

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THIAGO DOS SANTOS CAVALI

**CONTROLE DE POTÊNCIA VIA ALGORITMO DE ENXAME DE VAGA-LUMES
PARA ATENUAÇÃO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA
AMBIENTE EM REDES OCDMA**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

THIAGO DOS SANTOS CAVALI

**CONTROLE DE POTÊNCIA VIA ALGORITMO DE ENXAME DE VAGA-LUMES
PARA ATENUAÇÃO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA
AMBIENTE EM REDES OCDMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Engenharia Elétrica”.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Scalassara

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C376 Cavali, Thiago dos Santos

Controle de potência via algoritmo de enxame de vaga-lumes para atenuação dos efeitos de variação da temperatura ambiente em redes OCDMA / Thiago dos Santos Cavali. – 2017.
85 f. : il. ; 31 cm

Orientador: Fábio Renan Durand.

Coorientador: Paulo Rogério Scalassara.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2017.

Bibliografia: p. 81-85.

1. Comunicações ópticas. 2. Algoritmos heurísticos. 3. Controle de temperatura. 4. Engenharia Elétrica – Dissertações. I. Durand, Fábio Renan, orient. II. Scalassara, Paulo Rogério, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº 038:

“Controle de Potência Via Algoritmo de Enxame de Vagalumes para Atenuação dos Efeitos da Variação da Temperatura Ambiente em Redes OCDMA”.

por

Thiago dos Santos Cavali

Orientador: **Prof. Dr. Fábio Renan Durand**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA – Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos Industriais, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 9:30h do dia 31 de julho de 2017. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. Fábio Renan Durand
Presidente

Prof. Dr. Taufik Abrão
UEL

Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi
UTFPR-CP

Prof. Dr. Paulo Rogério Scalassara
UTFPR-CP

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Alessandro do Nascimento Vargas
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa.

Aos meus pais, por todo apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas bênçãos concedidas e por sempre me guiar e iluminar.

Pela brilhante orientação, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Renan Durand. Um exemplo de pessoa, professor e pesquisador que levo para toda minha vida. Agradeço também ao meu co-orientador Paulo Rogerio Scalassara.

Por todo apoio e amor, é impossível não ser grato a meus pais. Palavras não são suficientes para agradecer por tudo que fizeram para que eu pudesse chegar até aqui. Espero um dia poder retribuir todo esse esforço.

À minha namorada Natalia, por estar comigo mesmo nas horas mais difíceis. Aos companheiros de mestrado Marcus, Evandro, André, Etiene e Daniel por todo o companheirismo e risadas. Ao amigo e brilhante pesquisador Lucas Bonfim pela parceria. Aos colegas da Bateria Infernal pela ajuda em esfriar a cabeça quando o estresse estava alto. Aos amigos Guilherme, Henrique e Mateus pelas muitas hospedagens em Cornélio Procópio.

Aos professores do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) da UTFPR Campo Mourão, por todo o incentivo no período em que precisei conciliar o mestrado com as aulas do departamento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Cornélio Procópio pela oportunidade concedida.

Enfim, a todos que, de alguma maneira, me incentivaram ao longo dessa jornada, deixo aqui meu muito obrigado.

*“Temos de fazer o melhor que podemos. Esta é a nossa sagrada
responsabilidade humana.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

CAVALI, T. S. **Controle de Potência Via Algoritmo de Enxame de Vaga-Lumes Para Atenuação dos Efeitos da Variação da Temperatura Ambiente em Redes OCDMA**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Este trabalho apresenta uma investigação sobre o controle de potência em redes OCDMA visando atenuar os efeitos adversos da variação da temperatura ambiente nas fibras ópticas. O sinal óptico transmitido em fibras sujeitas à variação da temperatura ambiente apresenta uma deformação da função de autocorrelação do sinal óptico. Essa deformação ocasiona uma perda de potência que afeta negativamente a qualidade de transmissão das redes OCDMA. O sistema proposto utiliza uma meta-heurística baseada no comportamento de enxames de vaga-lumes (FA – *Firefly Algorithm*) para o controle da potência alocada para cada usuário da rede. Esse controle visa compensar a perda de potência causada pelos diversos efeitos que afetam as redes OCDMA, incluindo os relacionados à variação da temperatura ambiente. O controle de potência tradicional se baseia em um método matemático que utiliza inversão matricial, tendo por isso um alto custo computacional, ao passo que a abordagem proposta reduz a complexidade computacional do problema. Toda a estrutura da rede e do algoritmo de otimização, além das simulações computacionais foram desenvolvidas em ambiente MATLAB®. Os resultados obtidos com as simulações mostram que a variação da temperatura ambiente, a configuração de rede considerada e os parâmetros de construção do código afetam o desempenho das redes OCDMA que utilizam códigos 2-D e 3-D. Foi possível concluir que a utilização do FA é eficiente no controle de potência em redes OCDMA, convergindo após um pequeno número de iterações para os valores de potência ótima determinados via metodologia analítica e apresentando resultados semelhantes a outras abordagens presentes na literatura como, por exemplo, otimização por enxame de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*).

Palavras-chave: Controle e Alocação de Recursos. Redes Ópticas. Redes OCDMA 3-D. Redes OCDMA 2-D. Algoritmo do Enxame de Vaga-lumes.

ABSTRACT

CAVALI, T. S. **Power Control Using Firefly Algorithm for Mitigation of Environmental Temperature Variation Effects in OCDMA Networks**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

This work presents a research related to power control in OCDMA networks aiming to mitigate the effects of environmental temperature variation in optical fibers. The optical signals transmitted in fibers exposed to environmental temperature variation present a deformation on the optical signal autocorrelation function. This deformation causes a power loss that negatively affects the transmission quality in OCDMA networks. The proposed system considers a meta-heuristic based on firefly swarm behavior (FA – Firefly Algorithm) to control the allocated power to each user in network. This control aims to compensate the power penalty caused by different effects that affects the OCDMA networks, among them the effects of the environmental temperature variation. The usual power control is based on a mathematical method that uses a matrix inversion, having a high computational complexity, while the proposed approach reduces the computational effort for the problem resolution. The network structure and the optimization algorithm are implemented on MATLAB® environment. The obtained results show that environmental temperature variation, the network structure and the code construction parameters affects the performance of the OCDMA networks that uses 2-D and 3-D codes. It was possible to conclude that FA is an efficient approach to realize the power control in OCDMA networks, converging after a small number of iterations to optimum power values obtained by analytical methods and equivalent results when compared to other approaches in literature as, by example, Particle Swarm Optimization (PSO).

Keywords: Control and Resource Allocation. Optical Networks. 3-D OCDMA Networks. 2-D OCDMA Networks. Firefly Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Topologia Estrela de uma rede OCDMA.....	22
Figura 2 - Fluxo de bits em codificação 1-D.....	25
Figura 3 - Representação de um código óptico OCDMA 2-D.....	26
Figura 4 – Estrutura de um código tridimensional.....	27
Figura 5 - Diagrama de blocos do código.....	48
Figura 6 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de θ e 10 vaga-lumes.....	54
Figura 7 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de θ e 20 vaga-lumes.....	55
Figura 8 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de α_0	56
Figura 9 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de β_0	57
Figura 10 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de γ	58
Figura 11 - Potência transmitida por iteração do FA considerando variação da temperatura ambiente e espaçamento espectral de 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b).....	60
Figura 12 - Potência transmitida por iteração do FA considerando variação no comprimento do link para um espaçamento espectral de 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b)....	61
Figura 13 - Comparação entre a potência alocada por iteração pelo PSO e pelo FA.	63
Figura 14 - NMSE por iteração considerando a utilização de FA e PSO para controle de potência em uma rede com 4, 8 e 12 usuários.....	64
Figura 15 - Potência média por nó da rede com e sem efeitos da variação da temperatura ambiente.	67
Figura 16 - Potência média por iteração com e sem os efeitos da variação da temperatura ambiente.	68
Figura 17 - Potência transmitida considerando códigos 3-D com espaçamento espectral 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b) e diferentes valores de variação da temperatura ambiente.....	70

Figura 18 - Potência média transmitida por nó em uma rede com variação da distância do link considerando códigos 3-D com espaçamento espectral de 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b).....	71
Figura 19 - Distância do link para cada nó da rede.....	72
Figura 20 - Variação da temperatura ambiente para cada nó da rede.....	73
Figura 21 - Potência transmitida por iteração para códigos com diferentes espaçamentos espectrais e peso de código 4 (a) e 8 (b).....	74
Figura 22 - Potência Média transmitida por iteração para o FA e para o PSO considerando redes com 4, 8 e 12 nós.	75
Figura 23 - Evolução do NMSE para o FA e para o PSO.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

1-D	Códigos OCDMA Unidimensionais
2-D	Códigos OCDMA Bidimensionais
2-D WH/TS	Códigos OCDMA 2-D <i>Wavelength-Hopping/Time-Spreading</i>
3-D	Códigos OCDMA Tridimensionais
3-D PD	Códigos OCDMA 3-D <i>Perfect Difference</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BA	<i>Bat Algorithm</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CINR	<i>Carrier-to-Interference plus Noise Ratio</i>
DS/CDMA	<i>Direct Sequence/Code Division Multiple Access</i>
FA	<i>Firefly Algorithm</i>
GA	<i>Genetic Algorithms</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LFA	<i>Lévy-Flights Firefly Algorithm</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MAI	<i>Multiple Access Interference</i>
MC-DS/CDMA	<i>Multi-Carrier-DS/CDMA</i>
MIMO	<i>Multiple Inputs Multiple Outputs</i>
MPP	<i>Multiple Pulse per Plain</i>
NMSE	<i>Normalized Mean Square Error</i>
OCDM	<i>Optical Code Division Multiplexing</i>
OCDMA	<i>Optical Code Division Multiple Access</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OOC	<i>Optical Orthogonal Codes</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RSS	<i>Radio Sinal Strength</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SNIR	<i>Signal-to-Noise plus Interference Ratio</i>
SPP	<i>Single Pulse per Plain</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>

TSP	<i>Travelling Salesman Problem</i>
WDM/OCDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing/Optical Code-Division Multiplexing</i>
WDMA	<i>Wavelength Division Multiple Access</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

d_{ij}	Comprimento total do <i>link</i> .
d_i^{tx}	Distância do i-ésimo nó transmissor ao acoplador estrela
d_j^{rx}	Distância do acoplador estrela ao j-ésimo nó receptor
P_{rj}	Potência recebida pelo j-ésimo nó
$\alpha_{estrela}$	Atenuação causada pelo acoplador estrela
p_i	Potência transmitida pelo i-ésimo nó transmissor
α_f	Atenuação causada pela fibra
δ	Taxa de excesso de perda
K	Número de nós da rede
T_b	Período de <i>bit</i>
N_T	Comprimento de código
T_c	Período de <i>chip</i>
ω	Ponderação ou peso de código
N_λ	Número de comprimentos de onda
I_a	Restrição de autocorrelação
I_c	Restrição de correlação cruzada
N_s	Número de polarizações
Δ_T	Variação de temperatura
Δ_t	Distorção temporal causada pela variação da temperatura
D_{temp}	Coefficiente termal da fibra
Δ_A	Espaçamento espectral
Δ_τ	Encolhimento da largura de pulso
Δ_λ	Espessura da linha espectral do pulso de comprimento de onda
S_t	Efeito da variação de temperatura ambiente sobre a envoltória da função de autocorrelação
P_p	Potência de pico
τ	Largura do <i>chip</i>
$P_{\Delta t}$	Perda de potência devido à variação da temperatura ambiente

Γ_i	CINR para o i -ésimo usuário
Γ^*	CINR alvo
G_{ij}	Perdas devido as conexões entre os pares transmissor-receptor
G_{amp}	Ganho do amplificador
σ	Potência do ruído
L_c	Soma das perdas no codificador e decodificador
n_{SP}	Fator de emissão espontânea
h	Constante de Planck
f	Frequência da portadora
B_0	Largura de banda óptica
γ_i	SNIR para o i -ésimo usuário
γ^*	SNIR alvo
ρ^2	Variância do código
p	Vetor de potências de transmissão
P_{min}	Potência mínima
P_{max}	Potência máxima
H	Matriz de interferências normalizada
u	Potência do ruído mais interferência (normalizada)
p *	Vetor de potências ótimas
F_k^{lim}	Função limiar
\mathcal{I}	Intensidade da luz de um vaga-lume
r	Distância entre dois vaga-lumes
γ	Coefficiente de absorção da luz
n	Número de vaga-lumes
β	Atratividade de um vaga-lume
α	Parâmetro de aleatoriedade
ε_i	Vetor de números aleatórios com distribuição Gaussiana
θ	Parâmetro de redução da aleatoriedade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2 ESTUDO DE REDES OCDMA	21
2.1 CONCEITOS	21
2.1.1 Arquitetura da rede.....	21
2.1.2 Funcionamento.....	23
2.2 TIPOS DE CÓDIGOS.....	24
2.2.1 Códigos 1-D	24
2.2.2 Códigos 2-D	25
2.2.3 Códigos 3-D	26
2.3 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE EM REDES OCDMA	28
2.4 CONTROLE DE POTÊNCIA EM REDES OCDMA	30
2.4.1 Formulação do problema.....	31
2.4.2 Alternativa para o controle de potência	33
3 OTIMIZAÇÃO	35
3.1 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	36
3.2 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO BASEADOS EM POPULAÇÕES.....	38
3.2.1 Aplicações	39
3.3 ALGORITMO DO ENXAME DE VAGA-LUMES	40
3.3.1 Algoritmo Padrão.....	41
3.3.2 Variáveis de controle do algoritmo	42
3.3.2.1 Atratividade e intensidade da luz.....	42
3.3.2.2 Aleatoriedade	44
3.3.3 Complexidade computacional	45
3.3.3.1 Problema de alocação de potência em redes OCDMA	45
3.3.4 Aplicações	46
4 METODOLOGIA	48
4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO FA	49

4.2 SINTONIA DE PARÂMETROS DO FA.....	50
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE META-HEURÍSTICAS	51
5 RESULTADOS.....	53
5.1 REDES OCDMA 2-D	53
5.1.1 Determinação dos parâmetros sintonizados para o FA.....	54
5.1.2 Controle de potência utilizando FA.....	59
5.1.3 Comparação com outras meta-heurísticas.....	62
5.2 CONTROLE DE POTÊNCIA EM REDES OCDMA 3-D.....	65
5.2.1 Sintonia de parâmetros do FA.....	66
5.2.2 Efeitos da variação da temperatura ambiente	66
5.2.2 Aplicação do FA para o controle de potência	69
5.2.3 Comparação com o PSO.....	75
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6.1 TRABALHOS PRODUZIDOS.....	79
6.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	79
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Levando em conta o rápido aumento no tráfego de dados em circulação nas redes dos mais diversos tipos nos últimos anos, se fez necessário uma evolução no que diz respeito às maneiras como esses dados são transmitidos. Buscou-se também formas de realizar essa transmissão de dados de maneira mais rápida e eficiente (KILPER et al., 2014). Uma das formas utilizadas é a comunicação em fibras ópticas, que consiste em uma abordagem de transporte de informação de um ponto até outro utilizando luz como portadora e fibras ópticas como meio de transmissão (YIN; RICHARDSON, 2009).

A utilização da fibra óptica para transmissão de informações apresenta diversas vantagens, dentre elas cabe destacar (YIN; RICHARDSON, 2009):

- Grande capacidade de comunicação: a capacidade de comunicação de um meio depende da frequência da portadora utilizada, sendo que quanto maior a frequência maior a largura de banda disponível e, portanto, maior a capacidade. As fibras ópticas possuem uma frequência de portadora da ordem de 10^{13} até 10^{16} Hz enquanto outros meios como cabos metálicos e ondas de rádio apresentam uma frequência na ordem de 10^8 Hz.
- Baixa perda na transmissão de dados (atenuação). Um dos principais fatores que limitam o tráfego de dados é a atenuação do meio conforme há um aumento da distância de transmissão. As fibras ópticas possuem uma atenuação de 0,2 dB/km (DOS SANTOS; DURAND; ABRÃO, 2015), com a tendência de uma redução ainda maior desse valor com o avanço da tecnologia, enquanto os cabos metálicos apresentam uma atenuação de 5~10 dB/km. Sendo assim, a utilização da fibra óptica reduz a necessidade da utilização de repetidores de sinal reduzindo, portanto, o custo e a complexidade da rede.
- Imunidade a interferência eletromagnética: Por não utilizarem sinais elétricos e serem construídas utilizando vidro ou polímero plástico (isolantes elétricos) as fibras ópticas não sofrem com interferência eletromagnética, podendo ser utilizadas em ambientes com alto nível de ruído desse tipo como indústrias e fábricas.

- Abundância de matéria-prima e potencial de redução de custo de fabricação: A matéria-prima principal das fibras ópticas é o dióxido de silício, material abundante na natureza. Além disso a evolução da tecnologia traz uma constante melhoria nos processos de produção das fibras, o que permite uma contínua redução no custo de fabricação.

As vantagens da utilização das fibras ópticas como meio de transmissão, aliado ao bom desempenho da tecnologia de Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA – *Code Division Multiple Access*) nas redes sem fio levou o desenvolvimento de redes Ópticas CDMA (OCDMA - *Optical CDMA*) nas quais cada usuário ou canal lógico de transmissão possui um código específico dentro de um canal físico ou espectral comum (YIN; RICHARDSON, 2009).

Ghafouri-Shiraz e Karbassian (2012) mostram que as redes OCDMA podem ter os códigos de usuários espalhados em uma, duas ou três dimensões, sendo chamados códigos OCDMA unidimensionais (1-D), bidimensionais (2-D) e tridimensionais (3-D), respectivamente. No caso dos códigos 1-D, a codificação na maior parte das vezes é feita no domínio do tempo. Já para os códigos 2-D, os códigos podem ser feitos utilizando diferentes configurações sendo uma das mais utilizadas tempo/comprimento de onda como em Jyoti e Kaler (2011). Por fim, os códigos 3-D manipulam tempo/comprimento de onda/espço (polarização) como mostrado em Li, Fan e Shum (2012) e Yeh, Lin e Wu (2009).

Dentre os problemas decorrentes do acesso múltiplo das redes OCDMA cabe destacar a interferência entre códigos de diferentes usuários, usualmente chamada de Interferência de Acesso Múltiplo (MAI – *Multiple Access Interference*), que pode limitar o número de usuários que acessam a rede de maneira simultânea (DOS SANTOS, 2015; YIN; RICHARDSON, 2009).

Um dos principais problemas decorrentes da MAI é o chamado efeito *near-far*, no qual os nós receptores que se encontram mais próximos dos respectivos nós transmissores receberão o sinal com uma potência maior quando comparados aos nós com distâncias maiores entre transmissor e receptor (YIN; RICHARDSON, 2009). Esse problema causa uma degradação da Relação Sinal-Ruído e Interferência (SNIR – *Signal to Noise plus Interference Ratio*) o que deve ser evitado, já que com uma SNIR alta é possível reduzir o número de retransmissões nas camadas superiores aumentando assim a taxa de transferência da rede (DURAND; ABRÃO, 2011).

Existem diversos fatores que prejudicam o desempenho de uma rede óptica, dentre os quais estão os efeitos lineares e não-lineares das fibras ópticas mostrados em Ramaswami, Sivarajan e Sasaki (2010). Esses efeitos podem ser amenizados através da utilização de algoritmos de alocação de recursos que controlam, por exemplo, a potência transmitida por cada nó da rede, a utilização do espectro, utilização dos canais da rede, entre outros. Essa alocação de recursos aumenta o desempenho, otimiza a utilização da rede, faz com que a rede atinja determinada Qualidade de Serviço (QoS - *Quality of Service*) e pode ser realizada através da otimização da SNIR (TARHUNI et al., 2006).

Dentre os efeitos que afetam a qualidade de transmissão das redes OCDMA, um dos mais importantes é a variação da temperatura ambiente. Esse efeito foi estudado para redes com códigos 2-D em trabalhos como Osadola et al. (2013a) e Osadola et al. (2013b) que mostraram uma dificuldade grande em determinar e amenizar de maneira precisa esse efeito devido a sua grande flutuação e dinâmica natural.

A variação da temperatura ambiente causa efeitos como o alargamento de pulso, redução do pico do sinal de autocorrelação e o deslizamento entre janelas de tempo destinadas a diferentes pulsos ópticos em diferentes comprimentos de onda. Vale salientar que esses efeitos ocorrem mesmo em fibras com compensação de dispersão e por isso não devem ser ignorados, já que causam decodificação incorreta e, conseqüentemente, erro na detecção dos *bits* (DOS SANTOS, 2015; OSADOLA et al., 2013a).

