMA. (b) Esquema de codificadores e decodificadores para códigos 2-D baseados em *fiber Bragg gratings* (FBG's)

### 3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A otimização da SNIR é baseada na definição da limitação da potência mínima (também chamada de nível de sensibilidade), assegurando que o sinal óptico será detectado por todos os dispositivos. Quando se limita a potência máxima, pode se garantir a

minimização dos defeitos físicos não lineares, porque isto faz com que a potência total de um enlace seja limitada a um valor específico máximo. O controle de potência em redes ópticas OCDMA aparece como um problema de otimização.

Chamando de  $\Gamma_i$  a relação entre portadora e ruído (CIR) requerida na entrada do decodificador para obter um valor máximo de BER tolerada pelo  $i$ -th nó óptico e definindo a dimensão da coluna  $K$  do vetor de potência óptica transmitida  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]^T$ , o problema do controle óptico de potência consiste em encontrar o vetor de potência óptica  $\mathbf{p}$  que minimiza a função custo  $J(\mathbf{p})$  que poderia ser formulada de acordo com [6][8]:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} J(\mathbf{p}) &= \min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} \mathbf{1}^T \mathbf{p} = \min_{p_i \in \mathbb{R}_+} \sum_{i=1}^K p_i, \\ \text{Sujeita a: } \Gamma_i &= \frac{(G_{ii} p_i G_{amp}) / \sigma_D}{G_{amp} \sum_{j=1, j \neq i}^K G_{ij} p_j + 2N_{sp}^{eq}} \geq \Gamma^* \\ P_{\min} &\leq p_i \leq P_{\max} \quad \forall i = 1, \dots, K, \\ P_{\min} &\geq 0, \quad P_{\max} > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $\mathbf{1}^T = [1, \dots, 1]$  e  $\Gamma^*$  é a CIR mínima para atingir o nível desejado de QoS;  $G_{ii}$  é a atenuação do OCP considerando a perda de sinal entre os nós de acordo com a topologia de rede, enquanto  $G_{ij}$  corresponde ao fator de atenuação pela interferência dos sinal no OCP na mesma rota,  $G_{amp}$  é o ganho total dos amplificadores do OCP,  $N_{sp}^{eq}$  é a potência de ruído espontâneo (ASE) para cada polarização considerando os amplificadores em cascata [44],  $p_i$  é a potência transmitida pelo  $i$ -OCP e  $p_j$  é a potência transmitida pela interferência do OCP;  $\sigma_D$  é a variância de potência devido à combinação dos efeitos da GVD e da PMD de primeira ordem para pulsos Gaussianos [45].

Utilizando notações matriciais, (2) pode ser escrita como  $[\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}] \mathbf{p} \geq \mathbf{u}$ , onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade,  $\mathbf{H}$  é a matriz interferência normalizada, cujos elementos avaliados são  $H_{ij} = G_{ij} / G_{ii}$  para  $i \neq j$  e zero para qualquer outro caso, assim  $u_i = \Gamma^* N_{sp}^{eq} / G_{ii}$ , onde há uma versão normalizada da potência de ruído.

Substituindo a desigualdade por uma igualdade, o vetor da potência otimizada pode ser obtido através da inversão da matriz  $\mathbf{p}^* = [\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{u}$ . A inversão da matriz é equivalente ao controle centralizado de potência, i.e., a existência de um nó central de controle de potência. O nó central fornece informações sobre toda a arquitetura da rede física,



por exemplo a distância da fibra entre os nós, posição dos amplificadores e atualização regular do tráfego para o estabelecimento dinâmico dos OCPs. Estas observações justificam a necessidade de algoritmos de otimização da SNIR *online*, que tem propriedades de convergência demonstradas para a configuração geral de redes [6][16][44].

A SNIR e a CIR são relacionadas pelo fator  $N_T/\sigma$ , i.e.,  $\gamma_i \approx (N_T/\sigma)^2 \Gamma_i$ . A probabilidade de erro de bit (BER) é dada por  $P_b(i) = \text{erfc}(\sqrt{\gamma_i}/2)/2$  quando a aproximação Gaussiana é adotada, e a relação sinal ruído (SNIR) em cada OCP, considerando códigos 2-D, é dada por [6][8],

$$\gamma_i = \frac{N_T^2 (G_{ii} P_i G_{amp}) / \sigma_D}{\sigma^2 G_{amp} \sum_{j=1, j \neq i}^K G_{ij} P_j + 2N_{sp}^{eq}} \quad (3)$$

onde a variação média da amplitude de Hamming da correlação cruzada aperiódica é representada por  $\sigma^2$ .

### 3.2 RESTRIÇÕES DA CAMADA FÍSICA

As limitações da camada física em redes ópticas são mecanismos de degradação que afetam significativamente o desempenho global dos sistemas de comunicação ópticos [6]. Para os dados que são transmitidos em uma rede de fibra óptica transparente, os efeitos desta degradação podem se acumular durante transmissões em grandes distâncias. As principais limitações físicas destas redes estão relacionadas ao grupo de velocidade de dispersão (GVD), a dispersão por polarização modal (PMD) e ao ruído de emissão espontânea (ASE) [46]. Por outro lado, as maiores limitações físicas não-lineares são a auto modulação de fase (SPM), a modulação de fase cruzada (XPM) e mistura de quatro ondas (FWM), espalhamento estimulado de Brillouin (SBS) e espalhamento Raman (SRS). As restrições físicas não lineares são estimuladas pelo alto nível de potência [46].

Entretanto, a restrição de potência máxima garante a minimização das limitações físicas não lineares, porque faz com que a potência total do enlace seja limitada a um valor máximo determinado [6]. No estágio atual da tecnologia, além da GVD, a maior restrição linear é a PMD que deve ser considerada em redes ópticas de alta capacidade. Diferentemente da GVD, a PMD é geralmente difícil de determinar e de compensar com precisão devido à sua natureza dinâmica e suas flutuações induzidas pelas tensões externas aplicadas na fibra após sua instalação [5][21][24].

Como resultado, a qualidade do sinal dentro de uma rede WDM/ OCDM pode ser rapidamente degradada pelas restrições da GVD, PMD e MAI. A limitação da PMD estabelece um limite superior para o comprimento do segmento óptico devido à dispersão da fibra, causada pela dispersão temporal dos pulsos ópticos. Por outro lado, devido aos avanços contínuos nos processos de fabricação da fibra, com redução contínua do parâmetro PMD o efeito prejudicial desta não será um problema para taxas de 10 Gbps ou menores, para as redes futuras de pequeno e médio porte [20][21].

Neste contexto, a limitação da SNIR dominante será dada por i) ASE com o acúmulo de ruído em cadeias de amplificadores ópticos para redes ópticas futuras [44] e ii) ASE, GVD e PMD para o estágio atual das redes ópticas.

Atualmente, o efeito da PMD parece ser a única grande limitação física que deve ser considerada em redes ópticas de alta velocidade que dificilmente poderá ser controlada devido a sua natureza dinâmica e estocástica [5][21][24].

Uma das alternativas que poderia ser empregada para diminuir os efeitos da PMD seria empregar códigos ópticos com pesos menores, mas isto afeta diretamente a MAI podendo aumentar a BER, então o estudo simultâneo da PMD e da MAI, considerando peso dos códigos dentro de um mesmo comprimento de onda consiste em um elemento essencial e determinante para o desempenho do enlace.

Por outro lado a GVD provoca a dispersão temporal dos pulsos ópticos que limita a taxa da transmissão e o comprimento do link [6][45]. O pulso para o espalhamento do sinal devido aos efeitos combinados da GVD e da PMD de primeira ordem para pulsos Gaussianos pode ser calculado como [44]:

$$\sigma_D = \left\{ \left( 1 + \frac{C_p \beta_2 d_{ij}}{2\tau_0^2} \right) + \left( \frac{\beta_2 d_{ij}}{2\tau_0^2} \right) + x - \left( \frac{1}{2(1+C_p^2)} \times \sqrt{1 + \frac{4}{3}(1+C_p^2)x - 1} \right) \right\}^{1/2} \quad (4)$$

onde  $C_p$  é o parâmetro de chirp,  $\tau_0 = \frac{T_c}{2\sqrt{2\ln 2}}$  é a largura do pulso RMS,  $T_c$  é o período de chip de meia altura,  $\beta_2 = -D \lambda_0^2 / 2\pi c$  é o fator GVD,  $D$  é o parâmetro de dispersão,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $x = \Delta\tau^2 / 4\tau_0^2$  e  $\Delta\tau = D_{PMD} \sqrt{d_{ij}}$ ,  $D_{PMD}$  é o parâmetro da PMD, e  $d_{ij}$  é o comprimento do link.

Embora exista uma diferença entre a GVD para cada comprimento de onda, é razoável considerar o mesmo valor de GVD para toda a janela de transmissão para um pequeno número de comprimentos de onda, como para o código apresentado em [42][43]. Por

outro lado, esta aproximação é utilizada para obter um tratamento analítico para a GVD e PMD dentro do mesmo formalismo ao invés de aplicar um formalismo baseado em métodos numéricos [6].

A ASE ( $N_{sp}^{eq}$ ) nos spans amplificadores em cascata é dada pelo modelo apresentado na Figura 9 [45].

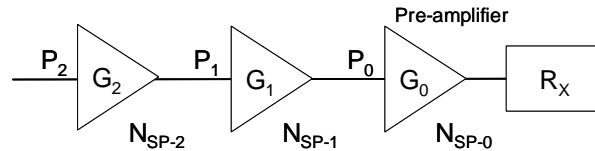


Figura 9 - Amplificadores em cascata

Este modelo considera que o receptor recebe o sinal de um link com amplificadores em cascata, numerados como 1, 2,..., a partir do receptor. O pré amplificador pode ser contemplado como o amplificador em cascata número 0. Seja  $G_i$  o ganho do amplificador  $i$ ,  $N_{sp-i}$  será o seu fator de emissão espontânea. O span entre o  $i$ -th e o  $(i - 1)$ -th amplificador tem a atenuação  $G_{ii}$ . Seja  $P_{ii}$  a potência na entrada do  $i$ -th amplificador, o fator de emissão espontânea equivalente é dado por [27][47]:

$$N_{sp}^{eq} = \frac{N_{sp-1}(G_1 - 1)G_{ii}G_0 + N_{sp-0}(G_0 - 1)}{G_1G_{ii}G_0 - 1} \quad (5)$$

Calculando recursivamente o fator  $N_{sp}^{eq}$  é possível encontrar o ruído nos amplificadores em cascata. O ruído para o  $i$ -th amplificador é dado por  $N_{sp-i} = 2n_{sp}hf(G_i - 1)B_0$ , que leva em conta o modo de dupla polarização apresentado em uma fibra monomodo [27]. Onde  $n_{sp}$  é o fator de emissão espontânea tipicamente em torno de 2 - 5,  $h$  é a constante de Planck,  $f$  é a frequência da portadora,  $G_i$  é o ganho do amplificador e  $B_0$  é a largura de banda óptica.

Idealmente, para reduzir a ASE a largura de banda óptica pode ser considerada como  $B_0 = 2R$  onde  $R$  é a taxa de transmissão de bit. Sem a perda de generalidade, todos os amplificadores ópticos empregados proporcionam um ganho uniforme, estabelecido em no máximo 20 dB para uma fibra de érbio dopada e amplificada (EDFA) em toda a janela de transmissão. Esse pressuposto é razoável para a redução do número de comprimentos de onda na janela de transmissão de um código (4 comprimentos de onda),

considerando o perfil de ganho do amplificador óptico em que a diferença máxima deste ganho é de 0,4 dB para o comprimento de onda mais distante do comprimento de onda central (1550 nm) considerando um espaçamento espectral de 100 GHz [6][17].

### 3.3 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO)

O Particle Swarm Optimization (PSO) ou otimização por enxame de partículas é um algoritmo de otimização estocástica, baseado na otimização de uma população global, que foi apresentado pela primeira vez em 1995 [45]. O PSO baseia-se no comportamento dos grupos sociais como cardumes de peixes, bando de pássaros, entre outros e difere de outros algoritmos evolucionários (EA).

Porém, como nos EA uma população de possíveis soluções é utilizada para localizar no espaço amostral a melhor solução para o problema analisado, sem um operador, inspirados por procedimentos de evolução que são aplicados sobre a população para gerar novas soluções [48]. O fato de ser explorado de forma recursiva, é que um melhor desempenho pode ser adquirido por meio de interações entre os indivíduos, ou mais especificamente pela imitação dos indivíduos bem sucedidos.

Em um sistema PSO as partículas voam no espaço de busca multidimensional e durante o voo, cada partícula ajusta sua posição de acordo com sua experiência e a experiência das partículas vizinhas fazendo uso da melhor posição encontrada por si mesma ou pela vizinhança. A direção de uma partícula no enxame é definida pela sua vizinhança e também pelo seu histórico de experiência.