A atenuação dos efeitos da variação da temperatura ambiente vem sendo estudada ao longo dos últimos anos para redes OCDMA com códigos em duas dimensões (OCDMA 2-D) e diferentes propostas surgiram para esse fim. Osadola et al. (2013a) propuseram em seu trabalho uma mudança no projeto do código a ser utilizado, tendo em vista que com uma redução do espaçamento de canal da rede e um controle dos pesos de código os efeitos da variação da temperatura ambiente são reduzidos de maneira significativa.

Outros trabalhos utilizam uma metodologia de alocação dinâmica de recursos, como por exemplo Dos Reis Junior et al. (2014) que realizam um ajuste dos pesos de código através de lógica *fuzzy*. Esse ajuste altera os pesos de código considerando a leitura de sensores externos que medem a temperatura na fibra. Dos Santos, Durand e Abrão (2015), por sua vez, realizam o controle dinâmico da potência

do sinal óptico transmitido através de algoritmos de otimização por enxames de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*) e otimização por colônia de formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*). Esse controle de potência visa compensar a perda de potência causada pela variação da temperatura ambiente. A abordagem através de algoritmos meta-heurísticos baseados em populações se mostra uma solução de menor custo computacional e complexidade quando comparado a métodos matemáticos (como inversão de matrizes) ou outras meta-heurísticas como algoritmos genéticos (GA – *Genetic Algorithms*).

Os trabalhos citados anteriormente mostram técnicas empregadas na alteração do projeto dos códigos 2-D que são difíceis de serem implementadas de forma automatizada na rede. Neste contexto, o controle e alocação de recursos (como a potência transmitida) pode atenuar de maneira dinâmica os efeitos da variação da temperatura ambiente ao longo de uma rede óptica por meio do controle da potência transmitida pelo laser, consistindo em uma solução de baixo custo e complexidade. Vale ressaltar que pode-se realizar o controle da potência do sinal óptico transmitido através de um ajuste baseado diretamente na SNIR desejada no receptor, portanto esse controle aparece como um problema de otimização (TARHUNI et al., 2006). Entretanto, se observa que ainda não foram estudados os efeitos da variação de temperatura ambiente em códigos 3-D, bem como formas de atenuar estes efeitos por nenhuma das técnicas citadas anteriormente.

1.1 OBJETIVOS

Dentro do contexto apresentado, e sabendo que até o momento não há na literatura trabalhos relacionados a esse tema, os objetivos do presente trabalho são mostrados a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a utilização de um algoritmo de otimização baseado em enxame de vaga-lumes (FA – *Firefly Algorithm*) para realizar o controle de potência em redes OCDMA, dando ênfase às redes que utilizam códigos 3-D. Esse controle visa compensar a perda de potência causada pela variação da temperatura

ambiente nas fibras ópticas, já que essa perda de potência é responsável por uma degradação no desempenho da rede.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são divididos da seguinte maneira:

- Realizar um estudo sobre a utilização do algoritmo de enxames de vaga-lumes para controle de potência nas redes OCDMA 2-D, realizando a sintonia de parâmetros do algoritmo e comparação com outras abordagens de controle de potência como PSO;
- Implementar e analisar os efeitos da variação da temperatura ambiente em redes OCDMA 3-D para uma dada arquitetura de rede;
- Realizar o controle de potência nas redes OCDMA 3-D através da aplicação do FA;
- Realizar uma comparação do FA com o PSO para o controle de potência nas redes OCDMA 3-D.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta conceitos relacionados às Redes OCDMA, abordando assuntos como estrutura básica da rede, tipos de códigos de usuário, efeitos da variação da temperatura ambiente e controle de potência;
- O capítulo 3 aborda os conceitos de otimização e os fundamentos do algoritmo do enxame de vaga-lumes;
- No capítulo 4 será mostrada a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho.
- Os resultados obtidos, bem como a análise destes resultados, serão mostrados no capítulo 5.
- Por fim, no capítulo 6 serão feitas as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

2 ESTUDO DE REDES OCDMA

Fouli e Maier (2007) destacam a existência de diversos fatores que levaram ao crescimento das redes baseadas na tecnologia OCDMA nas últimas décadas, tais como operação assíncrona, alta flexibilidade da rede, transparência nos protocolos, controle de rede simplificado e alto nível de segurança. Além disso, essa tecnologia abrange uma vasta gama de serviços com diferentes demandas de taxa de *bit*, duração da conexão, frequência de uso e tempo de configuração. Esse conjunto de fatores faz com que as redes OCDMA possam ser controladas na camada física para adaptações aos requisitos do usuário e às variações de tráfego (FOULI; MAIER, 2007).

Além das vantagens citadas, Stok e Sargent (2000) afirmam que as redes OCDMA oferecem uma alternativa interessante para projetos de redes locais (LAN – *Local Area Network*), já que a utilização de CDMA se destaca quando comparada a outras formas de acesso múltiplo tais como acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA – *Time Division Multiple Access*) e acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda (WDMA – *Wavelength Division Multiple Access*).

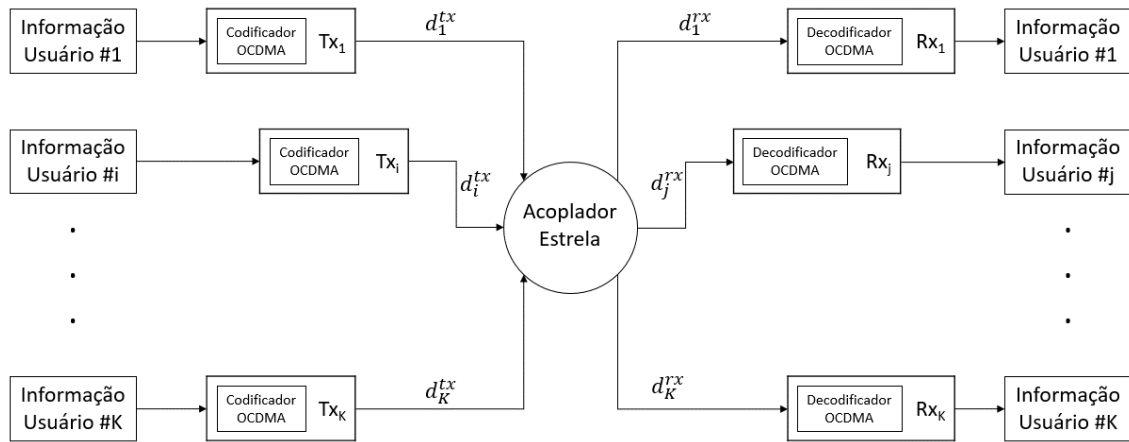
Todas as vantagens citadas anteriormente levam a concluir que redes OCDMA tem um grande potencial de uso e estudo, por esse motivo nessa seção serão mostrados fundamentos relacionados a configuração da rede a ser utilizada nesse trabalho.

2.1 CONCEITOS

2.1.1 Arquitetura da rede

Segundo Fouli e Maier (2007) redes OCDMA são redes baseadas no princípio de multiplexação OCDM (*Optical Code Division Multiplexing*) no qual cada usuário/nó da rede é diferenciado por um código óptico específico. A estrutura de uma rede OCDMA com acoplador estrela passivo pode ser vista na Figura 1, nessa topologia a interconexão óptica de todos os códigos é realizada passivamente através de um acoplador estrela (STÁBILE FILHO, 2011).

Figura 1 - Topologia Estrela de uma rede OCDMA



Fonte: Adaptado de Yin e Richardson (2009).

Na topologia mostrada na Figura 1 dos Santos, Durand e Abrão (2015) afirmam que os nós transmissores e receptores criam um caminho virtual baseado no código e o comprimento total do *link* é dado por:

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

sendo d_i^{tx} o comprimento do *link* do i -ésimo nó transmissor até o acoplador estrela e d_j^{rx} o comprimento do *link* do acoplador até o j -ésimo nó receptor.

Considerando essa distribuição dos nós, a potência recebida pelo j -ésimo nó é dada por:

$$P_{rj} = \alpha_{estrela} p_i e^{\alpha_f d_{ij}} \quad (2)$$

sendo p_i a potência transmitida pelo i -ésimo nó transmissor, α_f a atenuação da fibra (em km^{-1}), e $\alpha_{estrela}$ a atenuação do acoplador estrela que é dada por:

$$\alpha_{estrela} = 10\log(K) - [10\log_2(K)\log_{10}(\delta)] \quad [dB] \quad (3)$$

na qual δ é a taxa de excesso de perda e K é o número de nós da rede. Em trabalhos como dos Santos, Durand e Abrão (2015) e Tarhuni et al. (2006) a unidade de (3) é dada em decibéis. Além disso, por características de viabilidade, o equipamento

considerado para a rede pode ser fabricado utilizando plataformas com tecnologias disponíveis de baixo custo, robustas e leves.

2.1.2 Funcionamento

Em uma estrutura de rede como a mostrada na Figura 1 os nós transmissores e receptores (T_x e R_x , respectivamente) são conectados por um acoplador estrela passivo $K \times K$, onde K é o número de nós da rede. A informação de cada usuário é convertida do domínio elétrico para o óptico através de um *laser* e então passa por um codificador OCDMA (TARHUNI et al., 2006).

O acesso à rede é realizado através de operações de codificação e decodificação em domínio totalmente óptico, sendo que um codificador OCDMA manipula os pulsos ópticos para formar códigos de acordo com um algoritmo pré-estabelecido. Nos receptores (R_x) há um decodificador que consiste em um correlator óptico que possui uma réplica do código de origem (filtro casado). (DOS SANTOS FILHO, 2006).

Para a transmissão de informações cada *bit* "1" é transmitido por um usuário na forma do código que o representa e cada *bit* "0" é caracterizado por ausência de transmissão (RAVI KUMAR; PATHAK; CHAKRABARTI, 2009). Sinais dos diferentes transmissores são acoplados e cada decodificador recebe a soma de todos os sinais transmitidos, porém somente o receptor que contém o decodificador com o mesmo código do transmissor é capaz de interpretar a informação. Decodificar um sinal transmitido representa uma autocorrelação lógica de um mesmo código. Por outro lado, essa operação representa uma correlação cruzada entre códigos diferentes (FOULI; MAIER, 2007). A presença de um pulso de autocorrelação com potência maior que a potência dos demais sinais interferentes em um nível pré-estabelecido indica a recepção da informação transmitida por um determinado usuário (DOS SANTOS FILHO, 2006).

O projeto dos códigos utilizados em redes OCDMA visa a criação de códigos com alto nível de autocorrelação e baixo nível de correlação cruzada, por exemplo os códigos ópticos ortogonais (OOC – *Optical Orthogonal Codes*) (CHUNG; SALEHI; WEI, 1989). A utilização de um OOC que atenda os pré-requisitos de autocorrelação e correlação cruzada garante um ganho de desempenho da rede em termos da redução da MAI e consequente melhoria da Taxa de Erro de *Bit* (BER – *Bit*

Error Rate) (FOULI; MAIER, 2007). Existem na literatura diversas abordagens para construção de códigos, sendo estes divididos em 1-D, 2-D e 3-D, conforme mostrado na seção a seguir.

2.2 TIPOS DE CÓDIGOS

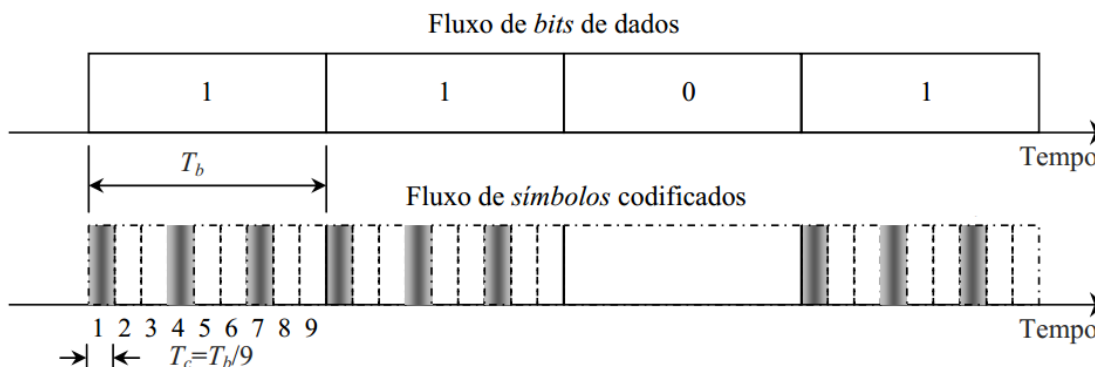
Nas redes OCDMA cada usuário é identificado por um código único e vários códigos de usuários dividem um mesmo canal da fibra óptica, sendo que o tipo de código define como a informação será tratada no codificador/decodificador da rede. Nos primeiros estudos dessa tecnologia a distribuição utilizada era 1-D, na qual os *bits* eram distribuídos somente no domínio do tempo, o que trazia severas limitações e dificuldades para a transmissão de dados (RAVI KUMAR; PATHAK; CHAKRABARTI, 2009). Com a evolução nos estudos dos códigos foi possível chegar a códigos 2-D e 3-D dependendo dos domínios nos quais estes códigos são distribuídos sobre a rede.

2.2.1 Códigos 1-D

Segundo Dos Santos Filho (2006) a codificação unidimensional pode ser feita no domínio do tempo, da frequência ou do espaço, sendo a mais comum a codificação temporal. Nesse tipo de codificação um *bit* corresponde a um pulso retangular com duração T_b que ao passar pelo processo de codificação será dividido em N_T subintervalos T_c (*chips* de tempo), sendo N_T chamado de comprimento do código. Na Figura 2 pode ser observada a transmissão de 4 *bits* com codificação temporal.

Na Figura 2 o número de *chips* de tempo destacados é determinado pelos diferentes algoritmos de formação do código (como os mostrados em Yin e Richardson (2009)), sendo chamado de ponderação ou peso de código ω . Para a codificação ilustrada, tem-se $N_T = 9$ e $\omega = 3$, já que cada T_b é dividido em 9 *chips* de tempo e 3 desses *chips* estão destacados. A utilização dessa codificação traz a necessidade de um aumento na largura de faixa necessária para a transmissão de uma informação, tendo em vista que sem codificação há um pulso com período T_b e com a codificação há uma sequência de pulsos com período menor T_c (DOS SANTOS FILHO, 2006).

Figura 2 - Fluxo de *bits* em codificação 1-D



Fonte: Adaptado de Dos Santos Filho (2006).

Em uma rede OCDMA 1-D, Yin e Richardson (2009) afirmam que o número de códigos disponíveis (cardinalidade) é limitado pelo comprimento e pelo peso do código. Esse fato causa uma diminuição no número de usuários que podem acessar a rede de maneira simultânea já que, de maneira geral, a cardinalidade é proporcional ao comprimento do código e inversamente proporcional ao quadrado de ω . O cálculo exato da máxima cardinalidade de um código depende das características de formação desse código (YIN; RICHARDSON, 2009).

Para proporcionar um número maior de acessos simultâneos à rede e garantir um nível tolerável para a BER, deve-se aumentar a cardinalidade, sendo que isso é feito através da implementação de códigos que exploram mais dimensões, como os 2-D e os 3-D, conforme mostrado nas seções a seguir.

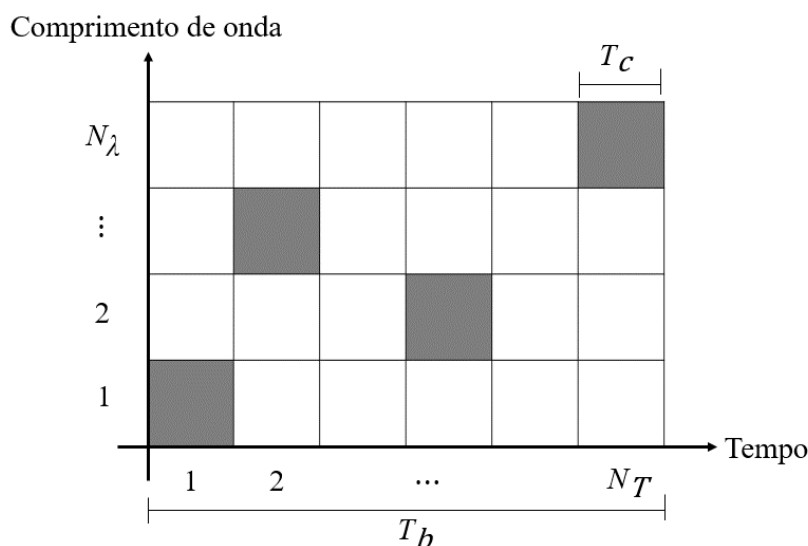
2.2.2 Códigos 2-D

Na codificação bidimensional os códigos podem ser construídos em diferentes combinações dos domínios tempo, comprimento de onda e espaço. Uma das mais utilizadas é aquela na qual os códigos são transmitidos em comprimentos de onda e no tempo, sendo os códigos chamados de 2-D WH/TS (*2-D Wavelength-Hopping/Time-Spreading*), já que essa combinação proporciona maior flexibilidade na escolha dos códigos ópticos aumentando a capacidade do sistema (DOS SANTOS FILHO, 2006).

A estrutura de uma codificação bidimensional pode ser vista na Figura 3, na qual pode-se perceber que os códigos OCDMA 2-D são representados por

matrizes de dimensão $N_\lambda \times N_T$, nas quais o número de linhas é dado por N_λ que simboliza o número de comprimentos de onda disponíveis para transmissão dos códigos e o número de colunas é N_T (DOS SANTOS, 2015).

Figura 3 - Representação de um código óptico OCDMA 2-D.



Fonte: Adaptado de dos Santos (2015).

Segundo Yin e Richardson (2009) e Santos Filho (2006), um código 2-D pode ser representado por $(N_\lambda \times N_T, \omega, I_a, I_c)$, sendo um conjunto de matrizes binárias $N_\lambda \times N_T$, com peso de código ω , restrição de auto correlação I_a (pico de autocorrelação fora de fase, correspondente aos lóbulos laterais) e restrição de correlação cruzada I_c (pico de correlação cruzada), sendo I_a e I_c constantes inteiras não negativas.

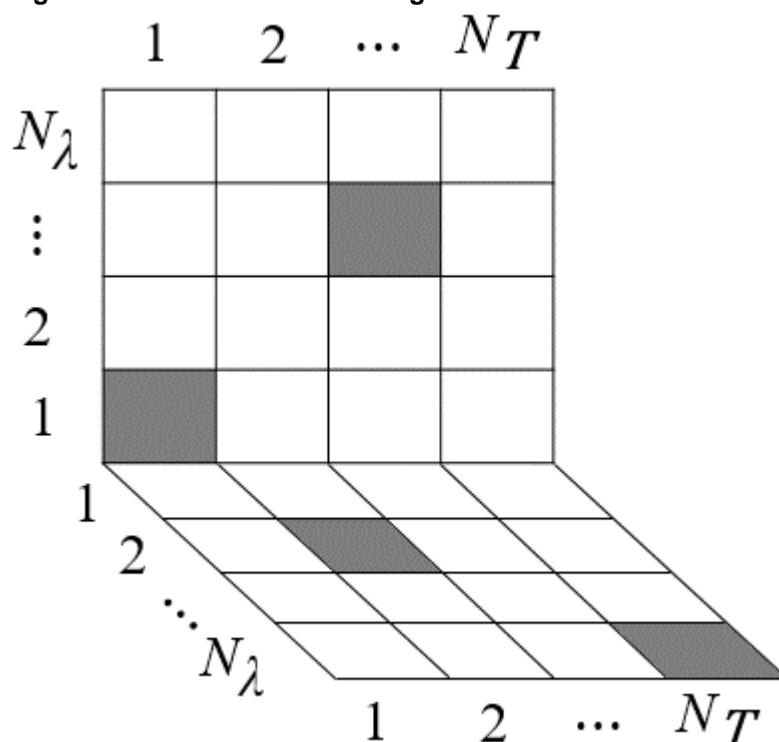
A utilização de códigos 2-D, quando comparada ao uso dos 1-D, proporcionam não somente a melhoria da rede em termos do número de usuários que podem utilizar o canal de fibra simultaneamente, mas também tornam mais fácil o controle e gerenciamento da rede. Isso acarreta uma redução do tempo de processamento e diminui a complexidade e o custo da implementação do *hardware* necessário (YIN; RICHARDSON, 2009).

2.2.3 Códigos 3-D

Na distribuição tridimensional os códigos são espalhados sobre três diferentes domínios. Esse espalhamento leva a um aumento na cardinalidade e uma

redução na MAI na comparação com códigos 1-D ou 2-D, já que têm-se mais graus de liberdade para a formação do código, aumentando assim o número de usuários que acessam a rede com uma mesma BER (RAVI KUMAR; PATHAK; CHAKRABARTI, 2009). A estrutura de um código 3-D com codificação em polarização/tempo/comprimento de onda pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura de um código tridimensional



Fonte: Adaptado de McGeehan et al. (2004).

Na estrutura vista na Figura 4 considera-se um conjunto de matrizes tridimensionais $(N_S \times N_\lambda \times N_T, \omega, I_a, I_c)$ onde N_S é o número de polarizações ortogonais entre si, que no caso da Figura 4 é igual a 2. Na rede OCDMA que utiliza essa configuração de código, a cada par transmissor-receptor é atribuído um código 3-D. O transmissor codifica a informação a ser enviada com o código do usuário e transmite para cada um dos receptores através do acoplador estrela presente na rede, sendo que somente o receptor cujo decodificador possui o mesmo código do transmissor recebe a informação de maneira correta (YEH; LIN; WU, 2009; YEN; CHEN, 2015).

Diversos trabalhos propõem diferentes tipos de códigos tridimensionais, como por exemplo Kim, Yu e Park (2000) que propõem um algoritmo para codificação

no espaço-tempo-comprimento de onda utilizando um único pulso por plano (SPP - *Single Pulse per Plain*) e múltiplos pulsos por plano (MPP - *Multiple Pulses per Plain*), sendo que os MPP apresentam vantagens em termos de peso de código e de BER quando comparados aos SPP. É realizada a comparação com códigos bidimensionais e pode ser observado um aumento significativo no desempenho da rede em relação aos códigos 2-D.

Ravi Kumar, Pathak e Chakrabarti (2009) também propõem um algoritmo para codificação no espaço-tempo-comprimento de onda. Nesse trabalho, após simulações computacionais e análise de desempenho foi possível observar uma BER satisfatória quando comparada a outras análises como a de Kim, Yu e Park (2000).

Yeh, Lin e Wu (2009), por sua vez, propõem códigos 3-D de diferença perfeita (3-D PD – *3-D Perfect Difference*) do tipo espectro-tempo-espaço. Após a modelagem matemática do código proposto e simulação computacional do modelo considerando uma estrutura de rede pré-determinada foi possível observar que o modelo proposto é robusto à MAI, tem melhor desempenho e maior cardinalidade que os sistemas utilizando códigos 2-D.

Pode-se perceber com a análise da literatura que a utilização de códigos bidimensionais ou tridimensionais aumenta o desempenho da rede, em contrapartida aumenta também sua complexidade. Esse aumento de complexidade traz também uma maior preocupação com efeitos adversos como a variação da temperatura ambiente, conforme será discutido na próxima subseção.

2.3 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE EM REDES OCDMA

Na literatura, os estudos relacionados aos efeitos da variação da temperatura ambiente nas redes OCDMA se resumem às redes OCDMA 2-D. Nessas redes esse efeito é difícil de determinar de maneira precisa e compensar devido às suas flutuações e dinâmica natural. Vale salientar que esse efeito ocorre devido ao fato de os cabos da rede estarem enterrados a uma profundidade de 60 a 120 cm, estando assim sujeitos à variações de temperatura de $\pm 20^{\circ}$ C (GHOSH; ENDO; IWASAKI, 1994).

Nesse trabalho serão consideradas somente as fibras ópticas enterradas. Porém é válido ressaltar que os efeitos da variação da temperatura ambiente também podem ser observados em fibras instaladas em meio aéreo.

Osadola et al. (2013a) afirmam que a variação da temperatura ambiente causa uma diminuição no pico de autocorrelação dos códigos, o que diminui o desempenho da rede. A causa dessa diminuição é o chamado efeito de distorção temporal, que distorce o sinal de autocorrelação em altura, forma e comprimento e tem como principais variáveis a magnitude da mudança de temperatura (ΔT) e o comprimento do *link* (d_{ij}).

A distorção temporal ocasionada pela variação da temperatura ambiente é dada por:

$$\Delta t = D_{temp} \Delta T \Delta \Lambda d_{ij} \quad [ps] \quad (4)$$

onde D_{temp} (ps/nm.km/°C) é o coeficiente termal da fibra, ΔT (°C) é a variação média na temperatura da fibra, $\Delta \Lambda$ (nm) é o espaçamento espectral entre pulsos de comprimento de onda dos códigos, e d_{ij} é o comprimento do ij -ésimo *link* em km.

Osadola et al. (2013a) também define o encolhimento da largura de pulso para cada comprimento de onda como:

$$\Delta \tau = D_{temp} \Delta T \Delta \lambda d_{ij} \quad [ps] \quad (5)$$

onde $\Delta \lambda$ (nm) é a espessura da linha espectral de cada pulso de comprimento de onda que contém o código.

Com (4) e (5) é possível determinar o efeito da variação na temperatura ambiente sobre a envoltória (S_t) da função de autocorrelação assumindo cada pulso de comprimento de onda com uma forma Gaussiana. Esse efeito é dado por:

$$S_t = \sum_{k=0}^{\omega-1} P_p \exp \left\{ -2,77 \left[\frac{t - k\Delta t}{\tau - \Delta \tau} \right]^2 \right\} \quad [W] \quad (6)$$

onde P_p é uma constante que representa a potência de pico da forma Gaussiana da envoltória e τ é a largura do *chip*.

Por fim, a penalidade devido à variação de temperatura ambiente é definida por:

$$P_{\Delta T} = 10 \log_{10} \left(\frac{S_t}{\omega} \right) \quad [dB] \quad (7)$$

onde a divisão por ω ocorre devido ao fato de o pico do sinal de autocorrelação para códigos 2-D e 3-D ser ω para um caso ideal (DOS SANTOS FILHO, 2006; OSADOLA et al., 2013a).

Uma das maneiras de atenuar os efeitos negativos dos diversos fatores que afetam a qualidade das redes OCDMA (incluindo a variação da temperatura ambiente) é o chamado controle de potência, conforme será discutido na próxima subseção.

2.4 CONTROLE DE POTÊNCIA EM REDES OCDMA

O controle de potência aparece como um grande desafio quando se trata de redes OCDMA. Isso ocorre porque em redes reais a potência do sinal recebido é significativamente diferente para os vários nós da rede, sendo que os nós mais próximos ao acoplador estrela tem um desempenho muito maior quando comparado aos nós mais distantes.

Para atenuar esse efeito, uma das abordagens passíveis de utilização é o projeto da rede considerando que os nós transmissores e receptores estão a uma mesma distância do acoplador, porém essa abordagem foge das características das redes reais, sendo necessário, portanto, um controle de potência que possa ser realizado de maneira a atenuar dinamicamente as perdas causadas pelo efeito *near-far* dependendo do número de nós transmissores ativos na rede. Esse controle de potência é feito pela otimização da SNIR e melhora o desempenho da rede, podendo inclusive ser utilizado para atenuar os efeitos da variação da temperatura ambiente (DOS SANTOS; DURAND; ABRÃO, 2015; TARHUNI et al., 2006).

A otimização da SNIR consiste no controle da potência de maneira a assegurar que um sinal óptico transmitido será detectado por todos os receptores. Sendo assim, o controle de potência em redes OCDMA aparece como um problema de otimização (DOS SANTOS, 2015).

2.4.1 Formulação do problema

Segundo dos Santos, Durand e Abrão (2015) e Tarhuni et al. (2006), de maneira a atingir uma determinada QoS que está diretamente relacionada com a BER tolerável em cada nó óptico, deve-se definir uma relação portadora-interferência mais ruído (CINR – *Carrier-to-Interference plus Noise Ratio*) requerida na entrada do decodificador. A CINR é definida por:

$$\Gamma_i = \frac{p_i G_{ii} G_{amp}}{G_{amp} \sum_{j=1, j \neq i}^K p_j G_{ij} + 2\sigma^2} \geq \Gamma^* \quad (8)$$

onde p_i é a potência transmitida pelo i -ésimo nó, σ^2 é a potência do ruído na recepção, Γ^* simboliza a CINR alvo para que a QoS desejada seja atendida e os elementos G_{ij} representam as perdas devido às conexões entre os pares transmissor-receptor que, já considerando os efeitos da variação de temperatura, são dadas por:

$$G_{ij} = \alpha_{estrela} \exp(-\alpha_f d_{ij}) L_C G_{amp} P_{\Delta T i} \quad (9)$$

onde L_C são as perdas do codificador e do decodificador somadas.

Vale notar que o termo σ^2 em (8) representa vários tipos de ruído como balístico, térmico e o do pré-amplificador óptico, porém nenhum desses ruídos tem um efeito maior sobre a CINR do que a emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) do pré-amplificador quando combinada com a MAI. Sendo assim, a potência do ruído recebido é dada por:

$$\sigma^2 = 2n_{sp} h f (G_{amp} - 1) B_0 \quad (10)$$

onde n_{sp} é o fator de emissão espontânea (tipicamente entre 2 e 5), h é a constante de Planck, f a frequência da portadora, G_{amp} o ganho do amplificador e B_0 a largura de banda óptica, sendo que para reduzir os efeitos do ruído ASE B_0 deve ser no mínimo $2R$ onde R é a taxa de *bit*.

A SNIR é relacionada com a CINR em termos de N_T e da variância do código ρ^2 , ou seja:

$$\gamma_i = \left(\frac{N_T}{\rho} \right)^2 \Gamma_i \quad (11)$$

onde ρ^2 para códigos 2-D é dada por (DURAND et al., 2010):

$$\rho_{2-D}^2 = \frac{\omega}{2N_T} \left(1 - \frac{\omega}{2N_T} \right) \quad (12)$$

na qual o termo $\omega/(2N_T)$ é chamado probabilidade de *hit* e define a probabilidade de um *bit* ser detectado incorretamente. Para códigos 3-D a probabilidade de *hit* é dada por $N_S/(2N_T\omega)$ (LI; FAN; SHUM, 2012), então a variância para códigos 3-D pode ser definida por:

$$\rho_{3-D}^2 = \frac{N_S}{2N_T\omega} \left(1 - \frac{N_S}{2N_T\omega} \right) \quad (13)$$

Definindo o vetor coluna de potências transmitidas como sendo $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]^T$, o problema de controle de potência em redes ópticas é localizar o vetor \mathbf{p} que minimize a função custo $J(\mathbf{p})$, podendo ser representado como:

$$\min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} J(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} \mathbf{1}^T \mathbf{p} = \min_{p_i \in \mathbb{R}_+} \sum_{i=1}^K p_i \quad (14)$$

Sujeito à:

$$\Gamma_i \geq \Gamma^*, \quad P_{\min} \leq p_i \leq P_{\max} \quad (15)$$

onde $\mathbf{1}^T = [1, \dots, 1]$.

Utilizando notações matriciais, pode-se reescrever (8) como $[\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}] \mathbf{p} \geq \mathbf{u}$ onde \mathbf{I} é a matriz identidade e \mathbf{H} é a matriz de interferência normalizada, cujos elementos são dados por:

$$H_{ij} = \begin{cases} G_{ij}/G_{ii} & , i \neq j \\ 0 & , c.c. \end{cases} \quad (16)$$

assim, pode-se obter uma versão normalizada da potência do ruído mais interferência:

$$u_i = \frac{\Gamma^* \sigma^2}{G_{ii}} \quad (17)$$

Substituindo a desigualdade por uma igualdade é possível determinar o vetor potência otimizado:

$$\mathbf{p}^* = [\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{u} \quad (18)$$

A inversão matricial presente em (18) equivale a existência de um nó de controle de potência centralizado. Esse nó fornece todas as informações sobre a arquitetura da rede física, como a distância física entre os nós da rede e a dinâmica do tráfego de pacotes. Essas características são as desvantagens do controle centralizado (TARHUNI et al., 2006).

2.4.2 Alternativa para o controle de potência

A fim de eliminar a necessidade da utilização de uma inversão matricial para o controle de potência, Durand e Abrão (2013) propuseram a utilização de uma função custo de maximização como alternativa para a otimização da alocação de recursos em redes OCDMA:

$$J(p) = \max \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(1 - \frac{p^k}{P_{\max}} \right) F_k^{\lim} \quad (19)$$

Sujeito à:

$$\gamma_k \geq \gamma_k^*, \quad 0 < p_k^l \leq P_{\max}, \quad R^l = R_{\min}^l \quad \forall k \in K_l \text{ e } \forall l = 1, 2, \dots, L \quad (20)$$

onde L é a quantidade de diferentes grupos de taxa de informações que o sistema permite e K_l é o número de usuários no l -ésimo grupo com taxa mínima R_{\min}^l . A função limiar F_k^{\lim} é definida por:

$$F_k^{\text{lim}} = \begin{cases} 1, & \gamma_i \geq \gamma^* \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases} \quad (21)$$

nessa função γ_i é a SNIR para o k -ésimo usuário, calculada com (11).

Por fim, vale salientar que o termo $1 - (p_k / P_{\max})$ em (19) favorece as soluções com menor nível de potência, punindo usuários com níveis mais altos de energia.

Na próxima seção serão tratados alguns conceitos relacionados aos problemas de otimização. Serão colocados alguns métodos de resolução desses problemas com ênfase no algoritmo do exame de vaga-lumes, foco do presente trabalho.

3 OTIMIZAÇÃO

Otimização, segundo Rao (2009), é o ato de obter os melhores resultados dadas determinadas circunstâncias. Em processos relacionados à engenharia são necessárias tomadas de decisão a fim de minimizar o esforço requerido e/ou maximizar o lucro de determinado processo quando esse processo trabalha com uma quantidade pré-determinada de recursos.

Os processos de otimização são primordiais na maior parte das aplicações em engenharia, economia e indústria. Isso se deve ao fato de que mesmo atuando com recursos limitados, sempre se busca maximização do lucro, desempenho e eficiência ou minimização de custos e do consumo de energia em determinado processo (YANG, 2014).

Dado que na prática os processos de uma maneira geral podem ter o esforço requerido ou o lucro esperado descritos como uma função matemática, otimização é o processo de determinar as condições que dão o valor máximo ou mínimo dessa função (RAO, 2009). Matematicamente uma função de otimização pode ser descrita genericamente como (YANG, 2014):

$$\underset{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d}{\text{Min}} f_a(\mathbf{x}), \quad (a = 1, 2, \dots, A) \quad (22)$$

Sujeito à:

$$h_b(\mathbf{x}) = 0, \quad (b = 1, 2, \dots, B), \quad (23)$$

e

$$g_c(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (c = 1, 2, \dots, C), \quad (24)$$

Em (22), (23) e (24), $f_a(\mathbf{x})$, $h_b(\mathbf{x})$ e $g_c(\mathbf{x})$ são funções do seguinte vetor:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T \quad (25)$$

no qual os componentes de \mathbf{x} são chamados “variáveis de decisão” e podem ser reais contínuas, discretas ou uma combinação dessas duas (YANG, 2014).

Em (22) está representada uma “função objetivo” ou “função custo”, sendo que o valor de A determina se a otimização será mono-objetivo ($A = 1$) ou multiobjetivo

($A > 1$). O espaço compartilhado pelas variáveis de decisão é chamado de “espaço de busca” (no caso \mathfrak{R}^d) e o espaço formado pelos valores da função objetivo é chamado “espaço de solução”.

Em (23) e (24) a igualdade e a desigualdade mostradas representam “restrições de igualdade” e “restrições de desigualdade”, respectivamente, que na prática estão relacionadas aos limites que determinada aplicação possui. No caso, se $B=C=0$, diz-se que o problema é de otimização irrestrita, caso contrário diz-se que é de otimização restrita.

No caso de (22), (23) e (24) serem funções lineares, diz-se que o problema é de “programação linear”. Caso pelo menos uma dessas funções seja não-linear, o problema é tratado como sendo de “programação não-linear”. Análise similar pode ser feita para a convexidade. Caso a função objetivo e as restrições sejam funções convexas, o problema é dito convexo, caso contrário é dito não-convexo.

O problema de otimização da potência transmitida por usuário em redes OCDMA é não-convexo. Isso faz com que a complexidade da função aumente conforme a dimensão do vetor de potências aumenta (baseado no número de usuários da rede).

3.1 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Existe na literatura uma grande variedade de métodos para a solução de problemas de otimização, sendo que a escolha de um determinado método está associada às características do problema em questão. Rao (2009) cita alguns casos:

- Para problemas de otimização irrestrita com diversas variáveis de decisão pode-se aplicar métodos clássicos de cálculo diferencial;
- Problemas com restrições de igualdade podem ser resolvidos pelo método dos multiplicadores de Lagrange;
- Problemas com restrições de desigualdade podem ter o ponto ótimo localizado pelas condições de Kuhn-Tucker.

Esses e outros métodos capazes de resolver problemas envolvendo funções contínuas e diferenciáveis são chamados de métodos clássicos de otimização.

Rao (2009) afirma que no caso de o problema ser de programação linear o método mais eficiente e abordado na literatura é o chamado método *simplex*, porém esse método possui um alto custo computacional e por isso outras alternativas foram desenvolvidas como o *simplex* revisado e o método de Karmakar. O mesmo autor ressalta que para problemas de programação não-linear, por sua vez, se aplicam técnicas como os métodos de eliminação, de interpolação, de busca direta e indireta, programação geométrica, entre outros.

A maior parte dos métodos clássicos e convencionais para a resolução de problemas de otimização é classificado como “determinístico”, ou seja, todas as vezes que esse método for executado irá obter os mesmos valores até localizar o ponto ótimo (desde que executado a partir do mesmo ponto inicial). Porém há também os métodos chamados “estocásticos” que tem como principal característica a aleatoriedade dos caminhos percorridos até que o valor ótimo seja obtido. Isso ocorre devido a utilização de valores pseudoaleatórios durante a execução do algoritmo que implementa o método (YANG, 2014).

Dentre os métodos estocásticos cabe destaque para as meta-heurísticas. Essa abordagem tem como principal característica a localização de um resultado ótimo através de tentativa e erro, porém dentro de um espaço de busca limitado pelas restrições do problema de otimização. Essa característica tem como base a aleatoriedade inerente dos métodos estocásticos e faz com que o algoritmo localize de maneira rápida uma solução que satisfaça a função objetivo (ótimo global), mesmo que muitas vezes essa solução não seja a solução ótima do problema (ótimo local).

As meta-heurísticas vêm sendo muito estudadas na literatura atual como forma de obtenção de resultados satisfatórios com um baixo custo computacional e podem ser classificadas como baseadas em trajetória ou em população.

Meta-heurísticas baseadas em trajetória consistem em um único indivíduo que se move por partes no espaço de busca. Quando um movimento desse indivíduo oferece uma solução melhor que a anterior esse movimento é aceito, quando não oferece uma solução melhor é aceito com uma determinada probabilidade. Esses movimentos formam uma trajetória no espaço de busca que tem probabilidade não nula de atingir o valor ótimo da função (YANG, 2014).

As meta-heurísticas baseadas em população tem como principal característica a utilização de um conjunto de indivíduos que, partindo de um ponto inicial qualquer, percorrem o espaço de busca e conforme se aproximam do ponto ótimo da função atraem para si os outros indivíduos que estão mais distantes desse ponto. Ao fim da execução do algoritmo todos os indivíduos da população se encontram no mesmo local do espaço de busca que representa o ponto com o valor ótimo da função (YANG, 2014). Na próxima seção serão abordadas as principais características e alguns exemplos de algoritmos de otimização que se baseiam em populações.

3.2 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO BASEADOS EM POPULAÇÕES

Os algoritmos baseados em populações têm como princípio básico a ideia de que muitas tarefas podem ser resolvidas de maneira mais eficiente se forem realizadas por vários agentes simples ao invés de um único agente complexo. Além da eficiência, a utilização de uma população de agentes simples torna a tarefa mais adaptativa, permite uma maior escalabilidade, além de uma maior robustez pela introdução de redundância. (NEDJA; MOURELLE, 2006).

Para os problemas de otimização uma das classes mais utilizadas de algoritmos baseados em populações são os chamados “algoritmos bio-inspirados”. Essas meta-heurísticas têm esse nome por implementar computacionalmente o comportamento de grupos encontrados na natureza, tais como insetos, pássaros, peixes, entre outros aproveitando assim a inteligência coletiva desses grupos (YANG; CHIEN; TING, 2015).

Alguns algoritmos de otimização bio-inspirados são:

- Otimização por Colônia de Formigas: o ACO, proposto por Dorigo e Stützle (2004), se baseia na movimentação das formigas em busca de comida;
- Algoritmo dos morcegos (BA – *Bat Algorithm*): proposto em Yang (2011) é baseado no comportamento de ecolocalização dos morcegos;
- Otimização por Enxame de Partículas: o PSO foi originalmente proposto por Kennedy e Eberhart (1995) e se baseia no comportamento de enxames como cardumes de peixes ou bando de pássaros na natureza.