Embora o PSO não dependa da sobrevivência da partícula mais apta, ele é muitas vezes classificado como um algoritmo evolutivo, porque as equações de atualização do sistema que controlam os movimentos individuais são semelhantes aos operadores evolutivos utilizados nos EAs. Em geral, a performance do PSO para o problema de alocação de recursos pode garantir a rápida e justa convergência com menos interações em relação aos algoritmos baseados em genética [16]. É bem conhecido na literatura que o desempenho do PSO para o problema de alocação de recursos é altamente dependente de seus parâmetros de controle, e que os ajustes dos parâmetros recomendados na literatura muitas vezes não levam a um comportamento de convergência confiável e rápido para o problema de otimização considerado [48][49][50].

No processo de otimização com PSO, cada partícula mantém o controle de suas coordenadas no espaço de interesse associado à melhor solução (*fitness*) que encontrou

até o momento. Outro melhor valor monitorado pela versão global do otimizador do enxame de partículas é o melhor valor global, e a sua localização é obtida até o momento por qualquer partícula na população. A cada iteração de tempo, o conceito de PSO consiste nas mudanças de velocidade e localização global de cada partícula. A aceleração é ponderada por um termo aleatório, com números aleatórios separados, sendo gerados para aceleração local e global.

Para o melhor entendimento da avaliação realizada por um algoritmo PSO, considere  $b_p$  e  $v_p$  denotando uma coordenada da partícula (posição) e uma velocidade de voo (velocidade) correspondentes em um espaço de busca respectivamente, considerando para esta estratégia, cada vetor potência candidato  $\mathbf{b}_p[t]$  com dimensão  $K \times 1$  que é utilizado para calcular o vetor velocidade para a próxima iteração [50]:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_p[t+1] = & \omega[t] \cdot \mathbf{v}_p[t] + C_1 \cdot \mathbf{U}_{p1}[t](\mathbf{b}_p^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]) + C_2 \\ & \cdot \mathbf{U}_{p2}[t](\mathbf{b}_g^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]) \end{aligned} \quad (6)$$

Onde  $\omega[t]$  é a inércia da velocidade anterior para o cálculo da velocidade atual, e o vetor de velocidade  $\mathbf{K}$  tem dimensão  $\mathbf{v}_p[t] = [v_{p1}^t \ v_{p2}^t \ \dots \ v_{pK}^t]^T$ ; as matrizes diagonais  $\mathbf{U}_{p1}[t]$  e  $\mathbf{U}_{p2}[t]$  com dimensão  $K$  tem seus elementos como variáveis aleatórias com distribuição uniforme  $\sim U \in [0, 1]$ , gerado pela  $p$ th partícula com a iteração  $t = 1, 2, \dots, \mathcal{G}$ ;  $\mathbf{b}_g^{best}[t]$  e  $\mathbf{b}_p^{best}[t]$  são o melhor vetor de posição geral e o melhor vetor de posição encontrado até o  $t$ th iteração, respectivamente;  $C_1$  e  $C_2$  são os coeficientes de aceleração em relação às melhores partículas e melhores posições globais influenciando na velocidade de atualização, respectivamente.

A  $p$ th posição da partícula e a  $t$ th iteração é definida através do vetor candidato de potência  $\mathbf{b}_p[t] = [b_{p1}^t \ b_{p2}^t \ \dots \ b_{pK}^t]^T$ . A posição de cada partícula é atualizada usando a nova velocidade do vetor desta partícula,

$$\mathbf{b}_p[t+1] = \mathbf{b}_p[t] + \mathbf{v}_p[t+1], \quad p = 1, \dots, \mathcal{P} \quad (7)$$

onde  $\mathcal{P}$  é o tamanho da população. A fim de reduzir a probabilidade de uma partícula deixar seu universo de pesquisa, o fator de velocidade máxima  $V_{max}$  é adicionado ao modelo PSO, e será responsável pela limitação da velocidade para o intervalo  $[\pm V_{max}]$ . Assim, o ajuste da velocidade que permite a uma partícula se mover em um subespaço contínuo, foi simplesmente feito por (8):

$$v_{pk}^t = \min\{V_{max}; \max\{-V_{max}; v_{pk}^t\}\}, \quad k = 1, \dots, K; \quad p = 1, \dots, \mathcal{P} \quad (8)$$

A partir de (8) está claro que se  $|v_{pk}^t|$  exceder um valor positivo constante  $V_{max}$ , especificado por um usuário, a velocidade da partícula  $p$ th do  $k$ th usuário registrado pode ser determinada como  $(v_{pk}^t)V_{max}$ , i.e., as velocidades das partículas em cada dimensão  $K$  é amarrada a uma magnitude máxima  $V_{max}$ . Além disso, se o espaço de busca puder ser definido pelos limites  $[P_{min}; P_{max}]$ , em seguida o valor  $V_{max}$  normalmente é definido para que  $V_{max} = \tau(P_{max} - P_{min})$ , onde  $0,1 \leq \tau \leq 1,0$ ; [48].

A fim de elaborar um pouco mais sobre o peso da inércia, podemos notar que um valor relativamente maior de  $\omega$  é útil para a otimização global e menos influenciado pelas melhores posições globais e locais, enquanto que um valor de  $\omega$  relativamente menor é útil para a convergência, i.e., ou seja, quanto menor for o peso inercial este incentiva a exploração local assim como as partículas são mais atraídas para  $\mathbf{b}_p^{best}$  e  $\mathbf{b}_g^{best}$  [45][48]. Assim, a fim de alcançar um equilíbrio entre as habilidades de busca locais e globais, um peso de inércia linear decrescente com a convergência foi adotado em conjunto com um algoritmo evolutivo que tem demonstrado boa capacidade de pesquisa global no início e boa capacidade de busca local nas últimas interações:

$$\omega[t] = (\omega_{initial} - \omega_{final}) \cdot \left(\frac{\mathcal{G} - t}{\mathcal{G}}\right)^m + \omega_{final} \quad (9)$$

onde  $\omega_{initial}$  e  $\omega_{final}$  são as inércias inicial e final, respectivamente,  $\omega_{initial} > \omega_{final}$  e  $\mathcal{G}$  é o número máximo de interações, e  $m \in [0,6; 1,4]$  são os índices não lineares [51].

### 3.4 ALOCAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS

A seguinte função custo pode ser empregada como uma alternativa para a atribuição dos recursos e otimização do OCP [50]. Esta função foi modificada para incorporar o efeito *near-far* (perto longe) [52][53]:

$$J_1(\mathbf{p}) = \max \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathcal{F}_k^{th} \left(1 - \frac{p_k}{P_{max}}\right) + \frac{\rho}{\sigma_{rp}} \quad (10)$$

$$\gamma_k \geq \gamma_k^*, 0 < p_k^l \leq P_{max}, R^l = R_{min}^l \forall k \in K_l, \quad e \forall l = 1, 2, \dots, L$$

onde  $L$  é o número de diferentes grupos de taxa de informações permitidos no sistema, e  $K_l$  é o número de usuários no  $l$ th com taxa mínima dada por  $R_{\min}^l$ . Importante dizer que a equação (10) nos dá crédito para soluções com pequenos desvios padrão (utilizando o fator de taxa inversa  $F^l$ ) para a potência distribuída recebida normalizada:

$$\sigma_{rp}^2 = \text{var} (F^1 p_1 G_{11}, F^1 p_2 G_{22}, \dots, F^l p_k G_{kk}, \dots, F^L p_k G_{kk}) \quad (11)$$

i.e. os valores mais próximos de potência normalizada são recebidos (uma pequena variação normalizada recebida do vetor de potência), a maior contribuição do termo  $\frac{\rho}{\sigma_{rp}}$ .

Para sistemas de taxa única,  $F^1 = \dots = F^l = \dots = F^L$ , vale a pena notar que desde a variância da normalizada recebida do vetor potência,  $\sigma_{rp}^2$  normalmente assume valores muito pequenos e o coeficiente  $\rho$  também passa a ter valores muito pequenos, a fim da relação  $\frac{\rho}{\sigma_{rp}}$  atingir uma ordem de magnitude semelhante a do primeiro termo em (10), que foi determinada como uma função do número de usuários,  $K$ . Assim, o termo  $\frac{\rho}{\sigma_{rp}}$  teria uma influência efetiva de minimizar o efeito *near-far* em sistemas OCDM/WDM, e ao mesmo tempo ter um valor diferente de zero, de todas as partículas do enxame [50].

Finalmente, a função de limiar (10) está definida como:

$$\mathcal{F}_k^{th} = \begin{cases} 1, & \gamma_k \geq \gamma^* \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

onde a SNIR do  $k$ th usuário,  $\gamma_k$ , é dada por (3). O termo  $1 - \frac{p_k}{P_{max}}$  dá crédito para todas estas soluções com o mínimo de energia, penalizando outros usuários que utilizam níveis mais altos de potência [48].

O algoritmo PSO consiste na aplicação repetida da atualização de velocidade e posição nas equações (7) e (8), respectivamente. O pseudo-código para o problema de alocação de potência para o PSO com um objetivo comum é apresentado no Algoritmo 1.

---

### Algoritmo 1 - Algoritmo PSO contínuo para o problema de alocação de potência

---

**Entradas:**  $\mathcal{P}, \mathcal{G}, \omega, C_1, C_2, V_{max}, R_{\min}$ ;      **Saída:**  $\mathbf{p}^*$

início

1. Inicializa a população em  $t = 0$ ;

$\mathbf{B}[0] \sim U[P_{min}; P_{max}]$

$\mathbf{b}_p^{best}[0] = \mathbf{b}_p[0]$  and  $\mathbf{b}_g^{best}[0] = \mathbf{p}_{max}$ ;

$\mathbf{v}_p[0] = 0$ : velocidade inicial nula;

2. enquanto  $t \leq \mathcal{G}$ 
  - a. calcular  $J(\mathbf{b}_p[t]), \forall \mathbf{b}_p[t] \in \mathbf{B}[t]$ , usando (14);
  - b. atualizar a velocidade  $\mathbf{v}_p[t], p = 1, \dots, \mathcal{P}$ , relacionada a (10);
  - c. atualizar as melhores posições:
    - para  $p = 1, \dots, \mathcal{P}$ 
      - se  $J(\mathbf{b}_p[t]) < J(\mathbf{b}_p^{best}[t]) \& R_p[t] \geq R_{\min}$ ,
      - $\mathbf{b}_p^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p[t]$
      - senão  $\mathbf{b}_p^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p^{best}[t]$
    - fim
    - se  $\exists \mathbf{b}_p[t] \mid [J(\mathbf{b}_p[t]) < J(\mathbf{b}_g^{best}[t])] \& R_p[t] \geq R_{\min} \& [J(\mathbf{b}_p[t]) \leq J(\mathbf{b}_{p'}[t]), \forall p' \neq p]$
    - $\mathbf{b}_g^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_p[t]$
    - senão  $\mathbf{b}_g^{best}[t+1] \leftarrow \mathbf{b}_g^{best}[t]$
  - d. Desenvolve para uma nova população de partículas  $\mathbf{B}[t+1]$ , utilizando (14);
  - e. Seleciona  $t = t + 1$ .
- fim
3.  $\mathbf{p}^* = \mathbf{b}_g^{best}[\mathcal{G}]$ .

Fim

---

$\mathcal{P}$ : tamanho da população.

$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_p, \dots, \mathbf{b}_p]$  matriz da população de partículas de dimensão  $K \times \mathcal{P}$ .

$\mathcal{G}$ : número máximo de iterações do enxame.

$\mathbf{p}_{\max}$ : vetor máximo de potência considerando a taxa de cada terminal móvel.

$R_{\min}$ : mínima taxa de dados comum a todos os usuários

---

A qualidade da solução atingida por qualquer processo de alocação de recursos em uma iteração pode ser medida pelo grau de proximidade que solução ótima foi encontrada e, pode ser quantificada através da média normalizada do erro quadrado (NMSE) quando o equilíbrio é atingido. Para o problema de alocação de potência, a definição da NSME é dada por:

$$NMSE[t] = \mathbb{E} \left[ \frac{\|\mathbf{p}[t] - \mathbf{p}^*\|^2}{\|\mathbf{p}^*\|^2} \right] \quad (13)$$

onde  $\|\cdot\|^2$  denota a distância euclidiana ao quadrado à origem, e  $\mathbb{E}[\cdot]$  a expectativa do operador.