3.2.1 Aplicações

Diversas aplicações constam na literatura em diferentes áreas do conhecimento para os algoritmos baseados em populações. Esta seção abordará de maneira breve algumas publicações que tratam da utilização desses algoritmos dando ênfase a aplicações na área de telecomunicações, foco desse trabalho.

Nedja e Mourelle (2006) mostram em sua publicação a aplicação de algoritmos como ACO e PSO em agendamento de tarefas em redes computacionais e mineração de dados, além de aplicações em problemas matemáticos conhecidos como o Problema do Caixeiro Viajante (TSP – *Travelling Salesman Problem*). Esses autores também mostram aplicações desses métodos combinados com outras abordagens como Lógica *Fuzzy*.

Abrão et al. (2011) mostram a aplicação do PSO para detecção multiusuário e alocação de recursos em redes DS/CDMA (*Direct Sequence/Code Division Multiple Access*). Os autores mostram a sintonia dos parâmetros do algoritmo (em especial os coeficientes de aceleração) a fim de otimizar o algoritmo. Os resultados obtidos mostram que esse algoritmo é muito eficiente quando aplicado a configuração utilizada de redes sem-fio.

No livro de Yang, Chien e Ting (2015), são abordadas utilizações do ACO e algumas de suas variações em roteamento e definição de caminhos em redes ópticas. Também são mostradas aplicações do PSO na redução do consumo de energia em redes celulares LTE (*Long-Term Evolution*) e de uma de suas variações na busca pelo melhor lugar de aplicação dos sensores em uma Rede de Sensores Sem Fio (WSN – *Wireless Sensor Network*).

O trabalho de De Paula Marques, Durand e Abrão (2014), utiliza o ACO com parâmetros de entrada otimizados para realizar de maneira eficiente a alocação da potência transmitida e melhorar a eficiência energética em redes híbridas WDM/OCDM (*Wavelength-Division Multiplexing/Optical Code-Division Multiplexing*). Os resultados obtidos foram comparados com uma abordagem de otimização convexa e mostraram que a utilização do algoritmo é eficiente para a aplicação em questão. Para uma rede do mesmo tipo, Durand e Abrão (2013) mostram a utilização do PSO para alocação de potência de maneira eficiente energeticamente. Os autores também realizam a sintonia de parâmetros para a aplicação considerada e mostram os efeitos dessa sintonia na convergência do algoritmo.

O PSO também é utilizado por Elkamchouchi, Elragal e Makar (2007) para controle de potência em sistemas CDMA. O trabalho mostra resultados satisfatórios para a configuração de rede escolhida quando realizada a comparação com GA.

Dos Santos, Durand e Abrão (2015) utilizam um controle de potência com PSO para atenuar de maneira dinâmica os efeitos da variação de temperatura em redes OCDMA. O trabalho realiza a comparação entre o PSO e o ACO para a mesma aplicação e mostra que apesar dos dois algoritmos atingirem o objetivo, há uma convergência mais rápida do PSO com o custo de um comportamento de convergência não monotônico oscilatório, comportamento esse que não ocorre com a utilização do ACO.

De uma maneira geral é possível observar que a utilização de algoritmos baseados em enxames é uma abordagem eficiente para a utilização nas mais diferentes aplicações relacionadas a redes nas mais diversas configurações. Uma análise dos trabalhos supracitados mostra que para uma mesma aplicação é possível a utilização de mais de um tipo de algoritmo, o que aumenta de maneira significativa as possibilidades de aplicação dos métodos baseados em enxames. Vale também ressaltar que a maior parte dos trabalhos realiza a otimização dos parâmetros de entrada dos algoritmos, o que mostra que esse é um ajuste importante a ser feito quando se visa um aumento na eficiência e uma diminuição do custo computacional do algoritmo utilizado.

Na próxima subseção será abordado com mais detalhes o algoritmo do enxame de vaga-lumes, foco desse trabalho.

3.3 ALGORITMO DO ENXAME DE VAGA-LUMES

O algoritmo do enxame de vaga-lumes (FA – *Firefly Algorithm*) foi originalmente proposto em Yang (2008) e Yang (2009). Esse algoritmo tem como base o comportamento dos vaga-lumes que, através de um processo de bioluminescência, emitem luz como uma forma de comunicação e para atrair presas. Existem cerca de 2000 espécies conhecidas de vaga-lumes e cada uma tem um padrão próprio na emissão de luz.

É sabido que a intensidade I da luz emitida por um vaga-lume diminui conforme a distância r aumenta de acordo com:

$$I \propto \frac{1}{r^2} \quad (26)$$

Essa diminuição da intensidade ocorre devido ao fato da luz ser absorvida pelo ar e limita a visibilidade dos vaga-lumes a uma determinada distância, a qual pode chegar a centenas de metros no período da noite, o que é suficiente para que os vaga-lumes possam se comunicar.

O FA tem como princípio a associação do movimento dos vaga-lumes guiados pela emissão de luz com uma função objetivo a ser otimizada, o que torna possível a determinação do ponto ótimo dessa função. Para isso, as ideias nas quais se baseiam o FA são as seguintes (YANG; CHIEN; TING, 2015):

- Os vaga-lumes não possuem distinção de gênero, sendo assim um vaga-lume atrai outro independente de seu sexo;
- A atratividade de um vaga-lume é proporcional ao brilho da luz que ele emite, então caso um vaga-lume brilhe mais que outro, o menos brilhante se move na direção do mais brilhante. Caso os dois brilhem igualmente o movimento ocorre de maneira randômica.
- O brilho de um vaga-lume é ligado diretamente à função objetivo a ser explorada.

3.3.1 Algoritmo Padrão

Com base nas ideias mostradas na seção anterior, o algoritmo padrão do FA pode ser descrito de acordo com o pseudocódigo mostrado a seguir. Nesse pseudocódigo primeiramente define-se a função objetivo a ser otimizada, depois é feita a associação dessa função com o brilho dos vaga-lumes. O próximo passo é a comparação da intensidade do brilho dos vaga-lumes, já que quanto maior o brilho mais próximo de uma solução para o problema o algoritmo se encontra. Baseado no brilho, movimentam-se os vaga-lumes menos brilhantes em direção ao mais brilhante até que ao final de um número pré-determinado de iterações todos os vaga-lumes estejam no mesmo ponto, que representa a solução para o problema (máximo global) (YANG, 2008):

Algoritmo do Enxame de Vaga-Lumes - Padrão

Função objetivo $f(\mathbf{x})$, $f(\mathbf{x})=(x_1, \dots, x_d)^T$

Gerar População inicial de vaga-lumes x_i ($i=1,2,\dots,n$)

Intensidade da luz I_i em x_i é determinada por $f(x_i)$

Definir coeficiente de absorção da luz γ

Enquanto ($t < \text{num_Iterações}$)

Para $i = 1:n$ para todos os n vaga-lumes

Para $j = 1:n$ para todos os n vaga-lumes

Se ($I_i < I_j$), Mover vaga-lume i em direção ao j , **Fim Se**

 Variar a atratividade com a distância r via $e^{-\gamma r}$

 Avaliar novas soluções e atualizar a intensidade da luz

Fim Para

Fim Para

 Ordenar os vaga-lumes e localizar o máximo global atual g^*

Fim Enquanto

Processar e visualizar os resultados.

3.3.2 Variáveis de controle do algoritmo

Com a utilização das meta-heurísticas bio-inspiradas surge a necessidade de otimizar os algoritmos a fim de ser possível obter melhores resultados para determinadas aplicações. Nessa seção serão abordadas as principais variáveis de entrada que podem ser otimizadas quando se trata do FA.

3.3.2.1 Atratividade e intensidade da luz

Yang (2014) afirma que, por simplicidade, a atratividade de um vaga-lume é determinada pelo seu brilho (ou seja, pela intensidade da luz que emite), que por sua vez está associado com a função objetivo. Entretanto, a atratividade é um conceito relativo já que depende do ponto de vista do observador ou dos outros vagalumes. Sendo assim, a atratividade de um vaga-lume i em relação a um vaga-lume j depende da distância r_{ij} entre esses dois vaga-lumes. Então, considerando (26), pode-se escrever a intensidade da luz $I(r)$ de um vaga-lume como sendo:

$$I(r) = \frac{I_f}{r^2} \quad (27)$$

onde I_f é a intensidade da luz na fonte.

Outro fator que influencia diretamente na intensidade da luz é o coeficiente de absorção do meio γ . Levando em conta essa variável, a intensidade da luz é determinada por:

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (28)$$

onde I_0 é a intensidade da luz em $r = 0$.

Para evitar singularidade em (27) quando $r = 0$, pode-se considerar os efeitos do coeficiente de absorção como em (28) para definir a seguinte forma Gaussiana para a intensidade da luz:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (29)$$

Considerando (29) e sabendo que a atratividade é proporcional à intensidade da luz vista pelos vaga-lumes que estão próximos, pode-se definir a atratividade β como sendo:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (30)$$

onde β_0 é a atratividade em $r = 0$.

Considerando dois vagalumes i e j localizados nos pontos x_i e x_j , respectivamente, pode-se afirmar que a distância r_{ij} entre esses dois vaga-lumes é a distância cartesiana considerando d dimensões, ou seja:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (31)$$

O movimento de um vaga-lume em direção a outro mais brilhante, considerando a iteração t do código, é dado por:

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_{j,t} - x_{i,t}) + \alpha \varepsilon_{i,t} \quad (32)$$

onde o segundo termo é devido a atração entre os dois vaga-lumes, o terceiro termo é a aleatoriedade (será descrita na próxima subseção) com α sendo “parâmetro de aleatoriedade” e ε_i um vetor de números aleatórios com distribuição Gaussiana ou uniforme. No caso mais simples ε_i pode ser escrito como:

$$\varepsilon_i = rand - \frac{1}{2} \quad (33)$$

Na qual $rand$ é um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo $[0,1]$. Na maior parte das aplicações considera-se $\beta_0 = 1$ e $\alpha \in [0,1]$ (YANG, 2008).

3.3.2.2 Aleatoriedade

Como abordado na seção anterior, o parâmetro α é um parâmetro de aleatoriedade. A utilização de um valor otimizado para esse parâmetro garante um ajuste no tempo de convergência do algoritmo, já que com o valor certo a aleatoriedade tende a diminuir de maneira gradativa conforme o algoritmo se aproxima do valor ótimo. Yang (2014) mostra algumas formas de realizar o controle desse parâmetro.

Uma das maneiras é a utilização da seguinte relação:

$$\alpha[t] = \alpha_\infty + (\alpha_0 - \alpha_\infty)e^{-t} \quad (34)$$

na qual α_0 é o valor inicial do parâmetro de aleatoriedade, α_∞ é o valor final e $t \in [0, t_{max}]$ é a iteração atual do algoritmo, sendo t_{max} o número máximo de iterações estabelecido para o algoritmo.

Uma segunda maneira abordada pelo mesmo autor é a inclusão de um parâmetro $\theta \in (0,1]$ de redução da aleatoriedade como mostrado a seguir:

$$\alpha[t] = \alpha_0 \theta^t \quad (35)$$

em (35), os autores sugerem que para a maioria das aplicações se utilize $\alpha_0 = 1$ e $\theta = 0,95 \sim 0,99$.

Pode-se também utilizar o melhor valor global encontrado até o momento g^* para o controle do parâmetro de randomização, faz-se isso através da soma do seguinte termo em (32):

$$\lambda \varepsilon_i (g^* - x_i) \quad (36)$$

no qual λ é um parâmetro similar a α e β .

3.3.3 Complexidade computacional

Pode-se observar pelo pseudocódigo que o FA possui dois laços internos que exploram a população de vaga-lumes n e um laço externo que controla as t iterações. Sendo assim, no pior caso a complexidade do algoritmo é $O(n^2t)$. Como n normalmente tem um valor baixo (normalmente n tem valor entre 15 e 50) e t é normalmente alto (por exemplo, $t = 5000$) o custo computacional do algoritmo é relativamente baixo já que a complexidade do algoritmo é linear em termos de t .

Caso haja a necessidade da utilização de um valor alto para n uma abordagem sugerida pelos autores é a utilização de algoritmos de ordenação para ordenar os vaga-lumes em termos de seu brilho ou atratividade. Nesse caso a complexidade do algoritmo se torna $O(nt \log(n))$.

Vale ressaltar que uma das partes que mais possui influência no custo do algoritmo é a análise da função objetivo envolvida no problema, porém esse problema ocorre em todas as abordagens meta-heurísticas, não se aplicando exclusivamente ao FA (YANG; HE, 2013).

3.3.3.1 Problema de alocação de potência em redes OCDMA

Para o problema de alocação de potência em redes OCDMA, a complexidade computacional do FA é semelhante à de outras meta-heurísticas como o PSO, já que as equações que definem esses algoritmos apresentam mesmo nível de complexidade (PAL; RAI; SINGH, 2012).

Segundo Durand e Abrão (2016), a complexidade computacional para o problema em questão depende do número de usuários K da rede, sendo que para o PSO e, portanto, para o FA essa complexidade é definida por $O(K^2)$. Para efeitos de

comparação, a complexidade computacional de métodos matemáticos como a inversão matricial (utilizada no controle centralizado mostrado em (18)) pode ser definida como $O(K^2 \cdot \log K)$ para o melhor caso (BRUZA ALVES et al., 2016) e de métodos analíticos-iterativos como Verhulst é $O(K^2)$ (STÁBILE FILHO, 2011).

3.3.4 Aplicações

Desde a proposta do FA, o algoritmo vem sendo utilizado nas mais diversas aplicações das mais diferentes áreas. Muitos exemplos de aplicação são citados em Yang (2014). Nessa seção serão citadas algumas aplicações na área de telecomunicações que aparecem na literatura.

Uma das aplicações mais amplas do FA ocorre em WSN. Sobre essas redes Amer e Noureldin (2016) utilizam o FA combinado com o método *Radio Signal Strength* (RSS) para otimização de aplicações de localização. Lalwani, Ganguli e Banka (2016), por sua vez, utilizam o FA para roteamento em WSN e fazem a comparação do método com os algoritmos convencionais usados para essa aplicação. Ambos os trabalhos mostraram que o FA é eficiente tanto em termos de precisão, quanto em custo computacional.

Outra aplicação mostrada é a utilização do algoritmo para resolução de falhas em sistemas de comunicação com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO - *Multiple Inputs Multiple Outputs*) com Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Os resultados mostram que a utilização do FA reduz drasticamente o custo computacional e apresenta resultados melhores na aplicação em questão quando comparado com o algoritmo convencional (HUNG et al., 2016).

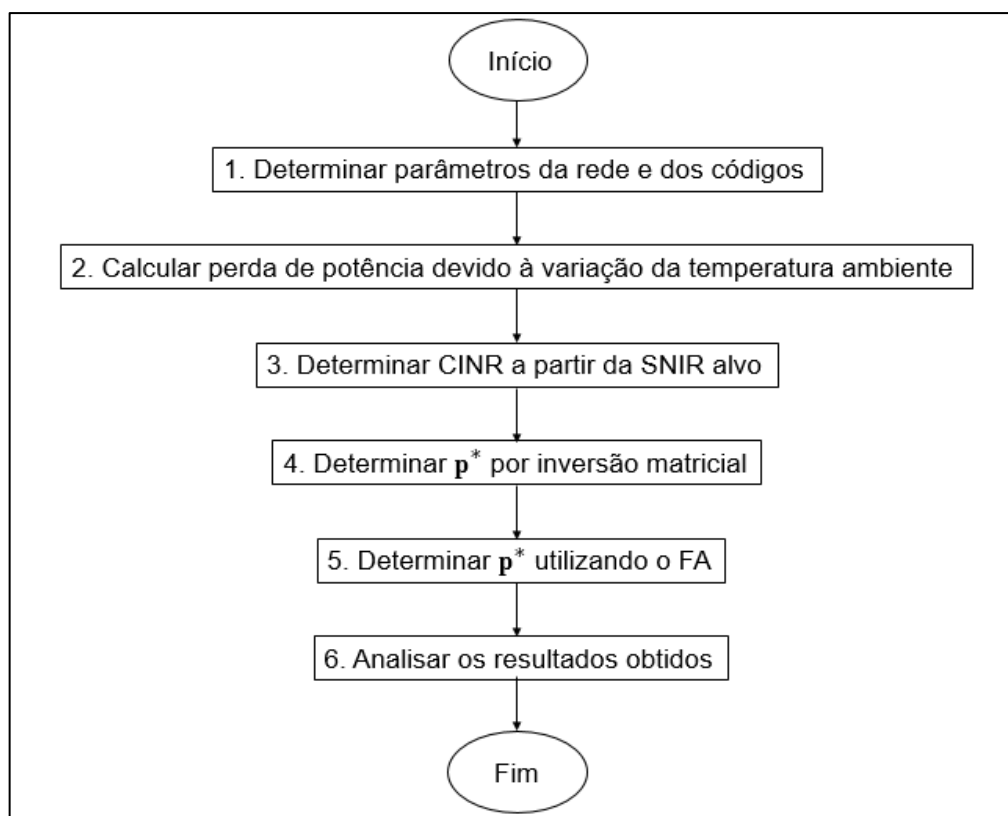
Adaniya et al. (2015) mostram duas aplicações do FA. Na primeira é utilizada uma variação do algoritmo para criação de um padrão de tráfego na rede e na segunda a aplicação visa resolver o problema de maximização da eficiência energética em redes cooperativas *Multi-Carrier-DS/CDMA* (MC-DS/CDMA). Os resultados indicam que, para o primeiro caso, o padrão de tráfego criado não apresentou um desempenho excelente, mas o algoritmo proposto apresentou a capacidade de evitar ótimos locais, o que é importante em diversas aplicações. Os resultados relativos à segunda aplicação mostraram que o FA apresentou alta eficiência quando comparado com a solução analítica do problema, além de ter um

erro aceitável, o que torna viável sua aplicação para uma rede com a configuração utilizada. Por fim, o trabalho de Mohammed et al. (2016) realiza a comparação entre GA, PSO e FA para a otimização do projeto de antenas. O resultado dos testes mostra que o FA apresenta um desempenho melhor que as outras duas abordagens no projeto da antena proposta.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta para o presente trabalho se baseia na implementação em ambiente MATLAB® das equações que definem a estrutura da rede, dos códigos e do algoritmo do enxame de vaga-lumes. Essa implementação é feita de acordo com o diagrama de blocos mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama de blocos do código



Fonte: Autoria Própria

No diagrama de blocos da Figura 5 o passo 1 consiste em atribuir os parâmetros relativos à rede, como distância entre os nós, SNIR alvo, perdas causadas pela estrutura física entre outros. Também no passo 1 são definidos parâmetros relativos aos códigos como espaçamento espectral e peso de código, além da variação da temperatura ambiente a qual a fibra está sujeita.

No passo 2 são utilizadas as equações (4) até (7) para determinar a perda de potência devido à variação da temperatura ambiente para cada um dos nós da rede. No passo 3, por sua vez, utilizam-se as equações (11) até (13) para determinar a CINR alvo a partir da SNIR alvo estabelecida previamente.

No passo 4, para efeito de comparação dos resultados, é calculado o vetor de potências ótimas (\mathbf{p}^*) utilizando o método da inversão matricial representado na equação (18). A determinação da potência ótima utilizando o FA é feita no passo 5 e será mostrada com mais detalhes na próxima subseção.

Por fim, após a determinação de \mathbf{p}^* pelo método da inversão matricial e também com a utilização do FA, é feita a análise dos resultados obtidos com base nos parâmetros que se deseja observar.

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO FA

A implementação do FA para o trabalho foi feita com a adaptação do algoritmo padrão (vide seção 3.3.1) de acordo com o mostrado a seguir:

Algoritmo do Enxame de Vaga-Lumes – Adaptação para o problema de controle de potência em redes OCDMA

Definir parâmetros do algoritmo

Gerar População inicial de vaga-lumes \mathbf{x}_i ($i=1,2,\dots,n$)

Enquanto ($t < \text{num_Iterações}$)

Determinar valor de α para a t -ésima iteração usando (35)

Calcular SNIR para toda a população de vaga-lumes usando (11)

Avaliar a função objetivo (19)

Ordenar vaga-lumes pelo brilho de acordo com a função objetivo

Armazenar máximo global para a t -ésima iteração

Para $i = 1:n$ para todos os n vaga-lumes

Para $j = 1:n$ para todos os n vaga-lumes

Se ($I_i < I_j$), Mover vaga-lume i em direção ao j usando (32) **Fim Se**

Fim Para

Fim Para

Define limites de potência

Fim Enquanto

No pseudocódigo mostrado anteriormente é válido ressaltar as mudanças feitas com relação ao algoritmo padrão do FA. É feita a avaliação da intensidade da

luz dos vaga-lumes, bem como a ordenação pelo brilho, através da avaliação da função objetivo no início de cada iteração, já que assim se elimina a necessidade dessa operação ser realizada antes do início do laço externo.