### 3.5 OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Estudos recentes vem demonstrando a importância da consideração do consumo de energia nos projetos de comunicações ópticas levando-se em conta a infraestrutura de transmissão (transmissores, receptores, fibras e amplificadores) [54] e infraestrutura de rede (comutadores e roteadores) [55]. Pesquisas globais vêm demonstrando que o consumo de energia da infraestrutura de comutação é maior que o consumo de energia da infraestrutura de transporte [55]. Neste contexto é



necessário melhorar a eficiência energética da comutação e otimizar o desempenho da rede a fim de reduzir a quantidade de comutações e sobreposições. A energia necessária para a transmissão de 1 bit em cada OCP pode ser expressa como em [54]:

$$E_i = p_i T_{bit} \quad [J/bit] \quad i = 1, \dots, K \quad (14)$$

onde  $T_{bit} = 1/R$  é o tempo de transmissão de um bit por toda a rede, com  $R$  sendo a taxa de bit. Através das análises realizadas foi possível observar que para determinar a energia necessária para a transmissão, é necessário definir a potência transmitida individual de cada OCP ( $p_i$ ). A  $p_i$  é obtida pelo algoritmo de controle de potência PSO dado pelo Algoritmo 1 e pode ser associada a um específico valor de QoS, SNIR e máxima BER tolerada pelo  $i$ -th nó óptico. Em uma situação de controle de potência, cada nó óptico ajusta sua potência transmissora, em uma tentativa de maximizar o número de bits transmitidos com um consumo mínimo de energia.

Este conceito de eficiência energética é formulado em [55]:

$$\eta_i = \frac{R \cdot g(\gamma_i)}{p_i} \quad i = 1, \dots, K \quad (15)$$

onde  $g(\gamma_i) = 1 - BER$  é a função de energia, que representa o número correto de pacotes recebidos pela o  $i$ -th nó, dada a SNIR  $\gamma_i$ . Deste mesmo modo, este conceito é utilizado para uma métrica chamada *utilidade*, que é o número de bits recebido pela energia gasta ou uma relação de largura de banda e dissipação de potência [55].

Para cada  $i$ -th OCP, o número máximo de bits transmitidos ocorre no nível de potência para que a derivada parcial da função da eficiência energética em (15) com respeito à  $p_i$  seja zero,  $\partial \eta_i / \partial p_i = 0$ . Considerando a fórmula geral da SNIR para redes OCDMA, dada por [6],

$$\gamma_i = \frac{h_{ii} p_i}{I_i + N_i}, \quad i = 1, \dots, K \quad (16)$$

onde  $h_{ij}$  são as perdas totais no caminho que liga o  $i$ -th nó transmissor ao  $j$ -th nó receptor,  $I_i$  é a interferência dos demais nós emissores e  $N_i$  é o ruído do receptor. Podemos obter a derivada da eficiência energética referida à função eficiência (16),

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial p_i} = \frac{R}{p_i^2} \left( \gamma_i \frac{\partial g(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} - g(\gamma_i) \right), \quad i = 1, \dots, K \quad (17)$$

a partir de (17), nós observamos que para  $p_i > 0$ , a condição necessária para maximizar a eficiência energética é:

$$\gamma_i \frac{\partial g(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} - g(\gamma_i) = 0, i = 1, \dots, K \quad (18)$$

Para satisfazer (18) é necessário que o nó receptor atinja uma meta de SNIR, chamada  $\gamma_i^*$ . Neste contexto é proposto então a utilização do algoritmo PSO em ordem de estabelecer a menor energia necessária por bit de acordo com os requerimentos de QoS para as redes OCDM/WDM.

### 3.6 EFEITOS DA TEMPERATURA

Nas redes OCDMA baseadas em códigos 2-D além do alargamento do pulso transmitido e dos picos de potência, os efeitos de dispersão também incluem um deslocamento no tempo [62]. Quando associado a GVD e a PMD este deslocamento apresenta um comportamento de flutuação dinâmica induzida pela tensão que a fibra sofre após sua instalação, bem como pela alteração das condições do ambiente. Entretanto, os efeitos de dispersão podem ser compensados de forma efetiva no enlace.

A mudança das condições do ambiente, como por exemplo a variação da temperatura é difícil de determinar devido a suas flutuações e natureza dinâmica [63]. Este efeito ocorre porque as fibras podem ser expostas a variações de temperatura de  $\pm 20^\circ\text{C}$ , desde que os cabos ópticos estejam enterrados entre 60 cm a 1,20 m de profundidade no solo [63].

As alterações de temperatura da fibra afetam de maneira adversa os códigos 2-D graças a característica do coeficiente térmico da fibra através da redução da altura esperada do pico de autocorrelação [56]. Além disto, o sinal autocorrelacionado é distorcido devido a distorção temporal que é induzida pela temperatura. Esta indução afeta a altura, o deslocamento do código, a largura e a forma do sinal autocorrelacionado decodificado. Desta forma, este efeito depende da magnitude da mudança da temperatura ( $\Delta T$ ) que é dado por [23]:

$$\Delta t = D_{temp} \times \Delta T \times \Delta \lambda \times d_{ij} \quad (19)$$

onde  $D_{temp}$  (ps/nm.km/ $^\circ\text{C}$ ) é o coeficiente térmico da fibra,  $\Delta T$  ( $^\circ\text{C}$ ) é a variação média da temperatura sofrida pela fibra enterrada,  $\Delta \lambda$  (nm) é o espaçamento espectral entre os pulsos no comprimento de onda, e  $d_{ij}$  é o  $ij$ -th comprimento do link.

A largura do encolhimento de cada pulso ( $\Delta \tau$ ) para cada comprimento de onda é dado por [23]:

$$\Delta \tau = D_{temp} \times \Delta T \times \Delta \lambda \times d_{ij} \quad (20)$$

onde  $\Delta \lambda$  (nm) é a largura do pulso *spectral* da linha de cada um dos pulsos de comprimento de onda

dentro do código.

Os efeitos da variação da temperatura sobre o sinal de autocorrelação ( $S_t$ ) assumindo que cada pulso de comprimento de onda tem uma forma Gaussiana com uma potência de pico constante  $P_p$  são dados por [23]:

$$S_t = \sum_{k=0}^{\omega-1} P_p \exp \left\{ -2.77 \left[ \frac{t - k\Delta t}{\tau - \Delta\tau} \right]^2 \right\} \quad (21)$$

onde  $\tau$  é a largura de *chip* ( $t_c$ ). Nota-se que  $S_t$  é a somatória dos pulsos incoerentes dos comprimentos de onda ( $w$ ) do código óptico depois que o código foi propagado ao longo do link de comprimento  $d_{ij}$  sob os efeitos da variação de temperatura ambiente. Neste sentido, a altura do sinal de autocorrelação para os códigos 2-D para o caso ideal é  $w$  [62].

A penalidade na potência causada pela variação da temperatura ambiente ( $P_{\Delta T}$ ) é dada por:

$$P_{\Delta T} = 10 \log_{10} \left( \frac{S_t}{\omega} \right) \quad (22)$$

Os elementos  $G_{ij}$  que representam as conexões de transmissão e recepção considerando a variação linear e considerando as penalidades da potência causadas pela variação da temperatura ambiente são dados por:

$$G_{ij} = a_{star} \exp(-\alpha_f d_{ij}) L_c G_{amp} P_{\Delta T,i} \quad (23)$$

onde  $L_c$  é o somatório das perdas entre o codificador e o decodificador.

## 4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das simulações realizadas utilizando o software MatLab, e serão demonstrados os efeitos da temperatura na fibra enterrada, bem como a otimização obtida com relação ao consumo de energia por bit transmitido através da otimização dos parâmetros do PSO. Serão descritos os parâmetros que foram utilizados para a obtenção destes resultados. As definições utilizadas para a obtenção dos resultados foram determinadas com base em trabalhos anteriores, onde o objetivo da análise está na otimização dos parâmetros de entrada do PSO e coeficientes de aceleração do sistema.

Para todas as simulações realizadas no trabalho foram consideradas uma transmissão através de uma dispersão diferente de zero, através de uma fibra (NFD)-ITU G.655 com atenuação ( $\alpha$ ) de 0,2 dB/km, parâmetro não linear ( $\Gamma$ ) de  $2 \text{ (W.km)}^{-1}$ , dispersão zero do comprimento de onda ( $\lambda_0$ ) de 1550nm e inclinação de dispersão ( $S_0$ ) de  $0,07 \text{ ps}/(\text{nm}^2.\text{km})$ . O sinal é colocado em  $\lambda_0$  e o pico de potência é  $P$ . É possível notar que o comprimento não linear [25]  $L_{NL} = 1/(\Gamma P)$  é limitado para 500km e é muito maior que os comprimentos das fibras consideradas além da modulação de fase (SPM) para não afetar seriamente o desempenho do sistema. Além disso, a potência de limiar para a dispersão de Brillouin estimulada (SBS) é inferior a alguns mW e, como resultado, a SBS também não deve interferir nos resultados obtidos. Da mesma forma, para estas considerações, as deficiências físicas, tais como o espalhamento de Raman estimulado (SRS) não deve ser relevante [27].

Os valores típicos para o ruído de potência em todos os amplificadores ópticos foram assumidos em [11], então foi adotado  $n_{sp} = 2$ ,  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ (J/Hz)}$ ,  $G = 20 \text{ (dB)}$  e  $B_0 = 30 \text{ (GHz)}$ . Com isto, o ganho considerado no amplificador é de 20dB com um espaçamento mínimo de 60km,  $D_{PMD} = 0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , e  $D = 15 \text{ ps/nm/km}$ . As perdas para codificação/decodificação e roteamento na arquitetura de rede de 5dB e 20dB respectivamente foram incluídas no modelo de perda de potência [25][27].

Os parâmetros que foram definidos para o modelo são um código de peso 4 e um código de comprimento 101, cuja caracterização é dada por  $(4 \times 101, 4, 1, 0)$  e a meta de SNIR  $\gamma_i^* = 20\text{dB}$  foi adotada.

### 4.1 OTIMIZAÇÃO DE PARAMETROS

Nesta seção teremos a demonstração do problema estudado, onde serão realizadas as simulações em ambiente MatLab, utilizando para isso parâmetros pré definidos dentro do algoritmo PSO elaborado para a solução do problema de alocação de potência.

Para o problema de alocação de potência as experiências de simulação foram

realizadas a fim de determinar os valores adequados para os parâmetros de entrada do PSO tais como coeficiente de aceleração,  $C_1$  e  $C_2$ , fator de velocidade máxima,  $V_{max}$ , peso da inércia,  $\omega$ , e tamanho da população,  $\mathcal{P}$ , levando em conta o problema de otimização de potência.

A otimização contínua para o problema de alocação de recursos, foi investigada em [50] e [49], e indica que após um número suficiente de iterações  $\mathcal{G}$  para convergência, a maximização da função custo foi obtida dentro de valores para ambos os coeficientes de aceleração otimizando assim o fator  $V_{max}$ .

A diversidade aumenta a medida que a velocidade da partícula atravessa os limites estabelecidos pela  $[\pm V_{max}]$ . O intervalo de  $V_{max}$  determina a máxima mudança que uma partícula pode ter durante uma iteração e sem a influência do peso da inércia ( $\omega = 1$ ), e verificou-se que a velocidade máxima permitida  $V_{max}$  está situada em torno de 10 à 20% da gama dinâmica de cada dimensão de partícula [50]. A escolha adequada da  $V_{max}$  evita partículas no ar fora do espaço solução significativo.

Desta forma, o problema da alocação de potência no OCP assemelha-se ao problema resolvido em [50], e o melhor desempenho em relação a complexidade *trade-off* foi obtido definindo o fator de máxima velocidade como  $V_{max} = 0,2 (P_{max} - P_{min})$ . Para o peso de inércia  $\omega$ , as simulações tem confirmado que valores  $V_{max}$  muito altos implicam em uma convergência rápida, mas isso significa existe então uma falta de diversidade de busca e o algoritmo pode ser facilmente preso em alguns locais ótimos. Por outro lado, um valor pequeno para  $\omega$  resulta em uma convergência lenta devido às mudanças excessivas em torno de um pequeno espaço de busca.

Nas simulações realizadas foi adotada uma variável  $\omega$ , como a descrita em (14), mas com  $m = 1$ , e peso inicial e final para definição da inércia de  $\omega_{initial} = 1$  e  $\omega_{final} = 0,01$  desta forma, os valores iniciais e finais da alteração da velocidade máxima foram delimitados através do peso da inércia inicial e final linear, multiplicado por  $V_{max}$ , adotado como uma percentagem dos valores de diferença de potência máximas e mínimas [50],

$$\begin{aligned}\omega_{initial} \cdot V_{max} &= 0,2 (P_{max} - P_{min}) \\ \omega_{final} \cdot V_{max} &= 0,002 (P_{max} - P_{min})\end{aligned}\tag{24}$$

Finalmente, o critério de parada será o número máximo de iterações  $\mathcal{G}$  (alteração da velocidade permitida para cada partícula) combinada com o limite mínimo de erro:

$$\left| \frac{J[t] - J[t-1]}{J[t]} \right| < \epsilon_{stop}\tag{25}$$

onde tipicamente  $\epsilon_{stop} \in [0,001; 0,01]$ . De forma alternativa, o teste de convergência pode ser avaliado calculando-se o percentual da média de sucesso  $\mathcal{T}$  para alcançar o ótimo valor global levando-se em conta um número fixo de iterações  $\mathcal{G}$ . O teste de convergência é considerado com 100% de sucesso se a seguinte relação ocorrer:

$$|J|\mathcal{G}| - J|\mathbf{p}^*|| < \epsilon_1 J|\mathbf{p}^*| + \epsilon_2 \quad (26)$$

onde  $J|\mathbf{p}^*|$  é o ótimo valor global da função objetivo considerada,  $J|\mathcal{G}|$  é o ponto ótimo obtido para a função custo obtido através do algoritmo após  $\mathcal{G}$ , e  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  são os coeficientes de acerto usualmente dentro do intervalo de  $[10^{-6}; 10^{-2}]$ . Neste estudo, nós assumimos que  $\mathcal{T} = 100$  e  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 10^{-2}$ .

O parâmetro  $\rho$  na função custo (14) é indicado como o número de usuários OCPs ( $K$ ) e é dado por  $\rho = K \times 10^{-19}$ . Esta relação foi adaptada de [53] para o problema de alocação de potência através da busca não exaustiva [50]. O tamanho da população de partículas é dado por  $\mathcal{P} = K + 2$ .

No problema de alocação de recursos para redes de acesso, objeto de estudo deste trabalho, os parâmetros principais a serem definidos, coeficientes de aceleração  $C_1$  e  $C_2$  dependem do número de usuários que transmitem simultaneamente [16], [50].

Para um caso realista de uma rede roteada WDM/OCDM o número de usuários (OCPs) que transmitem simultaneamente é baixo, geralmente menor que 10, conforme [2], [5], [6], [46]. A convergência rápida sem perder a capacidade de prospecção e exploração poderia ser obtida com a otimização de parâmetros de aceleração em relação aos valores de referência adotados na literatura [16].

Trabalhos anteriores mostraram que a melhor convergência *versus* solução de qualidade foi alcançada com  $C_1 = 1$  e  $C_2 = 2$ , para um número de códigos menor que 10 [16][50]. Por outro lado, os valores clássicos adotados foram  $C_1 = C_2 = 2$  [48][56]. Neste contexto, os experimentos e simulações foram realizados de maneira a determinar a melhor escolha para os coeficientes de aceleração  $C_1$  e  $C_2$  em torno do problema de otimização da alocação de potência.

A Figura 10 ilustra as diferentes soluções de qualidade em termos de NMSE, erro médio quadrado normalizado, quando diferentes valores de  $C_1$  combinados com  $C_2 = 2$  em um sistema com um número de OCPs igual a 7, considerando um único *span*. Simulações prévias demonstraram uma convergência não muito ruim para um valor diferente de  $C_2$  [50]. As distâncias dos OCPs foram distribuídas uniformemente entre 2 e 100 km. Os valores da NMSE são dados através da média das iterações sobre  $\mathcal{T} = 100$  tentativas. Entretanto, a NMSE converge com valores após  $\mathcal{G} = 800$  iterações.

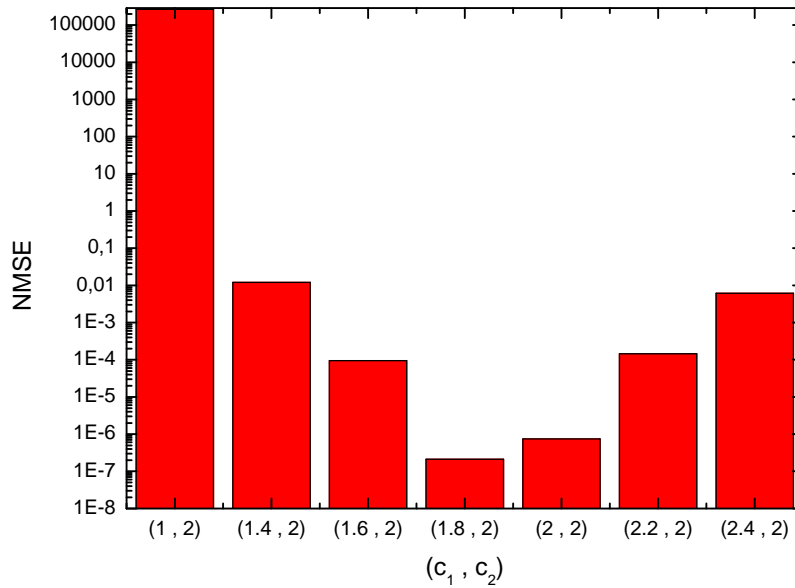


Figura 10 – Erro médio quadrado normalizado (NMSE) para diferentes valores de  $C_1$  combinando com  $C_2 = 2$  em um sistema com número de OCPs igual a 7, considerando 1 span.

Resultados numéricos demonstraram que uma solução de qualidade para diferentes valores do coeficiente de aceleração  $C_1$  foram encontrados quando o mesmo obteve o valor igual a 1,8 como menor valor apresentado para o NMSE para um número de OCPs  $< 10$ . Desta forma, a melhor solução a níveis de qualidade é atingida quando  $C_1 = 1,8$  e  $C_2 = 2$ .

A Figura 11 demonstra a somatória da evolução da potência enquanto  $t=1$  a 800 iterações para 7 OCPs, considerando valores diferentes de  $C_1$  e  $C_2 = 2$  para 1 span.

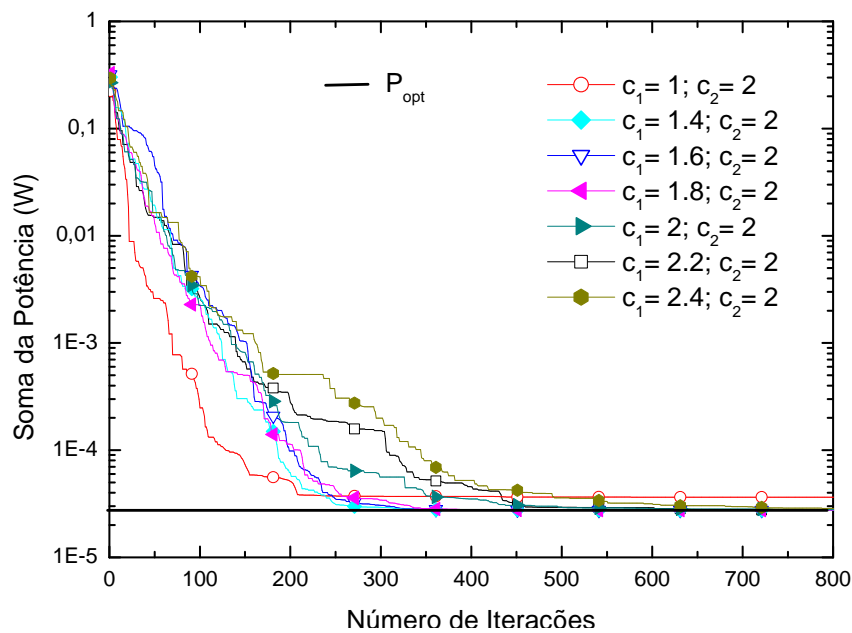


Figura 11 – Somatório da evolução do vetor potência durante 800 iterações para 7 OCPs sob diferentes coeficientes de aceleração de  $C_1$  e  $C_2 = 2$  para 1 span.

O algoritmo atinge a convergência para  $C_1 = 1,4, 1,6, 1,8, 2, 2,2$  e  $2,4$ , entretanto isto não acontece quando  $C_1 = 1$ . As simulações revelaram que o aumento do parâmetro  $C_1$  resulta em uma convergência lenta com aproximadamente 320, 343, 373, 639, 659 e 713, iterações respectivamente. Porém, para uma rápida convergência, a NMSE é maior do que para uma convergência lenta para o valor de  $C_1 = 1,8$ , conforme indicado na figura 10. Neste contexto, a melhor convergência *versus* a solução de qualidade é atingida com  $C_1 = 1,8$  e  $C_2 = 2$  para um número de OCPs igual a 7.

Vale a pena expandir esta análise para outros números de OCPs que são geralmente entre 4 e 8 OCPs. Para este propósito, a figura 12 foi obtida demonstrando a NMSE para um número de OCPs levando em conta duas combinações de coeficientes de aceleração: i) otimização para ( $C_1 = 1,8$  and  $C_2 = 2,0$ ) e otimização apresentada na literatura ( $C_1 = 2,0$  e  $C_2 = 2,0$ ).

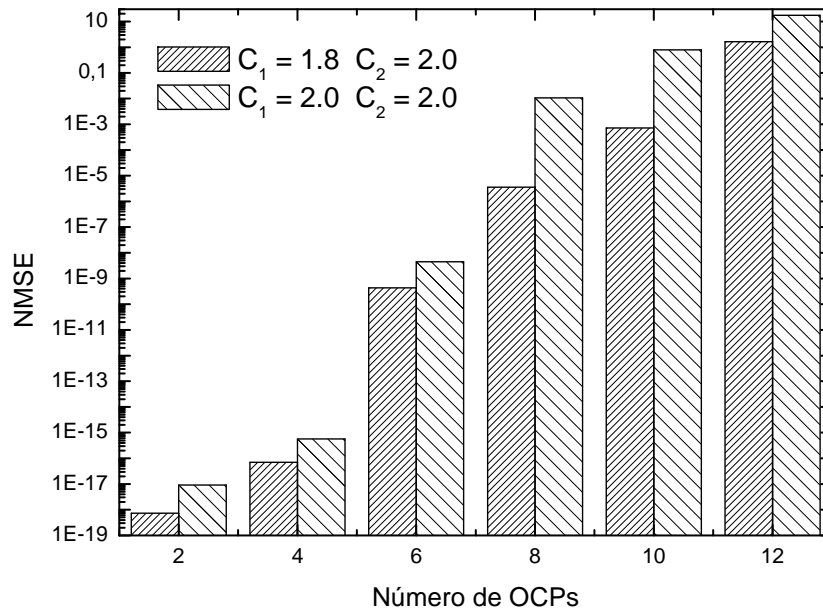


Figura 12 – NMSE para um número de OCPs para ( $C_1 = 1,8$  e  $C_2 = 2,0$ ) e ( $C_1 = 2,0$  e  $C_2 = 2,0$ ), considerando 1 span.

O aumento dos OCPs afeta a solução de qualidade, e este efeito está diretamente relacionado a MAI que aparece quando este número cresce, indicando que a MAI é altamente influenciada pelo número de OCPs ativos. Um erro ocorre quando o pulso da correlação cruzada ( $K - 1$ ) interfere no caminho óptico até um nível mais elevado que o pico da autocorrelação, alterando um bit de zero para um.

Como conclusão, para os resultados numéricos para a minimização do problema de alocação de potência é revelado que para um sistema de baixa carga, os valores dos coeficientes de aceleração  $C_1 = 1,8$  e  $C_2 = 2,0$  são os melhores em termos de solução *trade-off*. Este resultado foi comparado com  $C_1 = 2,0$  and  $C_2 = 2,0$  apresentados previamente na literatura [48][56].



## 4.2 ALOCAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS

A otimização das redes WDM/OCDM apresentada anteriormente se mostrou eficiente para estudos com números de spans menor que 10. Nesta seção, será demonstrado que a análise da solução qualidade *versus* a convergência *trade-off* apresentada nas figuras 10, 11 e 12 para os coeficientes de aceleração da PSO para a otimização das redes ópticas WDM/OCDM com 1 span pode ser estendida considerando mais spans na análise.

O estado da arte para o número de spans sem considerar a regeneração eletrônica do sinal transmitido é em torno de 4 spans, considerando a ASE como fator limitante aplicado em fibras com baixa PMD para uma taxa de bit de 10 Gbps (menor que 40 Gbps) [47]. Na figura 13 a análise da subseção 4.1 é estendida para 8 spans, demonstrando a influência do número de spans para uma NMSE para 7 OCPs e utilizando os mesmos parâmetros de otimização desta subseção.

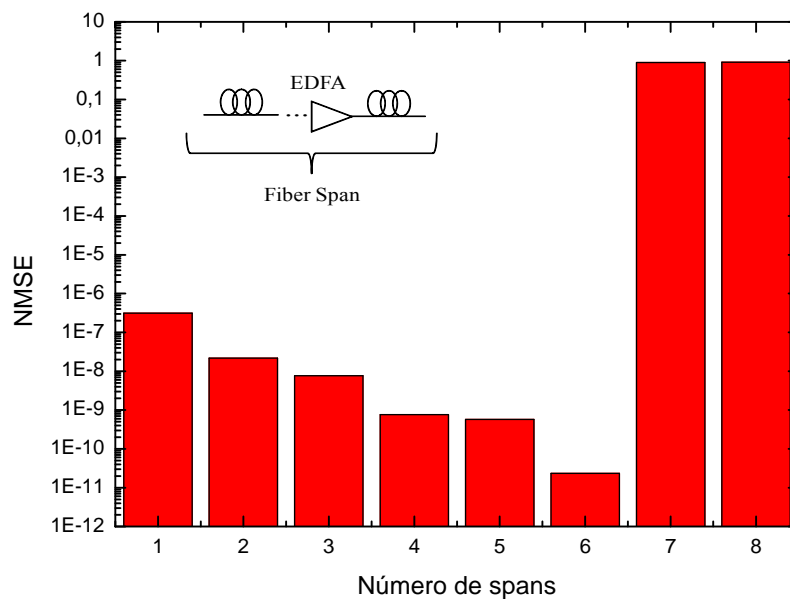


Figura 13 – NMSE para o número de spans para 7 OCPs.