Outra mudança ocorre no que diz respeito à forma de movimentação dos vaga-lumes. A utilização de (32) já abrange a variação da atratividade com a distância, não sendo necessário que essa operação seja realizada após o movimento dos vaga-lumes em direção ao mais brilhante.

Por fim, realiza-se também a aplicação dos limites de potência. Esses limites fazem com que os vaga-lumes não saiam do espaço de busca, o que torna a busca pelo máximo global mais eficiente. A aplicação dos limites de potência também atende às restrições da função objetivo mostradas em (20).

4.2 SINTONIA DE PARÂMETROS DO FA

A sintonia dos parâmetros do FA é feita de maneira a obter a melhor relação entre desempenho e custo computacional do algoritmo. Essa abordagem foi realizada em trabalhos como Durand e Abrão (2013) e De Paula Marques, Durand e Abrão (2014) para PSO e ACO respectivamente, e mostrou que com a utilização de parâmetros otimizados ocorre uma convergência mais rápida do algoritmo até o valor ótimo além de uma melhor qualidade dos resultados obtidos quando se leva em conta o erro entre o valor estimado pelo algoritmo e o valor ótimo.

De maneira a determinar os parâmetros otimizados do FA para o controle de potência em redes OCDMA e comparar o desempenho desse algoritmo com o método matemático da inversão de matrizes foram feitas simulações computacionais. A metodologia adotada é baseada na utilizada em Adaniya et al. (2015) e consiste no ajuste dos seguintes parâmetros: número de vagalumes, θ , α_0 , β_0 e γ . A avaliação de desempenho é feita levando em conta o número de iterações até a convergência do FA para o valor ótimo e o Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE – *Normalized Mean Square Error*) entre o valor ótimo e o valor obtido. O NMSE é calculado por (DOS SANTOS; DURAND; ABRÃO, 2015):

$$NMSE = E \left[\frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{p}^*\|^2}{\|\mathbf{p}\|^2} \right] \quad (37)$$

onde $\|\cdot\|^2$ é a norma euclidiana, $E[\cdot]$ é o operador esperança e \mathbf{p}^* é o vetor de potências ótimas determinado via inversão matricial.

Na abordagem adotada o vetor de potências \mathbf{p} utilizado para o cálculo da NMSE é obtida a partir de uma média de $T=100$ tentativas sendo que a cada tentativa o valor da NMSE é obtido após 1000 iterações do algoritmo. Já para a determinação do número de iterações até a convergência observou-se o menor número de iterações dentre todas as tentativas para que a diferença entre o valor obtido pelo FA e o valor ótimo fosse menor que um valor pré-determinado.

Para o ajuste dos valores dos cinco parâmetros de entrada citados anteriormente o processo de otimização foi dividido em quatro etapas:

- Determinação dos valores otimizados para número de vagalumes e θ ;
- Determinação do valor otimizado para α_0 ;
- Determinação do valor otimizado para β_0 ;
- Determinação do valor otimizado para γ .

Para o controle da aleatoriedade do algoritmo, foi utilizada a forma mostrada em (35), portanto para a determinação do número de vaga-lumes foram feitas simulações com diferentes valores para θ enquanto para os outros parâmetros atribui-se o valor $\alpha_0 = \beta_0 = \gamma = 1$. A partir da determinação dos valores do número de vaga-lumes e de θ , foi possível determinar os demais parâmetros seguindo a ordem mostrada anteriormente e considerando o valor já otimizado para o parâmetro anterior.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE META-HEURÍSTICAS

Para a comparação do FA com outras meta-heurísticas foi feita uma análise do desempenho desses algoritmos em termos de iterações até a convergência e do NMSE apresentado. Para as redes OCDMA 2-D e 3-D realizou-se uma análise comparativa com o PSO considerando a implementação e aplicação de ambos os algoritmos para um mesmo cenário de rede.

É válido ressaltar que, para a implementação do PSO, foram considerados parâmetros sintonizados para o problema de alocação de potência em redes OCDMA. Esses parâmetros podem ser vistos na Tabela 1 e foram determinados em Durand e

Abrão (2013) e utilizados em Dos Santos, Durand e Abrão (2015) e Durand e Abrão (2016). Para o FA, por sua vez, foram utilizados os parâmetros sintonizados conforme metodologia proposta na subseção 4.2.

Tabela 1- Parâmetros do PSO

Parâmetro	Valor
Número de Partículas	$K + 2$
c_1 – Coeficiente de aceleração por partícula	1,8
c_2 – Coeficiente de aceleração global	2
p_{\max} – Potência máxima	20 dBm
p_{\min} – Potência mínima	$p_{\max} \times 10^{-12}$
Peso de inércia	[0,4;1]
Índice não-linear	[0,6;1,4]
Número de iterações	1000
V_{\max} - Velocidade máxima	$0,2(p_{\max}-p_{\min})$
V_{\min} - Velocidade mínima	$-V_{\max}$

Fonte: Adaptado de Dos Santos, Durand e Abrão (2015).

5 RESULTADOS

Baseado na metodologia mostrada no capítulo anterior, os resultados obtidos consistem na aplicação do FA para controle de potência em redes OCDMA com códigos 2-D e 3-D considerando os efeitos da variação da temperatura ambiente. Uma análise similar é feita em Dos Santos, Durand e Abrão (2015), porém nesse trabalho os autores utilizam uma abordagem baseada nos algoritmos PSO e ACO e manipulam apenas códigos bidimensionais.

Nas próximas subseções serão mostradas a estrutura das redes utilizadas para as simulações e os resultados da sintonia dos parâmetros do FA e para o problema de alocação de potência na rede, bem como uma comparação com outros algoritmos presentes na literatura, com ênfase no PSO.

5.1 REDES OCDMA 2-D

A rede utilizada para as simulações desse tipo de rede é caracterizada por códigos ópticos (8 x 200, 4, 1, 0), ou seja, possui 8 comprimentos de onda disponíveis, comprimento de código de 200 *chips*, peso de código de 4, e restrições de 1 para auto correlação e 0 para correlação cruzada. Outros parâmetros utilizados são descritos na Tabela 2.

Vale ressaltar que os valores utilizados para os parâmetros da rede são valores típicos abordados na literatura para dispositivos que integram uma rede com códigos 2-D com as características descritas acima. Esses valores são utilizados em trabalhos como dos Santos, Durand e Abrão (2015) e Durand e Abrão (2013).

Tabela 2 - Parâmetros da rede utilizada na simulação.

(continua)

Parâmetro	Valor
K – Número de usuários	4, 8 e 12
h – Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ [J/Hz]
n_{SP} – Fator de Emissão Espontânea	2
G_{amp} – Ganho do amplificador	20 [dB]
B_0 – Largura de Banda Óptica	100 [GHz]
f – Frequência da luz	193 [THz]
d_{ij} – Comprimento do Link	4:50 [km]

Tabela 2 - Parâmetros da rede utilizada na simulação.**(conclusão)**

Parâmetro	Valor
α_f – Atenuação da fibra	0,2 [db/km]
D_{temp} – Coeficiente térmico	0,0025 [ps/nm.km/°C]
ΔT – Variação da temperatura	0:20 [°C]
$\Delta\Lambda$ – Espaçamento espectral	0,4 e 0,8 [nm]
$\Delta\lambda$ – Espessura de Pulso Espectral	1,4 [nm]
γ^* - SNIR alvo	20 dB

Fonte: Autoria Própria.

5.1.1 Determinação dos parâmetros sintonizados para o FA

Seguindo a metodologia apresentada na seção 4.2 foi possível a obtenção de parâmetros sintonizados para o FA. A primeira abordagem feita consiste na variação do valor de θ e do número de vaga-lumes, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 6 e da Figura 7.

Figura 6 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de θ e 10 vaga-lumes.

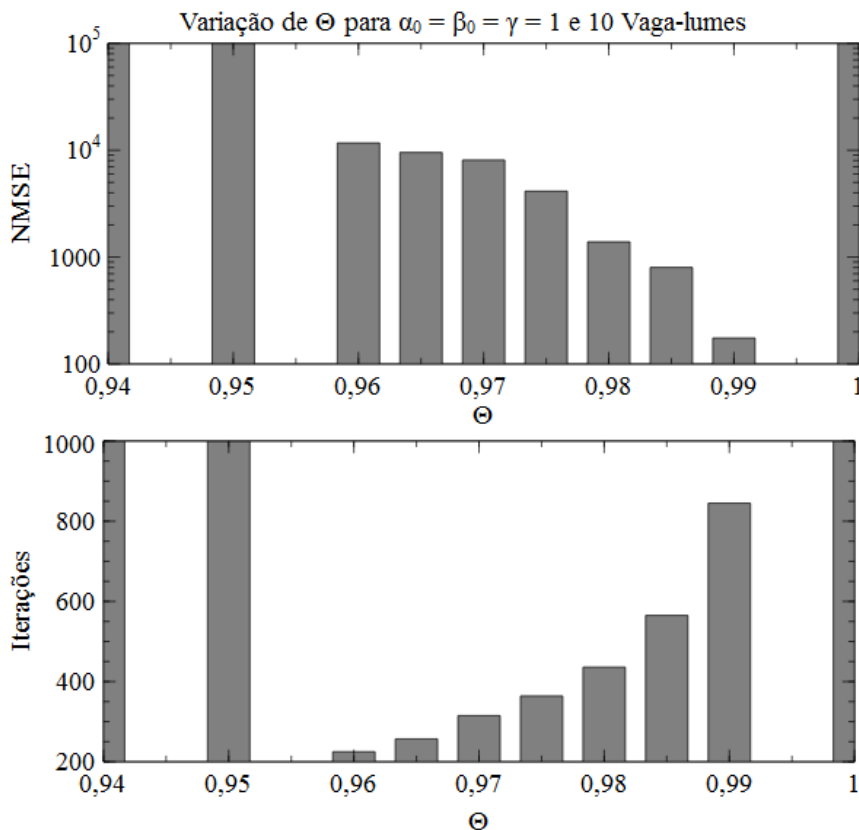
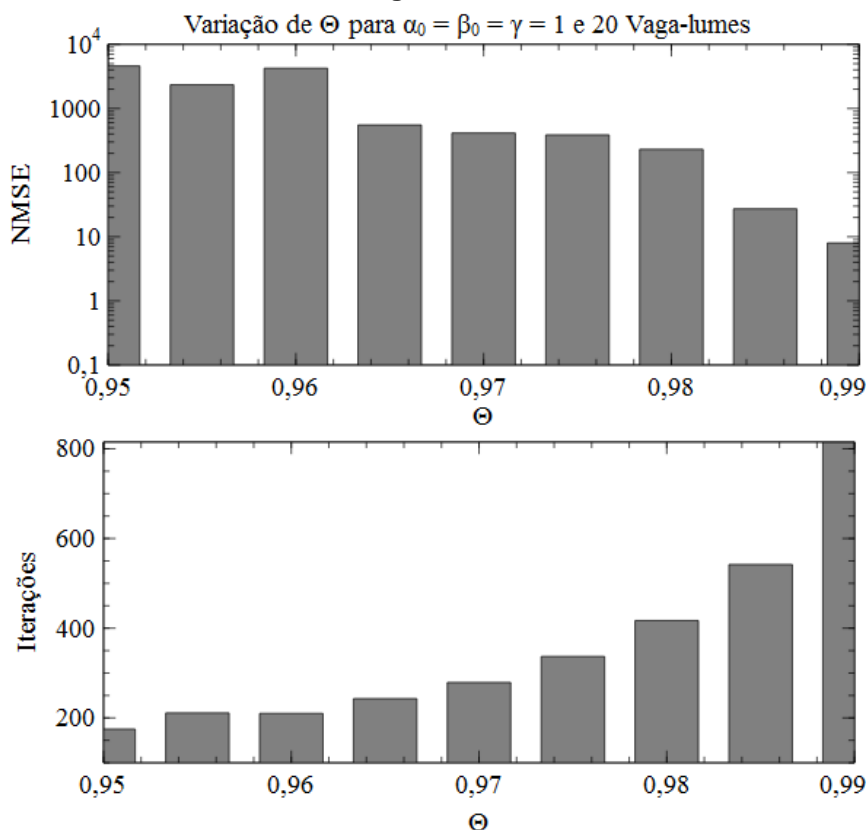
**Fonte: Autoria Própria**

Figura 7 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de θ e 20 vaga-lumes.



Fonte: Autoria Própria

Da observação da Figura 6 e da Figura 7 pode-se afirmar que conforme ocorre um aumento do número de vaga-lumes o NMSE e o número de iterações diminuem. Isso ocorre devido ao fato de que com um maior número de vaga-lumes há uma varredura mais minuciosa do espaço de busca até que se atinja o ótimo global da função, o que causa uma diminuição no erro ao custo de um aumento no tempo de execução.

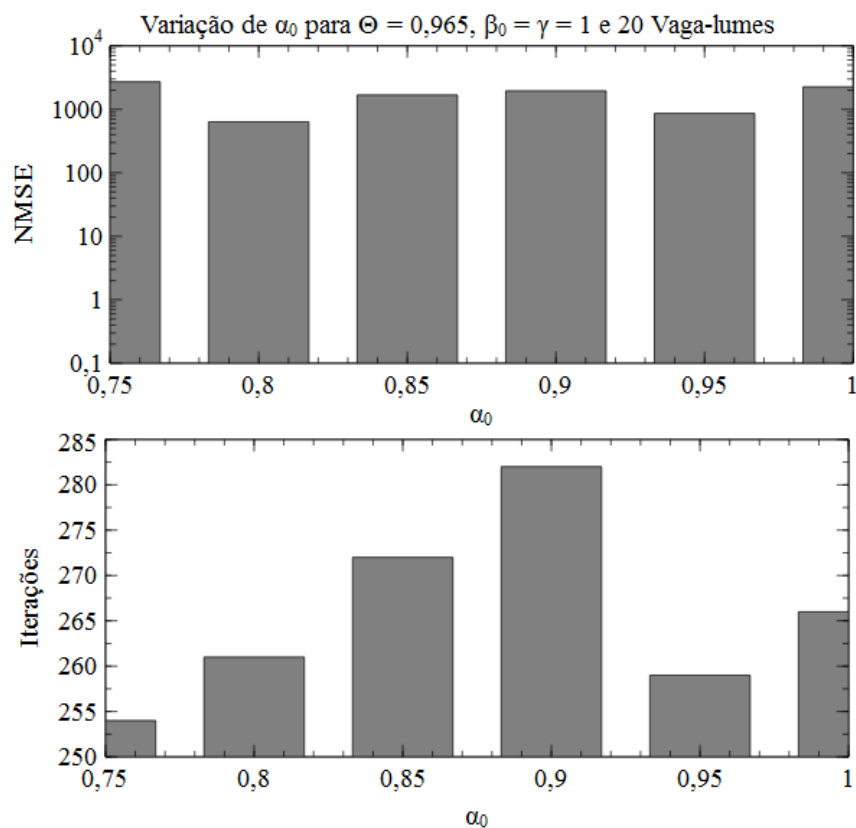
Pode-se observar também um aumento do número de iterações até a convergência e uma diminuição do NMSE conforme o valor de θ aumenta, isso ocorre devido ao fato de θ ser um parâmetro de redução da aleatoriedade. De acordo com (35), quanto maior o valor de θ menor a redução na aleatoriedade do algoritmo a cada iteração, o que causa um maior número de iterações até a convergência e uma solução com um erro menor. Essa análise ressalta a necessidade de determinação da melhor relação entre erro obtido e iterações até a convergência.

Com os resultados obtidos determinou-se o valor de $\theta = 0,965$ e um número de 20 vaga-lumes como valores ideais para a determinação do restante dos

parâmetros, já que para esses valores foi possível observar um número próximo a 250 iterações até a convergência com um NMSE da ordem de 10^3 .

O próximo parâmetro a ter o valor otimizado determinado foi α_0 . As simulações feitas para determinação desse parâmetro podem ser observadas na Figura 8 e mostram que a melhor relação entre o número de iterações até a convergência e o NMSE ocorrem quando $\alpha_0 = 0,8$, com um NMSE na ordem de 10^3 e um número de iterações próximo de 260.

Figura 8 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de α_0 .



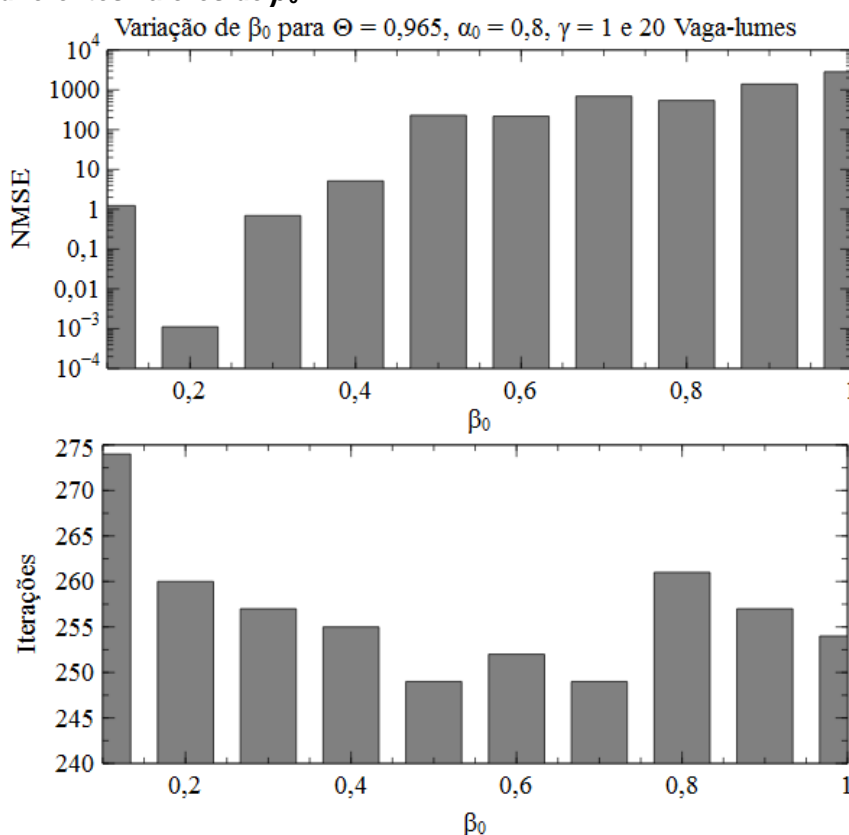
Fonte: Autoria Própria

Uma análise da Figura 8 mostra que a variação de α_0 dentro de um espaço de valores próximos ao recomendado por Yang (2008) causa pouca variação em termos de NMSE e de iterações até a convergência. Isso se deve ao fato de o controle da aleatoriedade do algoritmo estar sendo feito com a utilização de (35), na qual há uma influência menor de α_0 quando comparado com θ para o controle da aleatoriedade.

O próximo passo foi a determinação do valor otimizado para β_0 . Para esse

parâmetro os resultados das simulações podem ser vistos na Figura 9. Pode-se perceber que a variação de β_0 acarreta em uma variação significativa do NMSE quando se considera um número de iterações menor até a convergência. Sem o controle desse parâmetro era possível a obtenção de NMSE da ordem de 10^0 até 10^2 ao custo do algoritmo atingir a convergência em um número de iterações superior a 500 (vide Figura 7), já com o controle da atratividade erros dessa ordem são observados quando a convergência ocorre em valores próximos à 250 iterações.

Figura 9 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de β_0 .