O resultado nos mostra que a NMSE decresce quando o número de spans aumenta até 6 spans, depois disso, a NMSE demonstra uma tendência de crescimento. Este comportamento mostra uma limitação da convergência do PSO quando a ASE aumenta. Após 6 spans o algoritmo PSO não atinge a convergência total.

Isso ocorre diretamente devido as limitações geradas pelo aumento da ASE. De outra maneira, a potência transmitida necessita atingir uma SNIR alvo que será a máxima potência transmitida permitida. O número médio de spans aumenta ligeiramente a medida que  $K$  aumenta, assim como as rotas mais longas vão se tornando disponíveis. Este aumento no entanto não é muito significativo e os comprimentos dos caminhos são em média 4 spans.

A convergência do algoritmo PSO com qualidade apresenta variação com o aumento do número de spans. A figura de mérito utilizada como ferramenta de análise é a taxa de convergência (RC), que pode ser descrita como a relação da solução PSO após a  $t$ -th dividida pela solução PSO após a convergência total, e o contexto da otimização é dado pela solução da matriz inversa discutida em 3.1. Recalculando a equação (19), a RC pode ser expressa em termos de  $\epsilon_{stop}$  como:

$$RC[t] = 1 - \frac{|J[t] - J[\mathbf{p}^*]|}{J[\mathbf{p}^*]} \quad (27)$$

As figuras 14 (a) e (b) mostram a taxa de convergência para a somatória da evolução do vetor de potência considerando 800 iterações para 4 a 8 OCPs respectivamente e considerando de 1 a 6 spans. Os resultados demonstram que o aumento do número de spans aumenta a contribuição do amplificador de sinal, entretanto, para mais de 6 spans a contribuição do amplificador é para o ruído ASE. Por outro lado, o aumento do número de OCPs resulta numa convergência lenta, resultado da MAI entre os OCPs.

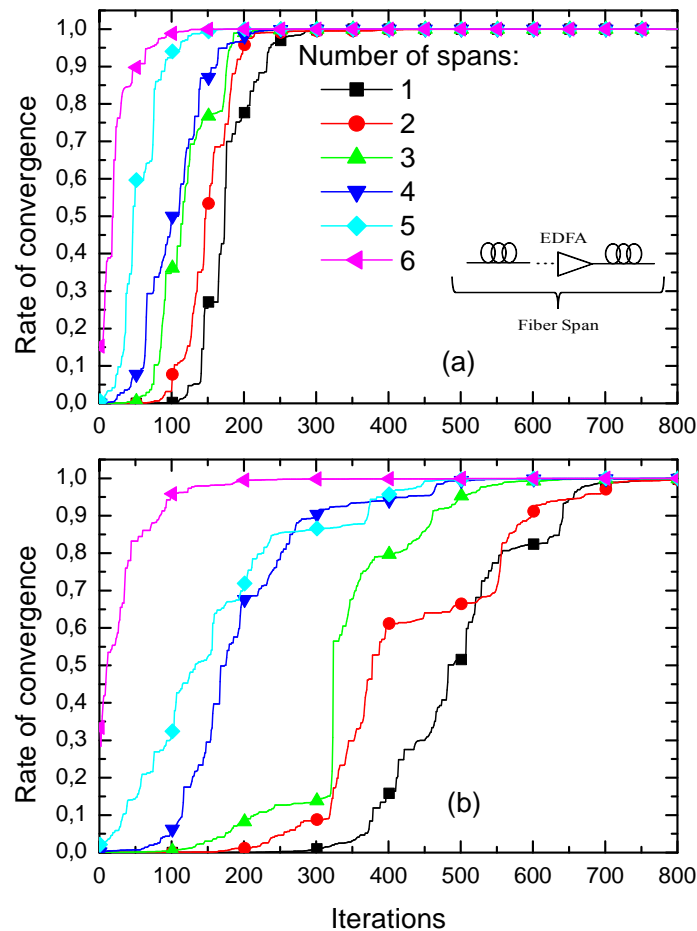


Figura 14 – Taxa de convergência *versus* o número de iterações para 1 até 6 spans para (a) 4 OCPs e (b) 8 OCPs (respectivamente).

Os resultados numéricos para o problema de alocação de potência considerando um número diferente de spans revela a viabilidade do algoritmo PSO para a solução do problema considerando até 6 spans, de forma a garantir uma solução de qualidade em termos de NMSE.

Além do exposto acima, os resultados numéricos revelaram que o aumento do número de spans resulta em uma convergência mais rápida, e neste contexto o algoritmo PSO é adequado para resolver o problema de alocação de potência nos OCPs que apresentam uma média de 4 spans conforme demonstrado na literatura [24].

Para avaliar o impacto das restrições físicas nas redes WDM/OCDM, resultados numéricos são apresentados na figura 15, que mostram a soma da evolução da potência no algoritmo PSO em relação ao número de iterações considerando a) 4 OCPs e b) 8 OCPs. Um span é considerado como referência para uma taxa de bit de 10 Gbps levando em conta duas situações: i) somente com o efeito da ASE e ii) considerando ASE, GVD e PMD.

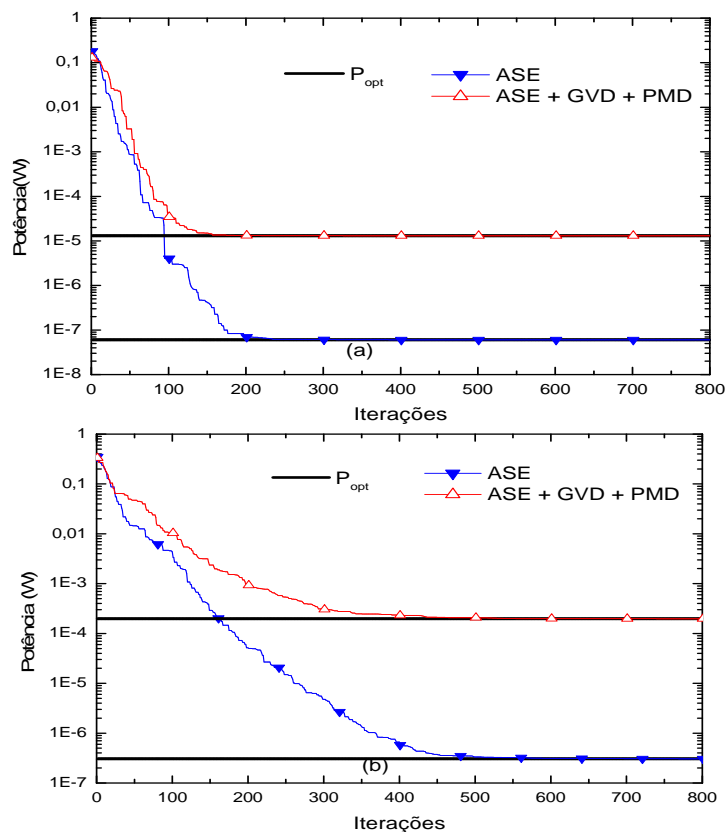


Figura 15 – Somatória da evolução da potência PSO para a) 4 OCPs; b) 8 OCPs, considerando 1 span como referência com  $R = 10$  Gbps. Duas situações avaliadas: i) efeito da ASE; ii) ASE, GVD e PMD.

A SNIR target estabelecida para todos os nós é igual, e se assumirmos uma potência balanceada com um meio físico perfeito (sem restrições físicas), pode ser demonstrado que a SNIR máxima e a potência transmitida são definidas pelo número de OCPs no mesmo caminho. Entretanto, quando consideramos os efeitos da ASE, GVD e a PMD, temos uma penalização desta

transmissão.

Esta penalidade representa a redução da potência durante um espalhamento temporal. A Figura 15 nos mostra que quando consideramos os efeitos da ASE, GVD e PMD temos uma penalização da potência quando comparamos somente com os efeitos da ASE (fibras sem PMD).

Comparando as figuras 15 (a) e (b), é possível verificar que a velocidade de convergência depende do número de OCPs. O aumento do número de OCPs de 4 para 8 afeta a velocidade de convergência de  $\approx 200$  a  $\approx 500$  iterações respectivamente. Este efeito é diretamente relacionado ao aumento da MAI que cresce conforme aumentamos o número de OCPs.

O efeito da MAI é diretamente influenciado pelo aumento do número de OCPs ativos, conforme exposto anteriormente, e um erro acontece quando o pulso de correlação cruzada partindo de  $(K - 1)$  interferindo no OCP, constituído de um nível mais elevado que o pico de autocorrelação, alterando um bit de zero para um.

A PMD degrada a performance quando o comprimento do link e a taxa de bits aumenta. Este efeito ocorre porque a PMD estabelece um limite superior sobre a duração da transmissão o que provoca a dispersão temporal dos pulsos.

O limite para a conexão depende da distância do link e do produto da distância da taxa de chip ( $d.R.N_T$ ), onde  $d$  é o comprimento do link,  $R$  é a taxa de bit e  $N_T$  é o tamanho do código. A análise dos parâmetros de código e os efeitos da PMD e da MAI para os códigos 2-D baseados nos OCPs foram previamente demonstrados em [20].

Nas redes WMD/OCDM os OCPs com diversos níveis de QoS são obtidos com a transmissão de diferentes níveis de potência. Potências distintas são obtidas com transmissores ajustáveis e isso não causa a alteração da taxa de bit. A intensidade do sinal óptico transmitido é ajustada diretamente a partir da fonte laser transmissora com relação a SNIR alvo dada pelo algoritmo PSO.

A tabela I mostra os aspectos de otimização do QoS com relação a diferentes níveis de SNIR considerando a soma da potência da NMSE para 4 e 8 OCPs com 1 span.

Tabela I – Otimização dos aspectos de QoS

SNIR (dB)	4 OCPs			8 OCPs	
	BER	Potência (W)	NMSE	Potência (W)	NMSE
17	$7,2 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-18}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-8}$
20	$7,6 \times 10^{-24}$	$6,0 \times 10^{-8}$	$6,2 \times 10^{-16}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-3}$
22	$1,2 \times 10^{-36}$	$9,5 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-16}$	$4,3 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-1}$

Os resultados apresentados na tabela I mostram os valores necessários de potência transmitida como a solução de qualidade em termos de NMSE. Este aumento considerando a SNIR alvo resulta no aumento da potência transmitida que é maior para mais OCPs. Por outro lado, a solução de qualidade (NMSE) diminui com o aumento da SNIR alvo desde que o número de iterações PSO seja fixo.

Conforme apresentado na tabela I, a aplicação do PSO se mostrou eficaz para a alocação de potência, pois os usuários com maior potência são penalizados durante a transmissão, sendo descartados da solução.

### 4.3 OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Um algoritmo eficiente para o problema de alocação de recursos é necessário para solucionar o problema de eficiência energética para melhorar a performance e a QoS nas redes ópticas. Isto pode ser atingido através da otimização da SNIR utilizando a otimização baseada em PSO.

A figura 16 nos mostra a soma da energia por bit em função da taxa de convergência da eq. (21) para a otimização PSO com diferentes requisitos de QoS representados pela SNIR alvo de 17, 20 e 22 dB, considerando a) 4 OCPs e b) 8 OCPs, i.e., para o mesmo cenário apresentado anteriormente. É possível verificar que a taxa de convergência envolvendo a energia por bit através da solução oferecida pelo algoritmo PSO converge para o melhor valor conforme previsto em (17).

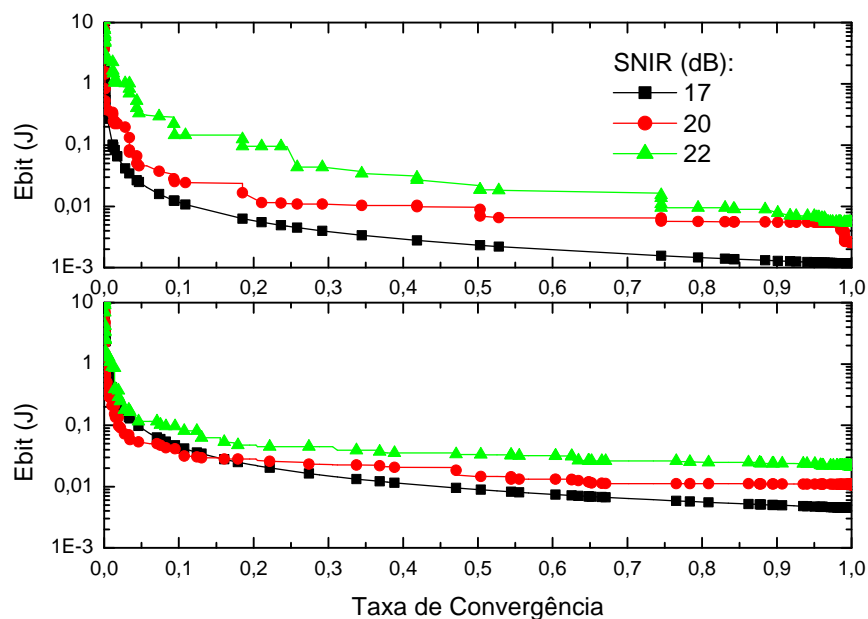


Figura 16 – Soma da energia por bit por OCPs em função da taxa de convergência utilizando

o algoritmo PSO. Três diferente SNIR alvo, 17, 20 e 22 dB; a) 4 OCPs e b) 8 OCPs.

Como pode ser visto na figura 16, o impacto da otimização da alocação de potência com PSO (em termos de energia transmitida por bit) ocasiona um aumento da eficiência energética. A utilização do PSO com 100% de taxa de convergência resulta em uma enorme economia de energia. Entretanto, com um número muito baixo de iterações, a taxa de convergência (RC) é ruim ( $RC < 0,03$ ) e a energia por bit transmitido é alta, pois a MAI é fortemente influenciada pelo efeito *near-far*.

Conforme esperado, o aumento de OCPs ativos de 4 para 8 resulta num aumento da energia por bit transmitido para atingir a SNIR alvo. Além disso, é possível analisar que a variação da economia de energia levando em conta a taxa de convergência dentro do intervalo  $RC \in [0,5; 1,0]$  diminui em aproximadamente 40 à 60% para cada SNIR alvo diferente e número de OCPs conforme apresentado na figura 16.

Neste contexto, com o objetivo de analisar o efeito do número de spans dentro da energia por bit transmitido para 4 a 8 OCPs, a tabela II apresenta o somatório da energia por bit considerando a SNIR alvo de 20 dB e a taxa de convergência de 0,5 à 1,0 para 2 e 4 spans.

Tabela II – Somatória da energia por bit em [pJ] para uma SNIR alvo de 20 dB.

Número de spans	4 OCPs		8 OCPs	
	$\Sigma$ Energia (pJ)	$\Sigma$ Energia (pJ)	$\Sigma$ Energia (pJ)	$\Sigma$ Energia (pJ)
	RC=0,5	RC=1,0	RC=0,5	RC=1,0
2	0,0135	0,0120	0,3145	0,1100
4	1,0545	1,0108	2,2295	1,8199

O resultado mostra o impacto do número de spans para a energia por bit transmitido para uma variação da taxa de convergência de 0,5 a 1. Conforme esperado, o aumento do número de spans e do número de OCPs resulta num aumento da energia por bit transmitido. Entretanto, a soma da variação da energia por bit levando em conta a RC de 0,5 a 1, diminui quando o número de spans aumenta de 2 para 4. Este resultado está em concordância com o resultado previamente ilustrado na figura 8 e significa que o aumento do número de spans acelera a taxa de convergência RC (*Rate of Convergence*).

#### 4.4 EFEITOS DA TEMPERATURA

A Tabela III mostra os principais parâmetros que foram utilizados para as simulações. Parâmetros típicos de dispositivos, componentes e equipamentos foram assumidos para os códigos 2-D considerando-se peso de código de 4 e 8, e um comprimento de código de 200. Desta forma, o código é caracterizado por  $(8 \times 200, w, 1, 0)$  para uma taxa de transmissão de 2,5 Gbps. O codificador / decodificador AWG tem uma perda uniforme de aproximadamente 6dB, independente do número de comprimentos de onda ( $N_\lambda$ ) [64].

Tabela III - Parâmetros do sistema

Variável	Valor
$\alpha_f$ – Coeficiente de perdas	0,2 (dB/km)
$d_{ij}$ – comprimento do link	[4: 50] km
$h$ – constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ (J/Hz)
$f$ – frequência da luz	193,1 (THz)
$B_o$ – largura de banda óptica	30 (GHz)
$n_{sp}$ – ruído de emissão espontânea	2
$\delta$ – excesso de perdas	0,2 (dB)
$G_{amp}$ – ganho EDFA	20 (dB)
2-D códigos OCDM	$(8 \times 200, w, 1, 0)$
$w$ – peso do código	4 and 8
$T_C$ – período de chip	2 (ps)
$D_{temp}$ – coeficiente térmico	0,0025 (ps/nm·km/°C)
$\Delta T$ – variação de temperatura	[0: 20] (°C)
$\Delta\lambda$ – espaçamento espectral	0,4 and 0,8 (nm)
$\Delta\lambda$ – pulso spectral em linha	1,4 (nm)
$\gamma^*$ – SNIR alvo	20 dB
$K$ – número de nós	12

Inicialmente, é apresentada na figura 17 a penalidade sofrida pela potência que é causada pela variação da temperatura ambiente. O espaçamento espectral de 0,4nm e 0,8nm, e uma distância de 25 e 50 km são considerados para os códigos de peso 8 (a) e 4 (b).

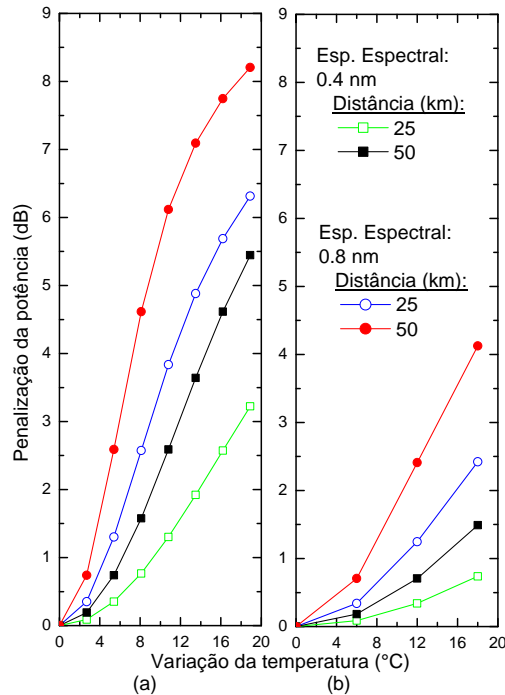


Figura 17 - Penalidade da potência para a flutuação da temperatura considerando o espaçamento espectral de 0,4nm e 0,8nm, e distância de 25 e 50km para códigos de peso 8 (a) e 4 (b).

A partir da figura 17 (a) e (b) pode-se observar o aumento da penalidade de potência com o aumento da variação da temperatura. A perda da potência foi mais acentuada quando aumentado o tamanho do código e a distância. Além disso, a perda da potência aumenta quando cresce o espaçamento espectral.

O aumento do peso do código e do espaçamento espectral resulta em um aumento temporal do deslocamento [65], e este efeito ocorre porque o aumento do peso do código e do espaçamento espectral aumenta o atraso entre o chip de pulso óptico resultante em uma pequena autocorrelação no receptor. Entretanto, a penalidade da potência é diretamente relacionada com o deslocamento temporal.

Os resultados demonstrados na figura 16 estão em concordância com os resultados prévios da autocorrelação descrita em [23, 24].

Ao final das simulações, o cenário da rede óptica considerada é apresentado na figura 17 considerando 12 nós. Na figura 18 (a) e (b) são apresentados os comprimentos do link a partir dos nós transmissores até o acoplador estrela e o comprimento do link do acoplador estrela até os nós receptores respectivamente. Os nós foram distribuídos de maneira uniforme sobre uma área com raio entre 2 e 25 km, entretanto o comprimento total do link é [4; 50] km.

Esta topologia, cujo número de nós, parâmetros de código e distância dos



nós são compatíveis com a rede OCDMA previamente descrita, considerando a variação da temperatura ambiente [23][27]. Esta configuração de rede pode ser adaptada para padrões normais, como 10GE-PON ou aumentando o número de nós [64].

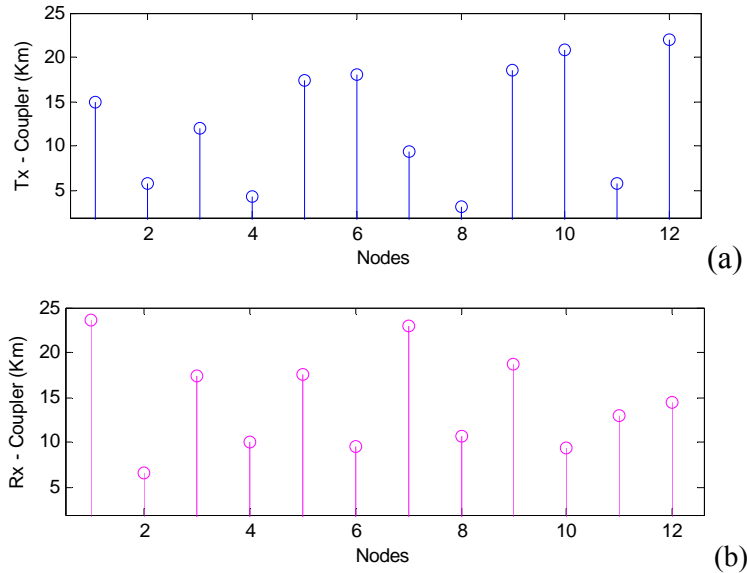


Figura 18 - (a) e (b) – Distâncias dos nós da rede (a) transmissores para o acoplador estrela e (b) do acoplador para os receptores.

A figura 19 ilustra a variação uniforme da temperatura distribuída entre 15 e 20°C para os links entre Tx-acoplador e Rx-acoplador.

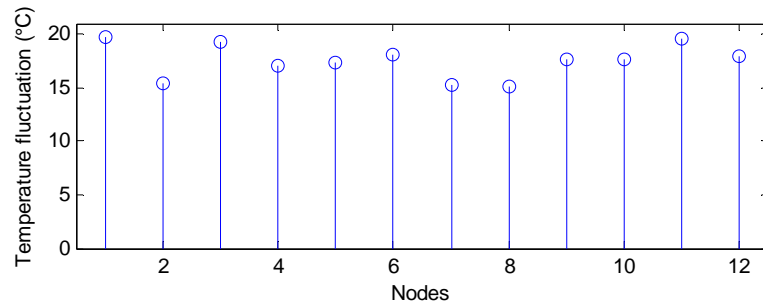


Figura 19 - Variação da temperatura dentro da rede óptica.

Na tabela IV são demonstrados os parâmetros do PSO utilizados nas simulações. Estes parâmetros de otimização foram discutidos de forma extensiva em [66].

Tabela IV - Parâmetros PSO

Variável	Valores
$\mathcal{P}$ – Número de partículas	$\mathcal{P} = K + 2$
$C_1$ – Aceleração da partícula	1,8
$C_2$ – Aceleração Global	2
$p_{max}$ – Potência máxima	20 dBm
$p_{min}$ – potência mínima	$p_{max} \times 10^{-12}$
$\omega$ - Peso da inércia	$\omega[t] = (\omega_i - \omega_f) \left( \frac{\varphi - t}{\varphi} \right)^m + \omega_f$
$m$ – Índice não-linear	[0,6; 1,4]
$\varphi$ – Número de interações	1000
$\omega_i$ – Peso da inércia inicial	1
$\omega_f$ – Peso da inércia final	0,4
$V_{max}$ – Velocidade máxima	$V_{max} = 0,2(p_{max} - p_{min})$
$V_{min}$ – Velocidade mínima	$V_{max} = -V_{min}$

A fim de avaliar a atenuação dos efeitos da variação da temperatura ambiente, os resultados numéricos apresentados na figura 20 mostram a soma da evolução da potência transmitida por todos os nós no que diz respeito ao número de iterações considerando o espaçamento espectral de 0.4nm e 0.8nm.

Códigos de peso 8 e 4 foram considerados na figura 20 (a) e (b) respectivamente. Para avaliar a convergência do algoritmo de controle de potência, o resultado da matriz inversa foi plotado na pontilhada na horizontal.