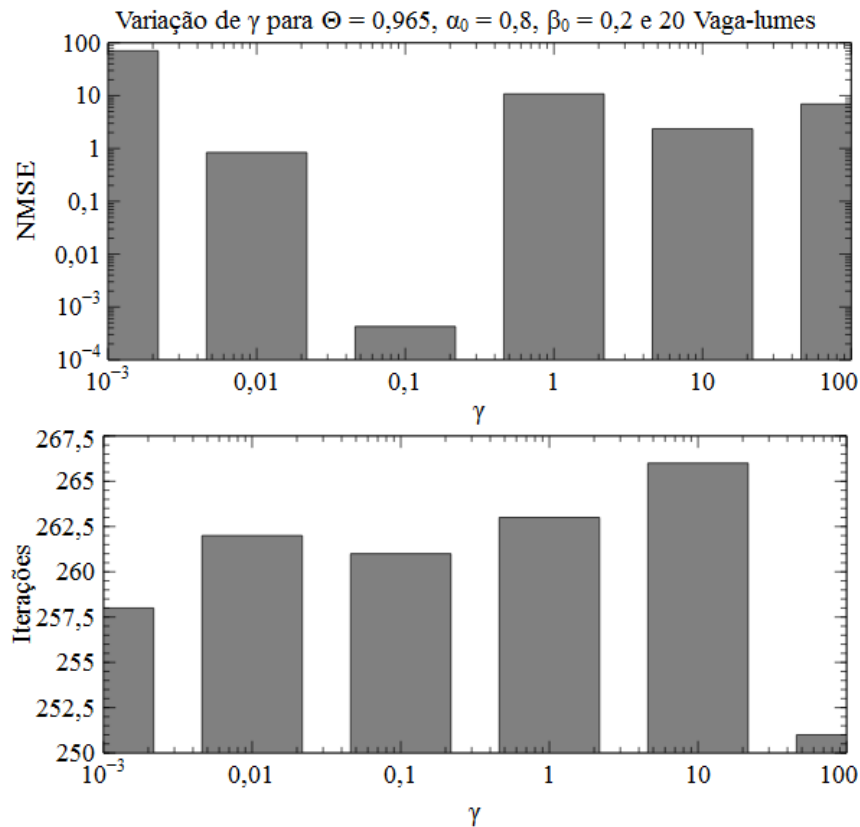
Fonte: Autoria Própria

Com o controle da atratividade é possível a obtenção de um NMSE ainda menor que os já citados, haja visto que para $\beta_0 = 0,2$ há um NMSE da ordem de 10^{-3} que se mostra bastante inferior ao 10^3 encontrado nas simulações anteriores para um número similar de iterações até a convergência. Essa redução significativa do NMSE faz com que 0,2 seja o valor ideal encontrado para utilização do parâmetro β_0 .

O último parâmetro a ter o valor ideal determinado foi γ . Os resultados das simulações para diferentes valores desse parâmetro podem ser observados na Figura

10 e mostram que para $\gamma = 0,1$ o NMSE é inferior a 10^{-3} o que torna esse valor como sendo o ideal para o problema do controle de potência.

Figura 10 - Variação do NMSE e do número de iterações para diferentes valores de γ .



Fonte: Autoria Própria

Vale observar que a variação de γ influencia diretamente na atratividade, já que de acordo com (30) esse parâmetro é parte da função exponencial que controla esse fator. As variações do erro se devem também a aleatoriedade inerente ao algoritmo, já que a cada iteração é incluído um valor diferente na função que rege o movimento de um vaga-lume menos brilhante em direção a um com maior brilho.

Devido ao fato de o método em questão ser estocástico, a análise dos gráficos anteriores pode apresentar grandes variações. Esse fato explica a discrepância significativa entre diferentes valores de parâmetros mostrados nas figuras anteriores, porém o comportamento de uma maneira geral tende a ser o mesmo, variando apenas os valores numéricos.

Após a análise de todas as curvas foi possível a obtenção de um conjunto de parâmetros sintonizados para a execução do FA para a rede proposta. Esse conjunto de parâmetros é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do FA para redes OCDMA 2-D

Parâmetro	Valor
Número de vaga-lumes	20
θ	0,965
α_0	0,8
β_0	0,2
γ	0,1
p_{\max} - Potência máxima	20 dBm
p_{\min} - Potência mínima	$p_{\max} \times 10^{-12}$

Fonte: Aatoria Própria.

Os valores obtidos para o número de vaga-lumes, β_0 e γ em Adaniya et al. (2015) são diferentes dos obtidos para o presente trabalho. Esse fato mostra que para diferentes problemas deve-se utilizar diferentes configuração de parâmetros sintonizados para o algoritmo. Vale ressaltar que o método de controle da aleatoriedade utilizado pelos autores é diferente do proposto para a aplicação desse trabalho, por isso não foi possível realizar uma comparação dos valores de θ e α_0 .

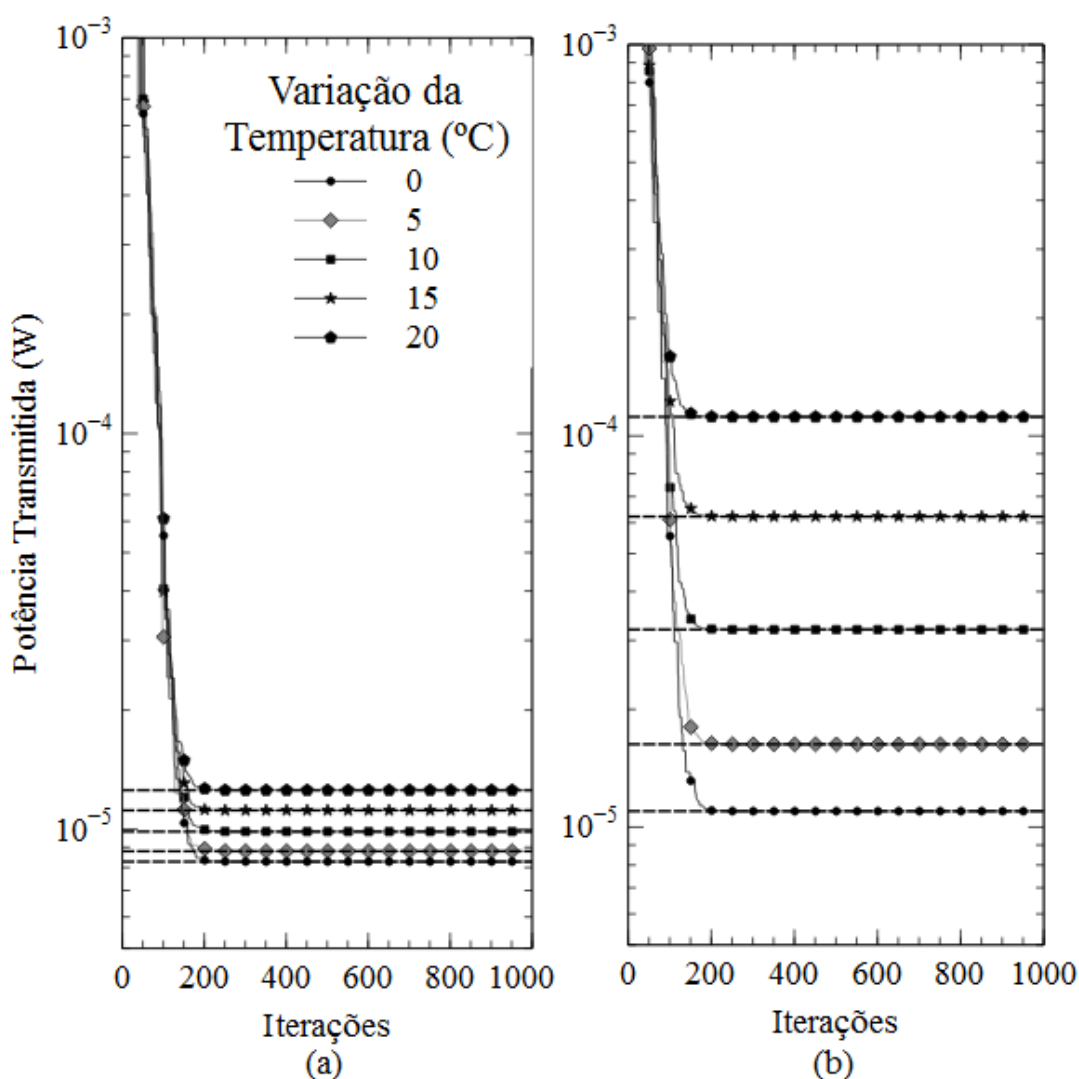
5.1.2 Controle de potência utilizando FA

Após a determinação dos parâmetros sintonizados para o FA foram feitos testes para verificação da eficácia do controle de potência utilizando o algoritmo proposto. Esses testes se basearam na metodologia utilizada em Dos Santos, Durand e Abrão (2015) que consiste na verificação da eficácia do controle de potência com variação nos parâmetros da rede OCDMA e dos códigos 2-D mostrados na Tabela 2.

O primeiro cenário considerado foi a variação da temperatura ambiente e os resultados obtidos para essa condição podem ser vistos na Figura 11. Considerou-se uma rede com 4 nós distribuídos em uma área de 4 até 50 km dividida em duas partes, sendo uma parte a distância do transmissor até o acoplador e a outra parte a distância do acoplador até o receptor, além de códigos com espaçamento espectral de 0,4 nm e 0,8 nm em (a) e (b), respectivamente.

Na Figura 11 as curvas marcadas representam a média da potência transmitida para os 4 nós considerando um determinado valor de variação da temperatura ambiente, enquanto as linhas tracejadas representam a potência ótima calculada pelo método da inversão de matrizes. Sendo assim, é notável a convergência em ambos os casos (espaçamento espectral de 0,4 nm em (a) e 0,8 nm em (b)) dos valores da potência transmitida obtida pelo FA para os valores calculados via inversão matricial.

Figura 11 - Potência transmitida por iteração do FA considerando variação da temperatura ambiente e espaçamento espectral de 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b)



Fonte: Autoria Própria

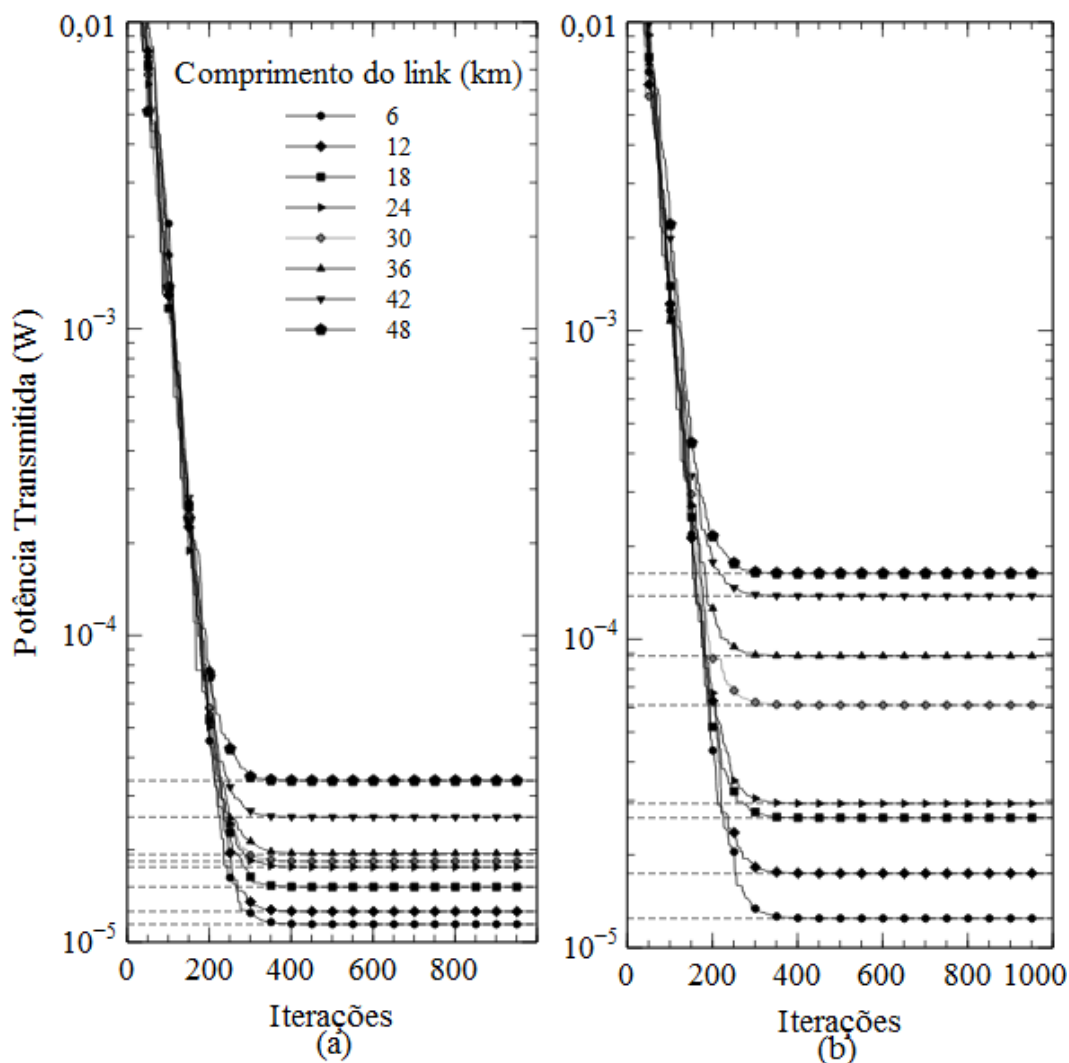
Pode-se perceber pela análise da Figura 11 os efeitos da variação da temperatura ambiente na rede considerada, já que conforme ocorre um aumento na variação da temperatura ambiente ocorre também um aumento na potência

transmitida média. Vale ressaltar que caso não se considerem esses efeitos a potência transmitida é afetada somente pela MAI

Outra observação a ser feita é a influência do espaçamento espectral tendo em vista que ao realizar uma comparação da Figura 11 (a) com a Figura 11 (b) é possível notar o aumento da potência transmitida quando se dobra o espaçamento espectral. Esse aumento na potência transmitida ocorre de maneira a compensar a perda de potência causada por uma maior distorção temporal que surge devido ao aumento do espaçamento espectral.

O próximo cenário analisado é a potência média transmitida considerando a variação da distância do *link* para uma rede mais complexa composta por 8 nós. Esse cenário pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Potência transmitida por iteração do FA considerando variação no comprimento do *link* para um espaçamento espectral de 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b)



Fonte: Autoria Própria

Os resultados representados na Figura 12 consideram os 8 nós distribuídos em distâncias de 6 até 48 km sendo parte dessa distância do transmissor ao acoplador e parte do acoplador até o receptor. São considerados espaçamentos espectrais de 0,4 nm em (a) e 0,8 nm em (b), uma variação de temperatura ambiente de 20° C para todos os nós e novamente a potência obtida via inversão de matrizes é representada pelas linhas tracejadas horizontais para efeito de comparação.

Novamente pode-se perceber que os resultados do FA convergem para os obtidos pela inversão de matrizes em todas as distâncias e ambos os valores de espaçamento espectral considerados. Pode-se notar também que quando se aumenta a distância, os nós mais distantes do acoplador transmitem com uma potência maior que os nós mais próximos. Isso se deve ao fato de o controle de potência compensar o efeito *near-far*, melhorando o desempenho da rede já que cada nó é capaz de atingir a SNIR alvo.

Por fim, ressalta-se mais uma vez a influência do espaçamento espectral na potência transmitida, já que tanto na Figura 11 quanto na Figura 12 com um maior espaçamento espectral foi possível observar um aumento na potência transmitida pelos mesmos motivos citados anteriormente.

Os resultados obtidos mostram que o FA é uma meta-heurística eficiente para realização do controle de potência nas redes OCDMA de maneira a atenuar os efeitos da variação da temperatura ambiente considerando códigos 2-D. Na próxima subseção será feita uma análise comparativa entre o FA e o PSO.

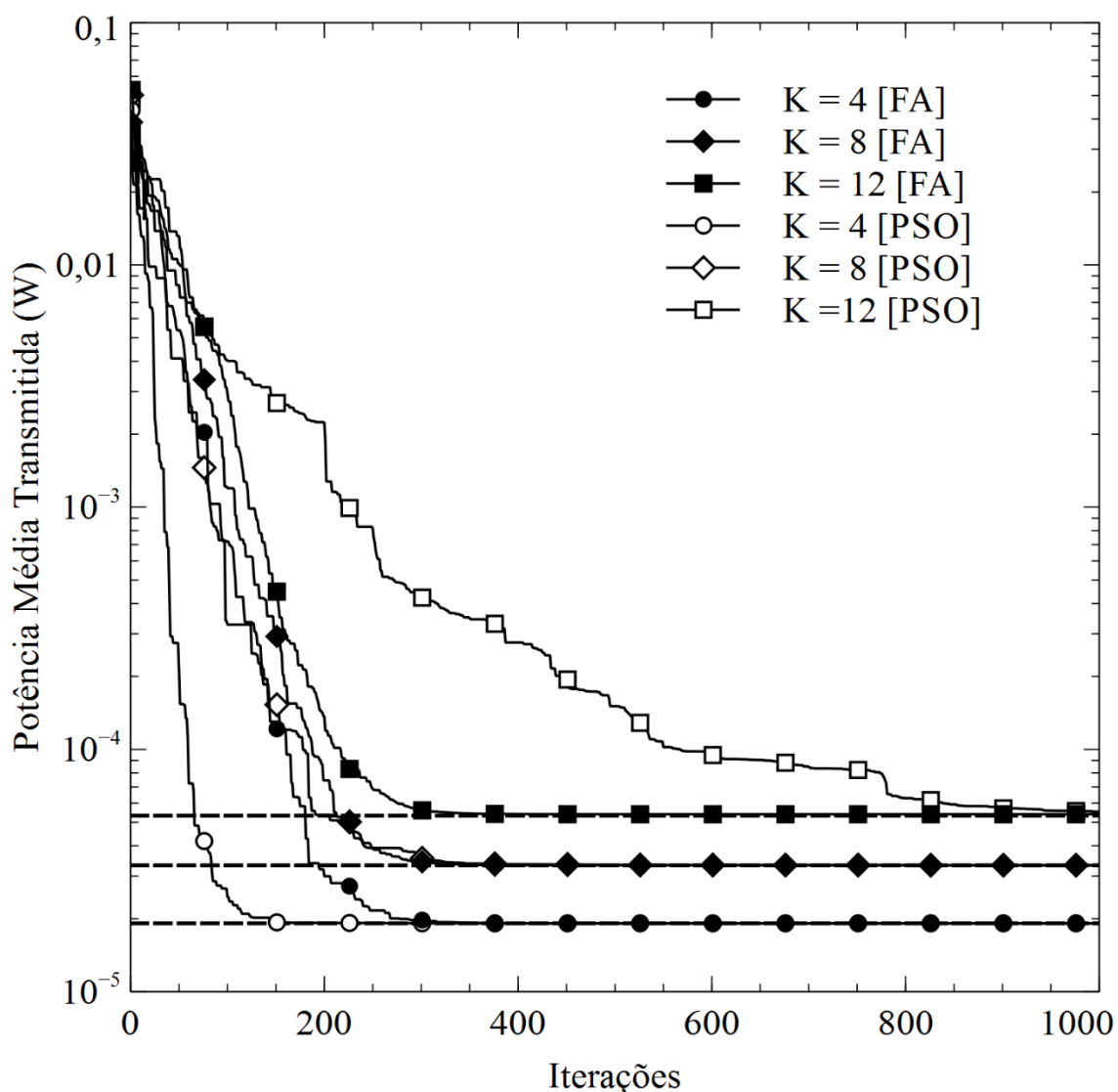
5.1.3 Comparação com outras meta-heurísticas

Considerando um problema de alocação de potência para uma rede OCDMA 2-D com 4, 8 e 12 usuários distribuídos uniformemente com comprimentos de *link* entre 4 e 50 km e com as fibras sujeitas a uma variação de temperatura ambiente fixa de 20° C, foi possível chegar aos resultados da Figura 13 para os algoritmos PSO e FA.

Na Figura 13 as linhas contínuas mostram a evolução da potência média alocada estimada pelo algoritmo (PSO e FA) e as linhas tracejadas a potência calculada via inversão matricial. Analisando e comparando as curvas para o PSO e para o FA é possível observar que ambos os algoritmos convergem para o valor ótimo, porém a convergência do algoritmo até a potência ótima ocorre com menos iterações

para o PSO em comparação com o FA para uma rede com 4 usuários. Além disso, pode-se notar que para 8 usuários o desempenho de ambos os algoritmos é semelhante e para 12 usuários o FA se mostra superior ao PSO. Isso se deve ao número de partículas utilizadas para o PSO ser dependente do número de usuários, portanto quanto maior o número de usuários mais complexo o cômputo do PSO.

Figura 13 - Comparação entre a potência alocada por iteração pelo PSO e pelo FA.