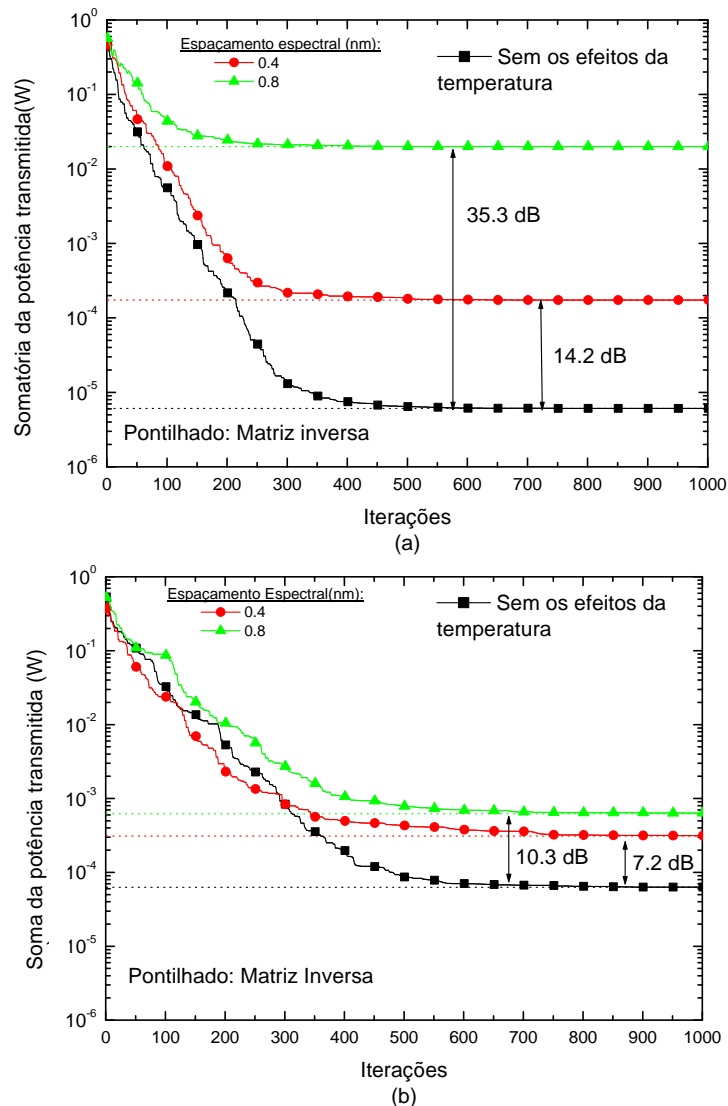


Figura 20 - Somatória da potência transmitida para um número de interações considerando o espaçamento espectral de 0.4 e 0.8nm para o código de peso 8 (a) e 4 (b).

A partir da figura 20 (a) e (b) é possível observarmos a convergência dos valores da potência transmitida a partir do algoritmo de controle de potência para o valor obtido através da matriz inversa.

O algoritmo de controle de potência considerado para este trabalho pode ser calculado sem a necessidade da inversão de matrizes, cuja complexidade computacional é mais intensa. A SNIR alvo foi estabelecida em 20dB para todos os nós, e se assumirmos a potência balanceada com os efeitos da variação da temperatura ambiente, podemos demonstrar que a SNIR máxima e a potência transmitida podem ser definidas a partir do número de nós ópticos da rede.

Entretanto, quando consideramos a variação da temperatura ambiente, existe uma penalidade que representa a redução da potência durante o deslocamento temporal. A figura 20 (a) mostra o aumento da potência transmitida para atenuar os efeitos da variação da temperatura para um

código igual a 8. O incremento é de 35,3 e 14,2dB na potência transmitida para um espaçamento espectral de 0.4 e 0.8nm respectivamente.

Da mesma forma, a figura 20 (b) mostra o aumento na potência total transmitida para atenuar os efeitos da temperatura ambiente para um código de peso igual a 4. Para este caso, o aumento da potência é de 10,3 e 7,2 dB para um espaçamento espectral de 0,4 e 0,8 nm respectivamente, que são as janelas cujas quais as fibras possuem a menor atenuação.

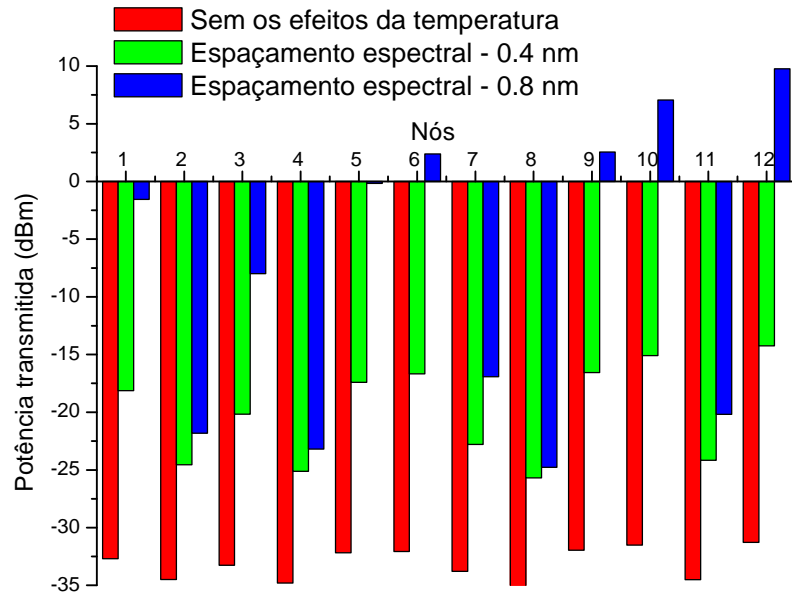
Assim é possível notar que a redução do espaçamento espectral apresenta maior robustez para suportar o efeito das variações da temperatura ambiente, e isto ocorre por que os códigos ópticos com menor espaçamento espectral apresentam um menor desvio nos pulsos ópticos no receptor sobre os efeitos do deslocamento [23].

Quando nós comparamos a figura 20 (a) e (b), podemos observar a influência do peso do código na potência transmitida para atenuar os efeitos da variação da temperatura ambiente, e como esperado, sem a influência desta variação a potência transmitida é menor para os códigos de peso maior quando comparados com os códigos de pesos menores.

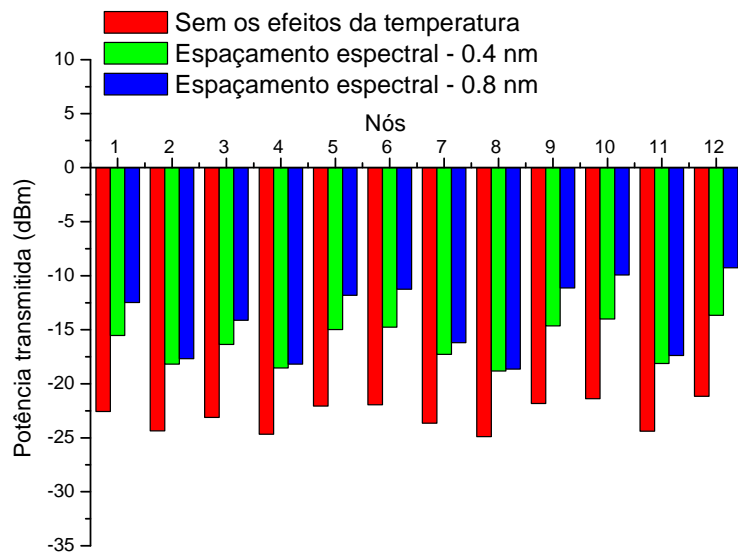
Entretanto, a potência transmitida para um código de peso 8 (figura 20 (a)) é menor para um código com peso 4, como é possível ver na figura 20 (b). A variação do código é inversamente proporcional ao peso do código, assim, para um código maior temos uma menor variação [62].

De acordo com a menor variação, a menor potência transmitida é utilizada para a SNIR alvo [64], entretanto, quando consideramos a variação da temperatura ambiente, a potência transmitida é menor para os códigos de menor peso porque para códigos de peso maiores temos a probabilidade de aumentar o *delay* entre os códigos de chip ópticos.

A figura 21 mostra a potência transmitida para cada um dos nós considerando os efeitos da variação da temperatura para um espaçamento espectral de 0,4 e 0,8 nm. A potência transmitida para cada um dos nós sem considerar os efeitos da temperatura é também mostrada. Um código de peso 8 e 4 são considerados respectivamente na figura 21 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 21 - Potência transmitida para cada nó considerando o espaçamento espectral de 0,4 e 0,8 nm para um código de peso 8 (a) e peso 4. (b)

A partir da figura 21 (a) e (b), podemos observar os efeitos da variação da temperatura em cada um dos nós. A mesma tendência para os efeitos da variação de temperatura observadas anteriormente foram confirmadas para os mesmos parâmetros de código, além disto, é possível verificar a MAI, interferência entre outros usuários em conjunto com os efeitos de temperatura.

Por exemplo o nó 6 considerado com peso 4 na figura 20 (b) tem a potência transmitida em aproximadamente -21,8 dBm quando consideramos a variação da temperatura. Por outro lado, a potência aumenta para -14,8 dBm e -11,2 dBm quando a variação da temperatura é

considerada para um código com espaçamento espectral de 0,4 e 0,8 nm respectivamente.

Neste contexto, foi observado que ocorre um aumento da MAI quando ocorre um aumento do deslocamento causado pela variação da temperatura. Este efeito é resultado da diminuição da altura da autocorrelação causada pelos efeitos da variação da temperatura e distorção da forma, bem como da largura do sinal autocorrelacionado no decodificador, que é causado pela interferência dos outros nós.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho os procedimentos de otimização baseados em inteligência de partículas foram investigados, em busca de uma solução eficiente para o problema de alocação de recursos para otimização da SNIR em redes ópticas WDM/OCDM com nível de QoS aceitável e, levando em conta as restrições físicas do sistema.

O modelo da SNIR considerou a interferência de múltiplo acesso (MAI) entre os OCP's baseada nos códigos 2-D (comprimento de onda e tempo), ruído de emissão espontânea (ASE) para os amplificadores em cascata, dispersão por velocidade de grupo dispersão (GVD) e polarização dos modos de dispersão (PMD) para os efeitos dispersivos e a variação da temperatura ambiente. A característica dos algoritmos baseados em enxame de partículas (PSO) são atrativas devido a sua performance e complexidade quando comparado a outros métodos numéricos, inversão de matrizes e outras heurísticas.

Para os estudos realizados sobre as influências da temperatura na fibra óptica, foram consideradas somente as fibras enterradas, pois foram encontrados somente trabalhos considerando estas fibras, porém, vale salientar que os mesmos efeitos ocorrem também nas fibras instaladas no meio aéreo, e que poderiam ser foco de novos estudos.

Para o contexto da otimização de redes, o sistema foi descrito e figuras de mérito foram apresentadas para o desenvolvimento do modelo do PSO, com ênfase na otimização dos parâmetros de entrada e performance da rede. Após isso, os resultados numéricos para a otimização do problema foram discutidos sobre a possibilidade de cenários realísticos.

Em ordem de determinar os valores aceitáveis para os parâmetros de entrada dos sistema PSO, tais como os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$ , vetor de velocidade máxima  $V_{max}$ , peso da inércia  $\omega$  e tamanho da população  $\mathcal{P}$ , simulações foram realizadas em ambiente Matlab, visando a otimização do problema de alocação de potência para redes OCDM/WDM. Nestas redes, o número de transmissões simultâneas de códigos ópticos normalmente é baixo, menor do que 10.

Para o problema específico estudado, a otimização dos parâmetros obteve valores diferentes dos reportados na literatura para problemas similares. Os resultados numéricos considerando um número de *spans* nos mostrou a viabilidade da utilização do PSO para a resolução do problema de alocação de potência para até 6 spans, garantindo uma solução de qualidade e convergência. O resultado é adequado, quando considerado 4 spans sem a regeneração eletrônica do sinal, e os resultados numéricos nos mostraram que quando consideramos a ASE, GVD, e PMD, esta penalidade representa uma redução da potência recebida durante o espalhamento temporal.

Estes resultados numéricos demonstraram uma considerável variação da energia transmitida para diferentes níveis de taxa de convergência para o algoritmo PSO, onde a máxima eficiência energética é atingida na convergência total do PSO.

Já as análises considerando o quesito de variação da temperatura ambiente na fibra, mostram que usualmente há dificuldade em determinar e compensar esta variação devido a suas flutuações e natureza dinâmica. Além disso, mesmo as ligações compensadas totalmente para a dispersão dos efeitos da variação da temperatura ambiente poderá gerar uma distorção no tempo. O deslocamento no tempo, é um fenômeno com espalhamento temporal e diversos comprimentos de onda relativamente atrasados, além disso, este deslocamento no tempo acaba por resultar uma decodificação incorreta em conjunto com a detecção de erros de bit.

O controle de potência baseado em espalhamento de partículas (PSO) foi utilizado para o ajuste direto da intensidade da potência transmitida a partir do laser considerando uma SNIR alvo. Para os resultados numéricos atingidos, foi observada a variação da potência transmitida de acordo com os parâmetros de código, através do peso e espaçamento espectral. Neste contexto, o algoritmo para controle de potência baseado em PSO se mostrou eficaz a fim de atenuar de forma dinâmica os efeitos da variação da temperatura ambiente, com baixo custo e baixa complexidade computacional.

Com tudo, os estudos demonstraram que o PSO se torna uma solução eficiente e eficaz para ser aplicada nas redes ópticas, podendo ser adaptado a uma série de influências que as redes utilizando fibras podem sofrer durante sua instalação e transmissão, ampliando assim as possibilidades de utilização das fibras em redes de transmissão, otimizando o sistema de forma dinâmica e confiável.

A sugestão para desenvolvimento de trabalhos futuros consiste na utilização de algoritmos de otimização com variações relativas ao PSO, bem como o emprego de modelos matemáticos distintos para o modelamento das restrições da camada física.



## REFERENCIAS

- [1] E. Wong, "Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 597 – 608, Feb., 2012
- [2] H. Beyranvand and J. Salehi, "All-optical multiservice path switching in optical code switched GMPLS core network", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 17, pp. 2001 – 2012, Jun. 2009.
- [3] H. Yin and D. J. Richardson, *Optical code division multiple access communication networks: theory and applications*. Berlin: Springer-Verlag and Tsinghua University Press, 2009.
- [4] A. Rahbar, "Review of Dynamic Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment Techniques in All-Optical Wavelength-Routed Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, ACCEPTED FOR PUBLICATION
- [5] F. R. Durand, M. Lima and E. Moschim, "Impact of pmd on hybrid wdm/ocdm networks," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2787–2789, December 2005.
- [6] F. R. Durand and T. Abrão, "Distributed SNIR Optimization Based on the Verhulst Model in Optical Code Path Routed Networks With Physical Constraints", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 9, pp. 683–691, Sep. 2011. doi:10.1364/JOCN.3.000683
- [7] F. R. Durand, M. S. Filho and T. Abrão, "The effects of power control on the optical CDMA random access protocol", *Optical Switching and Networking*, (In press) doi:10.1016/j.osn.2011.06.002
- [8] N. Tarhuni, T. Korhonen, M. Elmusrati and E. Mutafulungwa, "Power Control of Optical CDMA Star Networks", *Optics Communications*, vol. 259, pp. 655 – 664, Mar. 2006.
- [9] E. Inaty, R. Raad, P. Fortier, and H. M. H. Shalaby, "A Fair QoS-Based Resource Allocation Scheme For a Time-Slotted Optical OV-CDMA Packet Networks: a Unified Approach," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 21, pp. 1-10, Jan. 2009.
- [10] E. Inaty, H. Shalaby, P. Fortie, and L. Rusch, "Optical Fast Frequency Hopping CDMA System Using Power Control", *Journal of Lightwave Tech.*, vol. 20, n. 2, pp.166 – 177, March 2003.
- [11] C. C. Yang, J. F. Huang, and T. C. Hsu, "Differentiated service provision in optical CDMA network using power control," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 20, pp. 1664–1666, 2008.
- [12] S. Khaleghi and Mohammad Reza Pakravan, Quality of Service Provisioning in Optical CDMA Packet Networks, *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 2, no. 5, pp. 283–292, Feb. 2010.
- [13] H. Yashima, and T. Kobayashi "Optical CDMA with time hopping and power control for multirate networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 695-702, March 2003.
- [14] T. Miyazawa and I. Sasase "Multi-rate and multi-quality transmission scheme using adaptive overlapping pulse-position modulator and power controller in optical network," *IEEE ICON*, vol. 1, pp. 127-131, November 2004.
- [15] R. Raad, E. Inaty, P. Fortier, and H. M. H. Shalaby, "Optimal resource allocation scheme in a multirate overlapped optical CDMA system," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 25, no. 8, pp. 2044 – 2053, August 2007.
- [16] M. Tang, C. Long and X. Guan, "Nonconvex Optimization for Power Control in Wireless CDMA Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 58, n. 4, pp. 851-865, 2011.

- [17] Q. Zhu. and L. Pavel, “Enabling Differentiated Services Using Generalized Power Control Model in Optical Networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no 9, p. 1 – 6, Sept. 2009.
- [18] R. Ramaswami, K. Sivarajan and G. Sasaki, *Optical Networks: A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann, Boston, MA, 2009.
- [19] E. Mutafungwa, “Comparative analysis of the traffic performance of fiber-impairment limited WDM and hybrid OCDM/WDM networks”, *Photon Network Commun.*, vol. 13, pp.53–66, Jan. 2007.
- [20] F R. Durand, L. Galdino, L. H. Bonani, F. R. Barbosa1, M. L. F. Abbade and Edson Moschim, “The Effects of Polarization Mode Dispersion on 2D Wavelength-Hopping Time Spreading Code Routed Networks”, *Photonics Network Communications*, vol. 20, no. 1, pp. 27 – 32, Aug. 2010. DOI 10.1007/s11107-010-0242-6.
- [21] F. R. Durand, M. L. F. Abbade, F. R. Barbosa, and E. Moschim, “Design of multi-rate optical code paths considering polarisation mode dispersion limitations,” *IET Communications*, vol. 4, no. 2, pp. 234–239, Jan. 2010.
- [22] Tolulope B. Osadola, Siti K. Idris, Ivan Glesk, and Wing C. Kwong, “Effect of Variations in Environmental Temperature on 2D-WH/TS OCDMA Code Performance” *Journl of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 1, pp. 68–73, Jan. 2013.
- [23] J. V. dos Reis, T. R. Raddo, A. L. Sanches and Ben-Hur V. Borges, “Mitigation of Environmental Temperature Variation Effects Using Fuzzy Systems and Source-Matched Spreading Codes for OCDMA Networks”, *ICTON – 2014*.
- [24] Camille-Sophie Brès and Paul R. Prucnal, “Code-Empowered Lightwave Networks”, *J. Lightw. Technol.* , vol. 25, n. 10, pp. 2911 – 2921, Oct. 2007.
- [25] Yue-Kai Huang, Varghese Baby, Ivan Glesk, Camille-Sophie Bres, Christoph M. Greiner, Dmitri Iazikov, Thomas W. Mossberg, and Paul R. Prucnal, Fellow, “Novel Multicode-Processing Platform for Wavelength-Hopping Time-Spreading Optical CDMA: A Path to Device Miniaturization and Enhanced Network Functionality”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 13, no. 5, pp. 1471 – 1479, september/october 2007.
- [26] J. Refi, “Optical Fibers for Optical Networking”, *Bell Labs Technical Journal*, pp. 246 – 261, janeiro/março de 1999.
- [27] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, New York, Wiley-Interscience, 2002.
- [28] H. Yoshimura, K. Sato e N. Takachio, “Future Photonic Transport Networks Based on WDM Technologies”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 74 – 81, fevereiro de 1999.
- [29] K. Sato, S. Okamoto, and H. Hadama, “*Network performance and integrity enhancement with optical path layer technologies*,” *IEEE J.Select. Areas Commun.*, vol. 12, pp. 159–170, 1994.
- [30] I. Chlamtac, A. Farago, and T. Zhang, “*Lightpath (wavelength) routing in large WDM networks*,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 14, pp. 909–913, 1996.
- [31] Y. Chen, C. Chang, Y. Yang, I. Kuo e T. Laing, “Mach-Zehnder Fiber-Gratings-Based Fixed and Reconfigurable Multichannel Optical Add-Drop Multiplexers for DWDM networks”, *Optics Communications*, n. 169, pp. 245 – 262, outubro de 1999.
- [32] K. Kitayama, “*Code Division Multiplexing Lightwave Networks Based upon Optical Code Conversion*”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, n. 7, pp.1309 – 1319, setembro de 1998.
- [33] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, “*Optical Networks: a Practical Perspective*” Morgan Kauffmann Publishers, 1998.

- [34] F. Durand, “Contribuições aos Estudos de Redes Ópticas Híbridas WDM/OCDM”, tese de Doutorado, Novembro 2007, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas.
- [35] H. Sotobayashi, W. Chujo e K. Kitayama, “Transparent Virtual Optical Code/Wavelength Path Network”, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, n. 3, pp.699 – 704, maio/junho de 2002.
- [36] Govind P. Agrawal ‘Fiber Optic Communication Systems’, Wiley Interscience 2002.
- [37] F. R. Durand, L. Galdino, M. F. L. Abbade, E. Moschim, F. R. Barbosa “Performance Evaluation of Advanced WDM Networks with Optical Codes and Photonic Switching” IMOC, October 2007.
- [38] J. Refi, Optical fibers for optical networking, *Bell Labs Technical Journal*, pp. 246 – 261, janeiro/março de 1999.
- [39] R. Scholtz, “The Spread Spectrum Concept”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 25, n. 8, pp. 748, agosto de 1977.
- [40] W. Huang, M. Nizan, I. Andonovic e M. Tur, “Coherent Optical CDMA (OCDMA) Systems Used for High-Capacity Optical Fiber Networks – System Description, OTDMA Comparison, and OCDMA/WDMA Networking, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, n. 6, pp. 765 – 778, junho de 2000.
- [41] S. Huang, K. Baba, M. Murata and K. Kitayama, “Variable-bandwidth optical paths: comparison between optical code-labeled path and OCDM path”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 10, pp. 3563 – 3573, Oct. 2006.
- [42] Kerim Fouli e Martin Maier, “OCDMA and Optical Coding: Principles, Applications, and Challenges”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 8, pp. 27 – 34, Aug. 2007.
- [43] G.-C. Yang and W.C. Kwong, Prime codes with applications to CDMA optical and wireless networks, Artech House, Boston, MA, 2002.
- [44] A. L. Sanches, J. V. dos Reis Jr. and B.-H. V. Borges, “Analysis of High-Speed Optical Wavelength/Time CDMA Networks Using Pulse-Position Modulation and Forward Error Correction Techniques”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 22, pp. 5134 – 5144, Nov. 2009.
- [45] J. Kennedy and R.C. Eberhart, “Particle swarm optimization”, in *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, USA, pp. 1942–1948, 1995.
- [46] K. Kitayama and M. Murata, “Versatile Optical Code-Based MPLS for Circuit, Burst and Packet Switching”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 11, pp. 2573 – 2764, Nov. 2003
- [47] G. Pavani, L. Zuliani, H. Waldman and M. Magalhães, “Distributed approaches for impairment-aware routing and wavelength assignment algorithms in GMPLS networks”, *Computer Networks*, vol. 52, no. 10, pp. 1905–1915, July 2008.
- [48] N. Nedjah and L. Mourelle, *Swarm Intelligent Systems*, Springer, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [49] K. Zielinski, P. Weitkemper, R. Laur, and K. Kammeyer, “Optimization of Power Allocation for Interference Cancellation With Particle Swarm Optimization”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 1, pp. 128 – 150, Feb. 2009;
- [50] T. Abrão, L. D. Sampaio, M. Proença Jr., B. A. Angélico and Paul Jean E. Jeszensky, Multiple Access Network Optimization Aspects via Swarm Search Algorithms, In: Nashat Mansour. (Org.). *Search Algorithms and Applications*. 1 ed. Vienna, Austria: InTech, ISBN 978-953-307-156-5, 2011, v. 1, p. 261-298.
- [51] A. Chatterjee and P. Siarry, Nonlinear inertia weight variation for dynamic adaptation in particle swarm optimization, *Computers & Operations Research*, vol 33, no. 3, pp. 859–871.

- [52] M. Moustafa, I. Habib, and M. Naghshineh, Genetic algorithm for mobiles equilibrium, MILCOM 2000. 21st Century Military Communications Conference Proceedings 2000.
- [53] H. Elkamchouchi, H., Elragal and M. Makar, Power control in cdma system using particle swarm optimization, 24th National Radio Science Conference, pp. 1–8. 2007.
- [54] Rodney S. Tucker, "Green Optical Communications - Part I: Energy Limitations in Transport", IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 17, no. 2, pp. 245 – 260, March-April 2011.
- [55] Rodney S. Tucker, "Green Optical Communications - Part II: Energy Limitations in Networks", IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 17, no. 2, pp. 261 – 274, March-April 2011.
- [56] N. Nedjah and L. M. Mourelle. *Swarm Intelligent Systems*, Springer, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [57] SANTOS FILHO, R. V. B. d. Análise de Sistemas CDMA Ópticos. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.
- [60] E. Inaty, R. Raad, P. Fortier, and H. M. H. Shalaby, “A Fair QoS-Based Resource Allocation Scheme For a Time-Slotted Optical OV-CDMA Packet Networks: a Unified Approach,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 21, pp. 1-10, Jan. 2009.
- [61] M. Tang, C. Long and X. Guan, “Nonconvex Optimization for Power Control in Wireless CDMA Networks,” *Wireless Personal Communications*, vol. 58, n. 4, pp. 851-865, 2011.
- [62] H. Yin and D. J. Richardson, *Optical code division multiple access communication networks: theory and applications*. Berlin: Springer-Verlag and Tsinghua University Press, 2009.
- [63] G. Ghosh, M. Endo, and T. Iwasaki, “Temperature-dependent Sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some optical fiber glasses,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 8, pp. 1338–1342, Aug. 1994.
- [64] N. Tarhuni, T. Korhonen, M. Elmusrati and E. Mutafungwa, “Power Control of Optical CDMA Star Networks”, *Optics Communications*, vol. 259, pp. 655 – 664, Mar. 2006.
- [65] E. K. H. Ng, G. E. Weichenberg, and E. H. Sargent, “Dispersion in multi-wavelength optical code division multiple access systems: Impact and remedies,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 11, pp. 1811–1816, Nov. 2002
- [66] F. Durand and T. Abrão, “Energy-Efficient Power Allocation for WDM/OCDM Networks With Particle Swarm Optimization,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 5, pp. 512–523, May. 2013.
- [67] GALDINO, Lidia. Análise de Desempenho de Redes Ópticas Híbridas WDM/OCDM. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP, 2008.