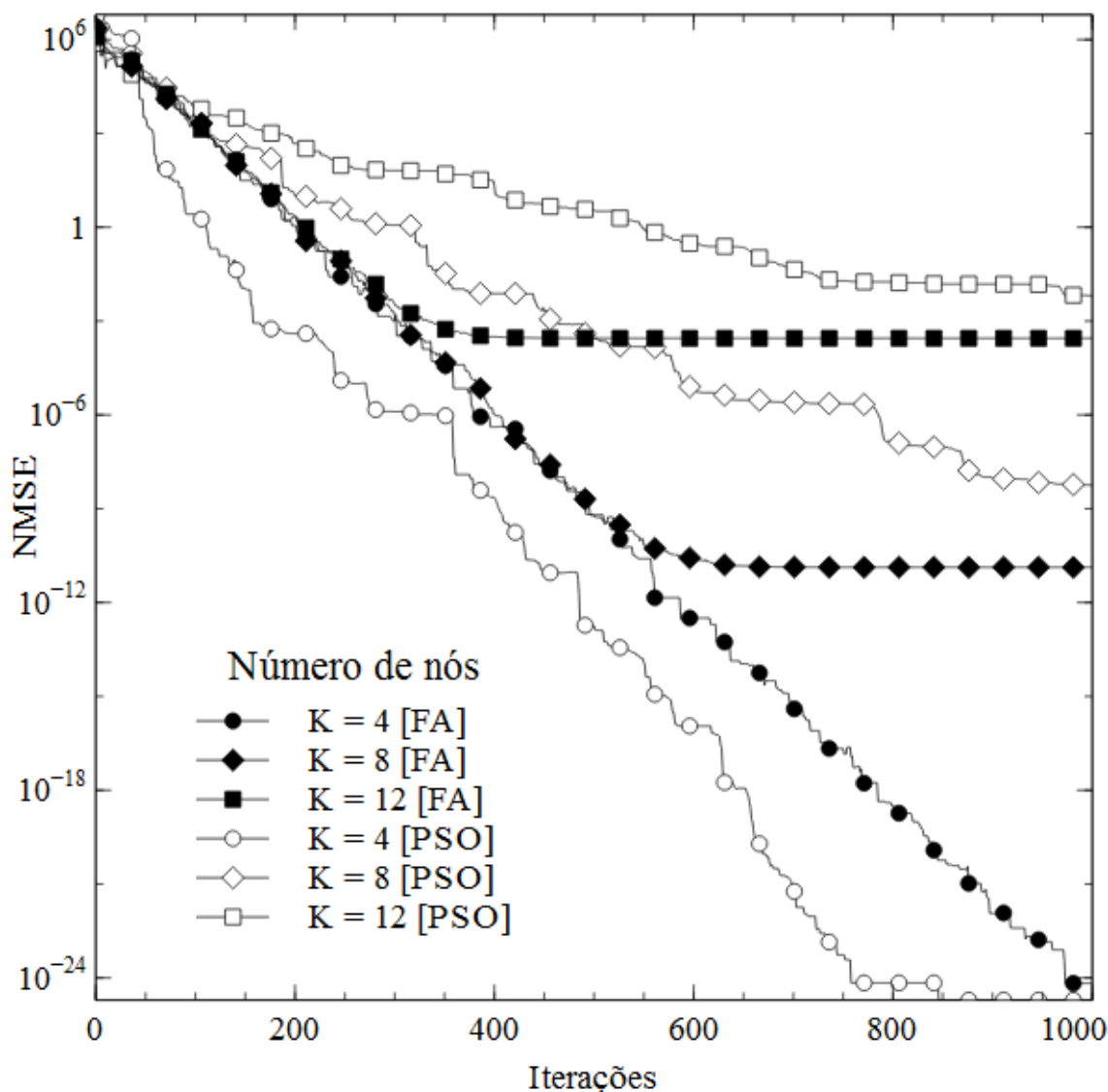


Fonte: Autoria Própria

A próxima análise a ser feita se refere à qualidade dos resultados obtidos com a utilização do FA e do PSO para o controle de potência. Essa análise se baseia no NMSE entre a potência estimada pelos algoritmos a cada iteração e a potência ótima obtida por inversão de matrizes. Considera-se também uma variação do número

de usuários da rede (4, 8 e 12) para obtenção dos resultados que podem ser vistos na Figura 14.

Figura 14 - NMSE por iteração considerando a utilização de FA e PSO para controle de potência em uma rede com 4, 8 e 12 usuários.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 14 pode-se perceber que para ambos os algoritmos analisados o NMSE começa com um valor alto e diminui com o passar das iterações. Considerando o FA, para as redes com 8 e 12 nós o NMSE estabiliza após a convergência, enquanto para a rede com 4 nós o erro diminui cada vez mais mesmo após a convergência. O PSO, por sua vez, tende a diminuir o erro após a convergência para redes com 8 e 12 nós, enquanto para 4 nós pode-se observar uma estabilização desse parâmetro após aproximadamente 900 iterações.

Esse resultado mostra a qualidade de ambos os algoritmos na busca pelo valor ótimo, já que mesmo após atingir a convergência há uma busca pela diminuição do erro para as redes com 8 e 12 usuários para o PSO e com 4 usuários para o FA. Para ambos os algoritmos, mesmo para as redes nas quais o NMSE se estabiliza após a convergência, o valor do erro é bastante pequeno. Além disso, quando se considera o PSO pode-se notar que para 4 usuários o comportamento do NMSE é similar ao do FA, enquanto que para 8 e 12 usuários o erro obtido pelo FA é menor que o obtido pelo PSO. Sendo assim, o FA se mostra uma alternativa que apresenta resultados melhores ou similares em termos de NMSE aos obtidos com a utilização do PSO.

Na análise da Figura 14, pode-se observar também que para ambos os algoritmos um aumento no número de usuários da rede acarreta um maior erro. Isso é esperado devido ao fato de o problema de otimização da SNIR ter uma função custo e restrições não convexas, o que acarreta em um maior número de máximos locais que podem interferir na convergência do algoritmo para o ponto ótimo da função (DOS SANTOS; DURAND; ABRÃO, 2015).

Utilizando-se a abordagem metodológica descrita na seção 4.3 é possível observar que a utilização do FA tem desempenho melhor ou semelhante ao PSO em termos de iterações até a convergência. Além disso, ao se considerar a evolução do NMSE por iteração (Figura 14), o FA apresenta resultados melhores ou similares quando comparados ao PSO.

5.2 CONTROLE DE POTÊNCIA EM REDES OCDMA 3-D

Nessa seção será feita a análise do controle de potência em redes OCDMA que utilizam códigos 3-D considerando diferentes aspectos. Foram analisados primeiramente os efeitos da variação da temperatura ambiente sobre esse tipo de rede. Após essa análise foi observado o comportamento do FA para o controle de potência considerando diferentes parâmetros para a rede e para os códigos. Por fim, foi realizada uma comparação com o PSO para um mesmo cenário de rede e procurou-se averiguar o comportamento desses dois algoritmos para o controle de potência.

5.2.1 Sintonia de parâmetros do FA

Para a aplicação do FA nas redes OCDMA 3-D foi realizada uma nova sintonia de parâmetros de acordo com a metodologia proposta na seção 4.2. Com essa nova sintonia foi possível chegar aos valores vistos na Tabela 4 para os parâmetros do algoritmo:

Tabela 4 - Parâmetros do FA para redes OCDMA 3-D

Parâmetro	Valor
Número de vaga-lumes	35
θ	0,935
α_0	0,7
β_0	0,2
γ	0,01
p_{\max} - Potência máxima	20 dBm
p_{\min} - Potência mínima	$p_{\max} \times 10^{-12}$

Fonte: Aatoria Própria.

É possível observar que o novo conjunto de parâmetros é diferente do obtido para as redes com códigos 2-D (Tabela 3). Isso reforça o fato de que para o FA a sintonia de parâmetros é importante, já que permite que se possa obter os melhores resultados para cada aplicação específica.

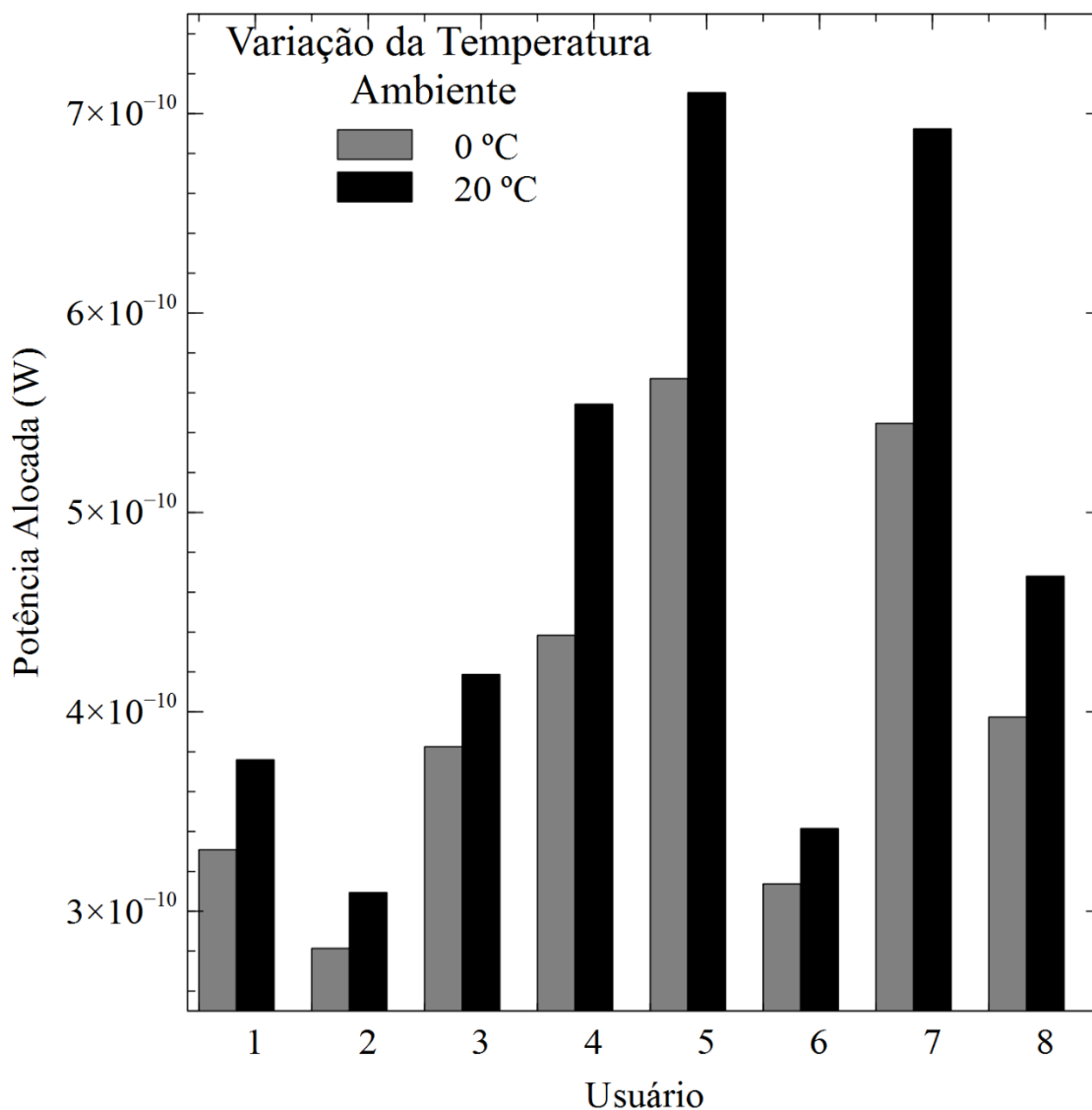
5.2.2 Efeitos da variação da temperatura ambiente

Para a análise dos efeitos da variação da temperatura ambiente sobre as redes OCDMA 3-D considerou-se uma rede com 8 nós distribuídos uniformemente entre 4 e 50 km. Nessa rede os códigos de usuário possuem configuração (2 x 8 x 200, 4, 1, 0), ou seja, 2 canais espaciais, 8 comprimentos de onda disponíveis e 200 *chips* de tempo, além de peso de código 4, e restrições de autocorrelação e correlação cruzada 1 e 0, respectivamente. O espaçamento espectral é de 0,8nm e a espessura de pulso espectral é 1,4nm A primeira análise considerando essa rede pode ser vista na Figura 15.

O gráfico de barras da Figura 15 mostra os efeitos da variação da temperatura ambiente para cada um dos 8 nós da rede. É notável que quando a fibra

óptica é submetida a uma variação de temperatura de 20°C, a potência transmitida por usuário aumenta. Isso se deve ao fato de a utilização de um controle de potência realizar uma compensação da perda de potência causada pelo deslizamento entre as janelas de tempo do código, efeito da variação da temperatura ambiente.

Figura 15 - Potência média por nó da rede com e sem efeitos da variação da temperatura ambiente.

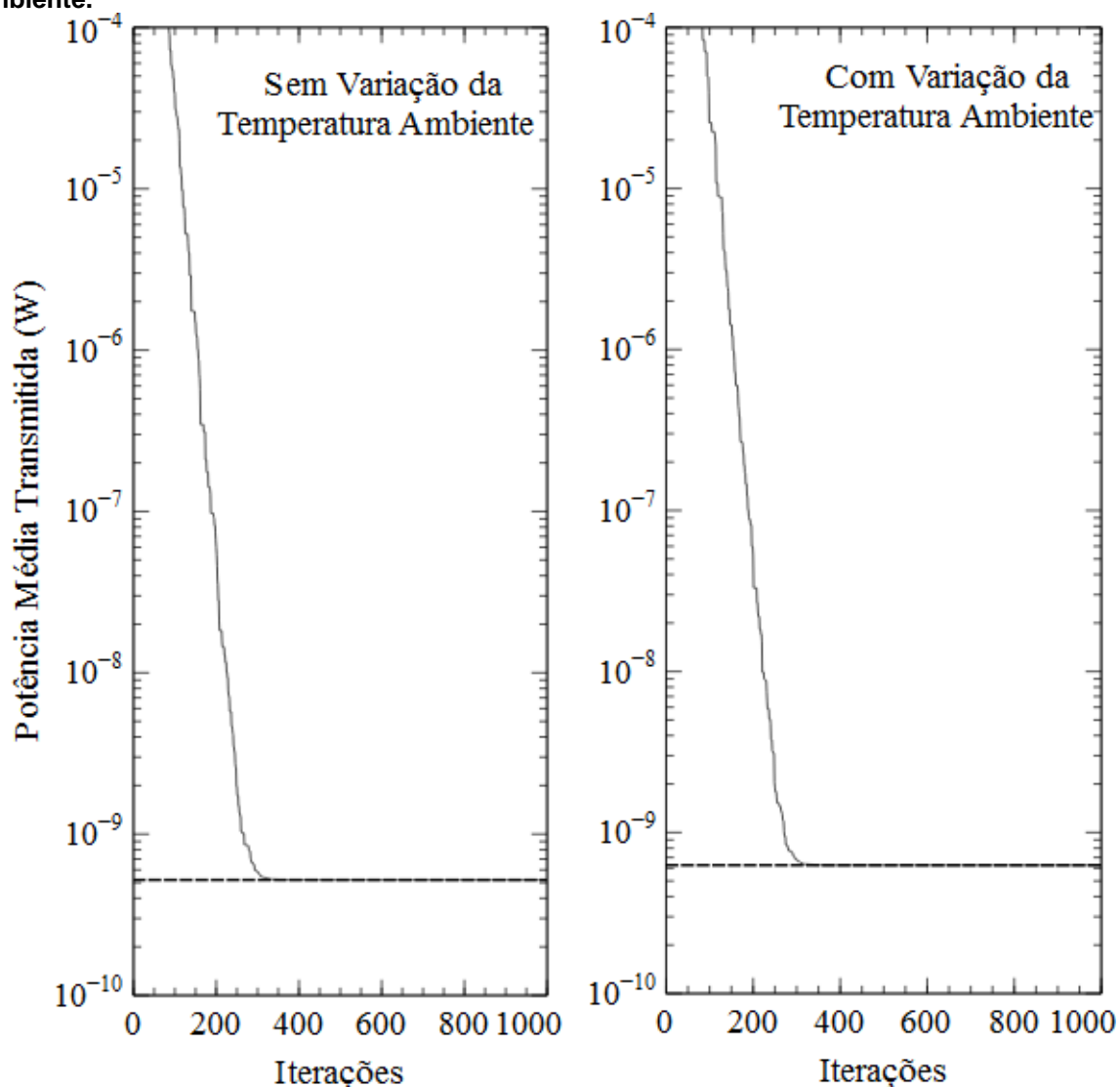


Fonte: Autoria Própria.

Considerando a variação de potência dos nós da rede mostrada na Figura 15 é possível chegar à potência média transmitida por iteração do FA mostrada na Figura 16. Nessas curvas as linhas tracejadas indicam a potência ótima calculada via inversão matricial e as linhas contínuas a potência estimada pelo algoritmo do enxame de vaga-lumes. Pode-se perceber que, ao se considerar a potência média transmitida

para todos os usuários, a variação da temperatura ambiente acarreta em um ligeiro aumento nessa potência transmitida. Esse efeito ocorre pela mesma razão apresentada na análise da Figura 15 e, apesar de ser de valor pequeno, afeta a qualidade da transmissão, já que sem a compensação dessa perda de potência podem ocorrer erros na detecção dos *bits* e conseqüentemente uma degradação no desempenho da rede.

Figura 16 - Potência média por iteração com e sem os efeitos da variação da temperatura ambiente.



Fonte: Autoria Própria

Ainda na Figura 16 deve-se ressaltar a eficácia do FA, já que é possível observar que após aproximadamente 300 iterações a potência estimada pelo algoritmo encontra a potência ótima determinada via inversão matricial. Isso mostra

que a utilização de um controle de potência baseado no FA é eficaz quando se deseja compensar as perdas de potência na rede em questão.

5.2.2 Aplicação do FA para o controle de potência

Para análise do comportamento do FA para controle de potência em redes OCDMA 3-D foram considerados diferentes cenários através da variação dos parâmetros da rede e dos códigos. A primeira análise consiste em uma rede com 4 nós distribuídos em uma distância de 4 até 50 km sendo parte desse valor a distância entre o transmissor e o acoplador e outra parte a distância do acoplador até o receptor. Considerou-se que essa rede está submetida a diferentes valores de variação de temperatura ambiente, conforme pode ser visto na Figura 17.

Na Figura 17, as linhas tracejadas mostram a potência determinada por inversão matricial e as linhas contínuas e marcadas a potência estimada pelo FA. Pode-se notar que para todas os valores considerados de variação da temperatura ambiente o algoritmo do enxame de vaga-lumes converge para a solução ótima.

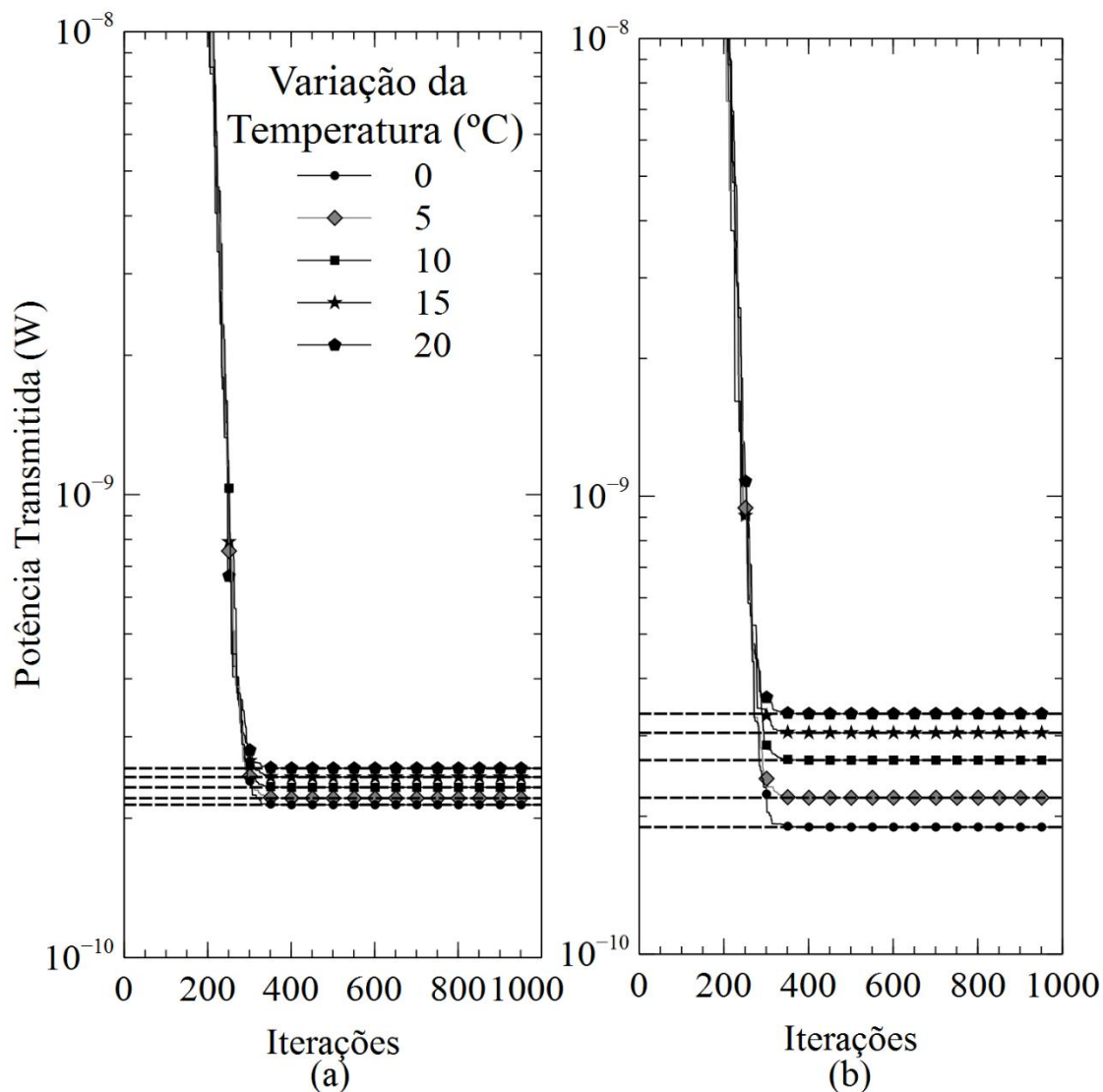
Com relação ao comportamento da rede perante a variação da temperatura ambiente, é possível perceber que conforme ocorre um aumento na variação da temperatura ambiente ocorre também um aumento na potência média transmitida. Esse fato mostra que para os códigos 3-D há uma perda de potência devido à variação da temperatura ambiente. Mostra também que o controle de potência utilizado é aplicável às redes com esse tipo de código, já que houve uma compensação das perdas ocasionadas por esse efeito.

Por fim, cabe analisar os efeitos da variação do espaçamento espectral sobre esse tipo de código. É possível notar que, de maneira geral, um maior espaçamento espectral no código 3-D torna esse código mais susceptível aos efeitos da variação da temperatura ambiente, conforme pode ser notado na comparação da Figura 17 (a) com a Figura 17 (b).

Quando se analisa a diferença entre os valores da potência média transmitida para cada valor de variação da temperatura ambiente, é notório que essa diferença é maior para um espaçamento espectral de 0,8 nm (Figura 17 (b)) quando comparado a um espaçamento espectral de 0,4 nm (Figura 17 (a)). Esse efeito mostra que nos códigos tridimensionais um maior espaçamento espectral ocasiona uma maior perda de potência devido ao deslizamento temporal do código, sendo que esse

deslizamento temporal é agravado por maiores valores da variação da temperatura ambiente.

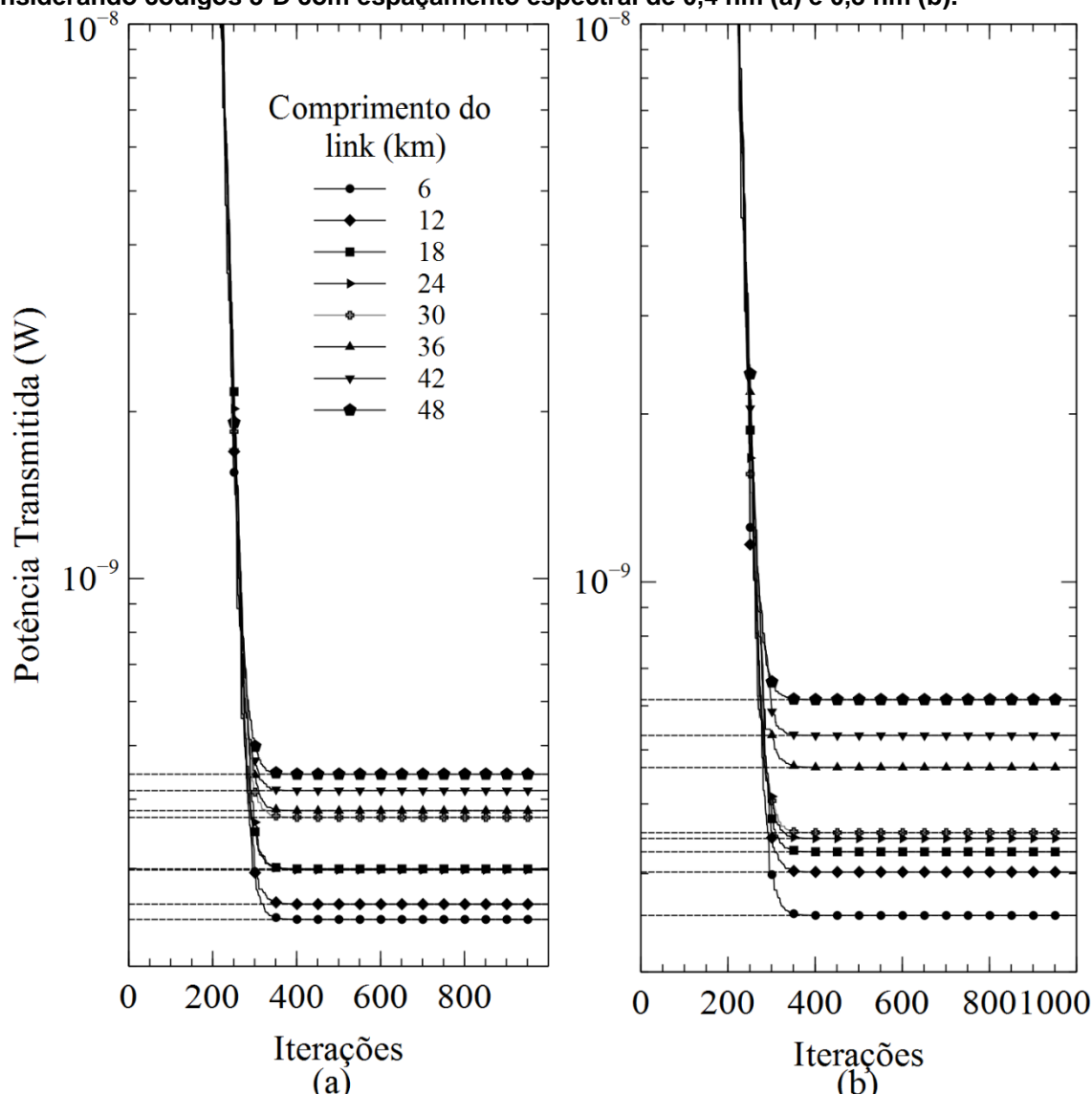
Figura 17 - Potência transmitida considerando códigos 3-D com espaçamento espectral 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b) e diferentes valores de variação da temperatura ambiente.



Fonte: Autoria Própria.

A próxima análise considera uma rede com 8 nós sob influência de uma variação de temperatura de 20°C . Essa análise pode ser vista na Figura 18, na qual as linhas tracejadas novamente indicam a potência determinada via inversão matricial e as linhas contínuas e marcadas indicam a potência estimada pelo FA. Também para esse cenário de rede pode-se verificar a eficácia do algoritmo do enxame de vaga-lumes no controle de potência de redes OCDMA 3-D, já que a potência estimada converge para a potência ótima em todos os casos analisados.

Figura 18 - Potência média transmitida por nó em uma rede com variação da distância do *link* considerando códigos 3-D com espaçamento espectral de 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b).



Fonte: Autoria Própria.

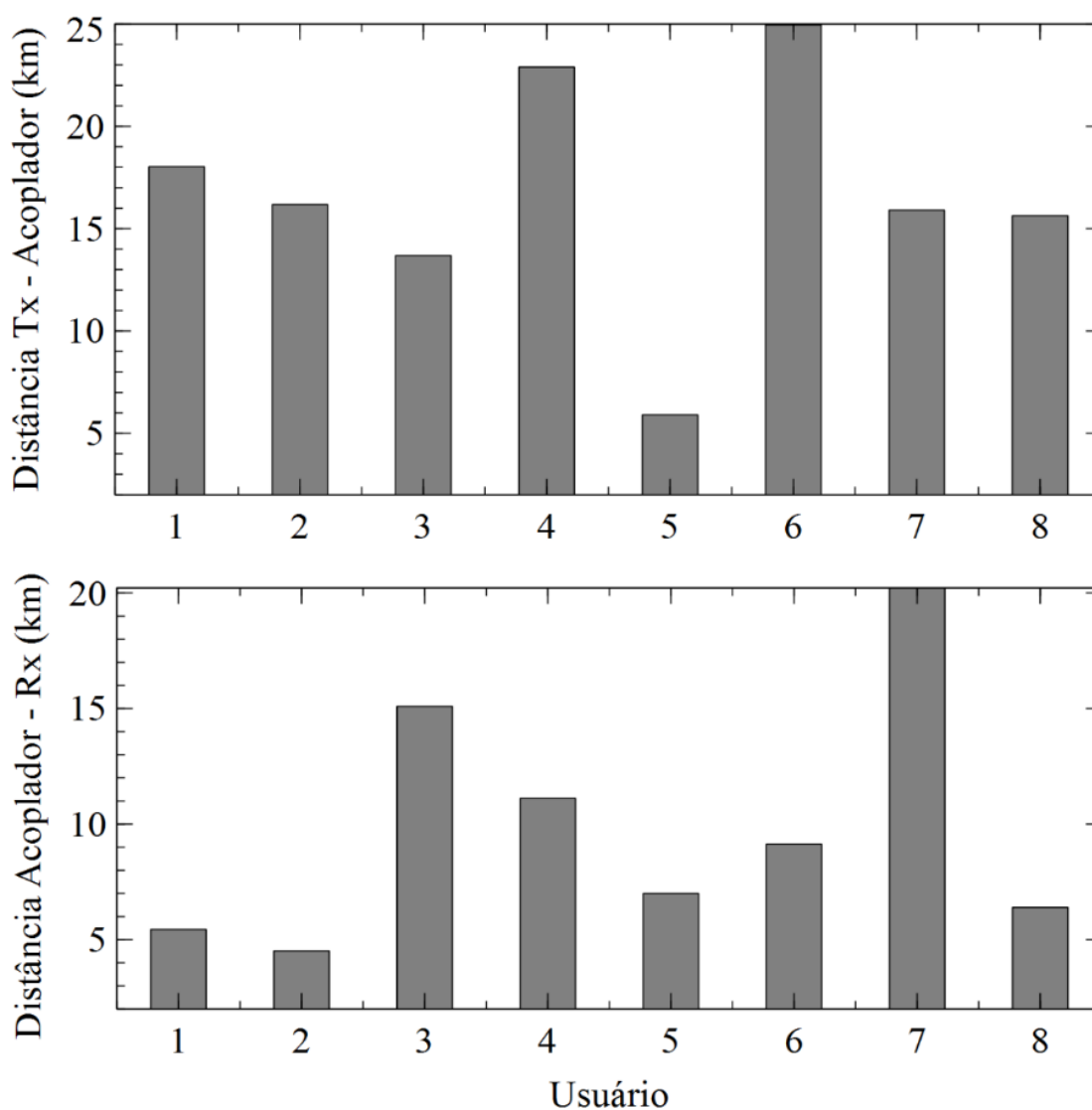
A variação da distância do *link* mostrada na Figura 18 mostra que com um aumento da distância há um aumento na potência transmitida. Esse fato mostra que mesmo com a diminuição da MAI ocasionada pela utilização de códigos 3-D a rede ainda está sujeita as perdas de potência relacionadas ao efeito *near-far*.

Por fim, novamente pode-se observar os efeitos da variação do espaçamento espectral do código através da comparação da Figura 18 (a) com a Figura 18 (b). Um maior espaçamento espectral para os códigos 3-D, para a maioria das distâncias avaliadas, acarreta em uma maior potência transmitida. Esse aumento se deve ao fato de que, com um aumento da distância, há uma maior exposição do

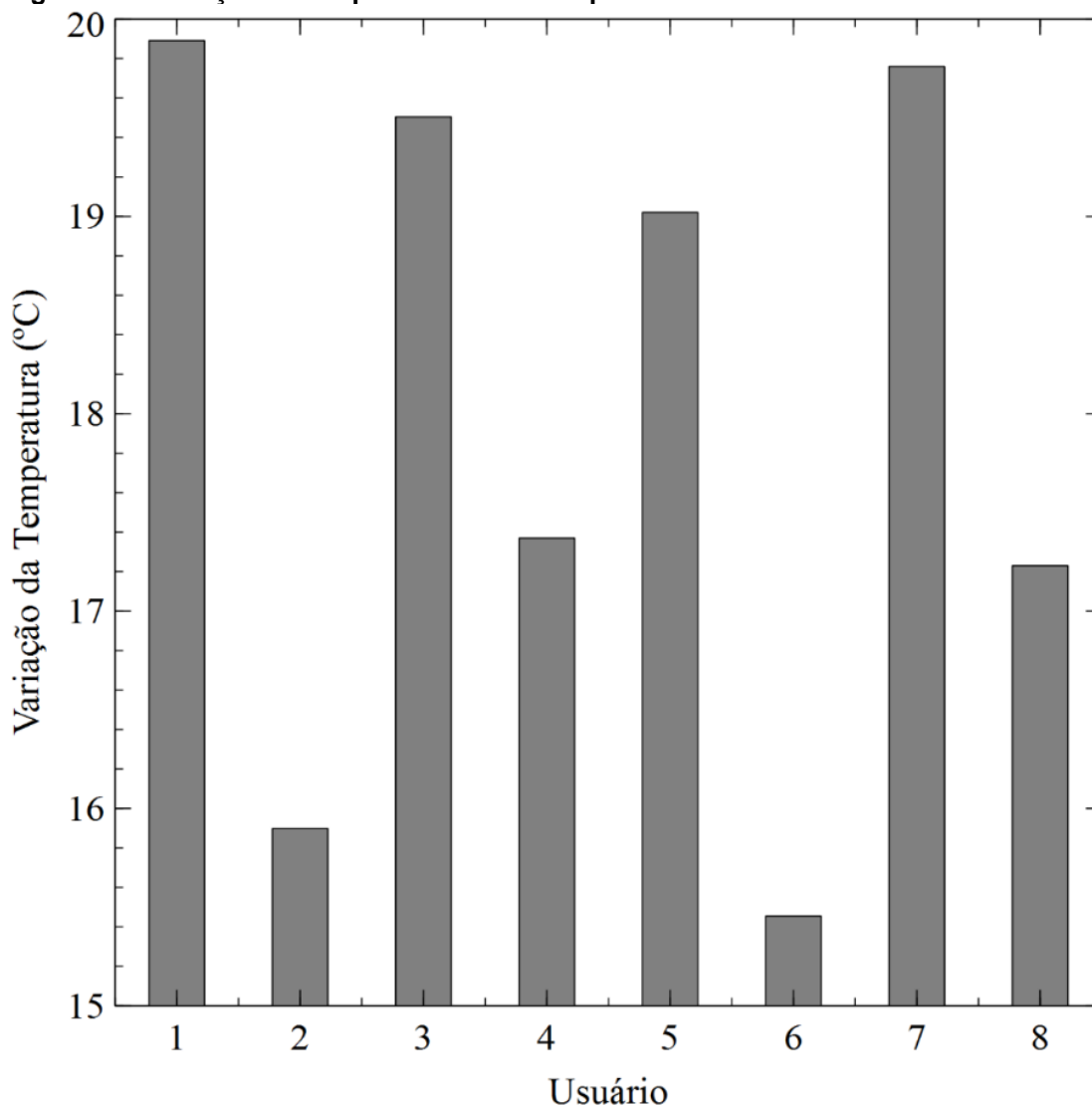
código aos efeitos da variação da temperatura ambiente, o que agrava os efeitos adversos de um maior espaçamento espectral.

A última análise refere-se à variação de dois parâmetros dos códigos: o peso de código ω (4 e 8) e o espaçamento espectral $\Delta\lambda$ (0,4 nm e 0,8 nm). Essa análise é feita para uma rede com 8 nós distribuídos entre 4 e 50 km e sujeitos a uma variação de temperatura entre 15 e 20°C conforme pode ser visto na Figura 19 e na Figura 20.

Figura 19 - Distância do *link* para cada nó da rede.



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 - Variação da temperatura ambiente para cada nó da rede.

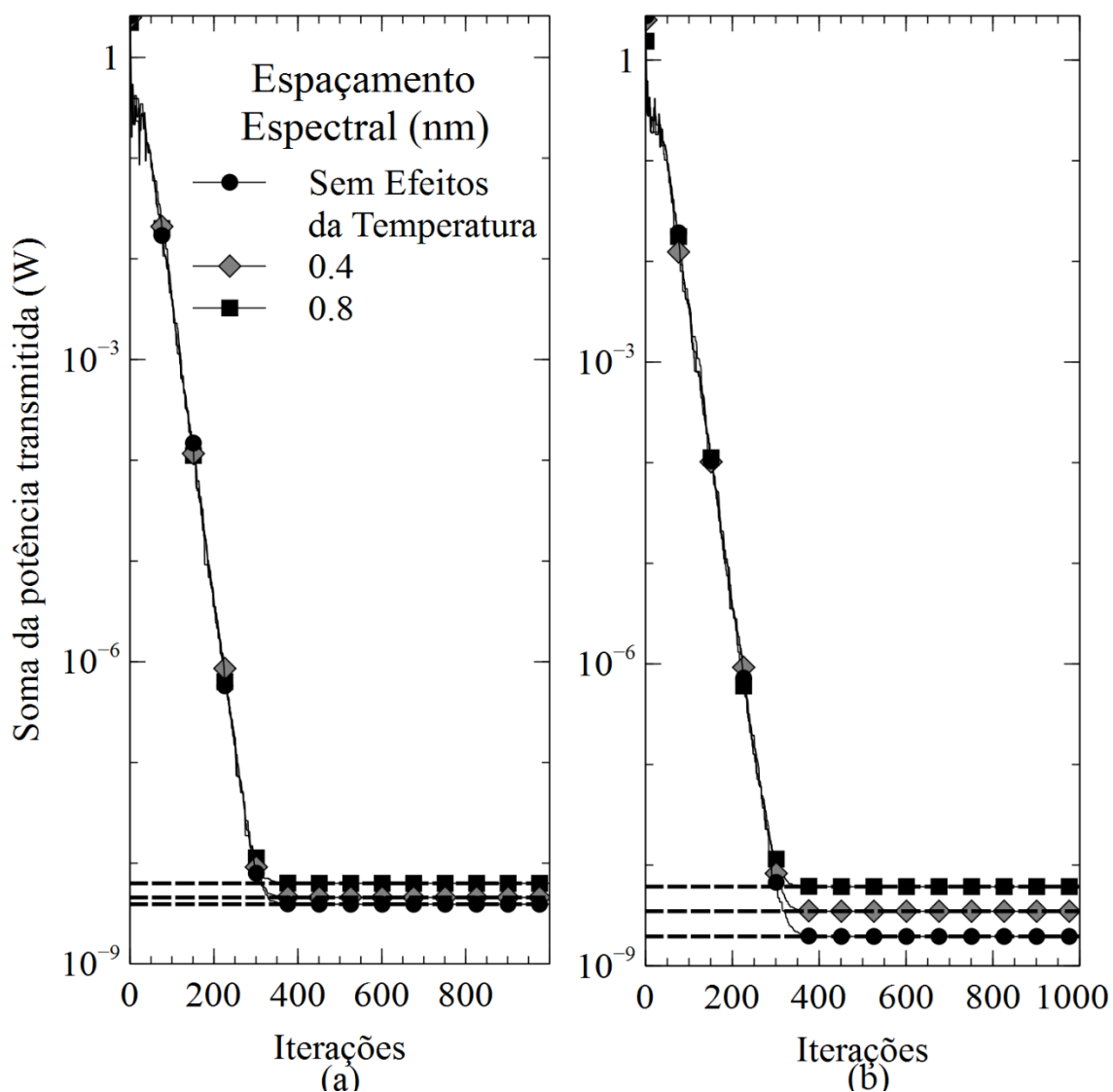
Fonte: Autoria Própria

Os resultados da variação do espaçamento espectral do código podem ser observados na Figura 21. Nessa figura considera-se a soma da potência transmitida para todos os 8 usuários da rede, sendo que a potência determinada por inversão matricial é representada pelas linhas tracejadas e a potência estimada pelo FA é mostrada nas linhas contínuas e marcadas. Novamente pode-se observar a convergência dos valores estimados pelo FA para os valores ótimos.

Pode-se notar pela análise da Figura 21 que independentemente do peso de código considerado, a potência transmitida é maior conforme se aumenta o espaçamento espectral. Isso ocorre pelos mesmos motivos apresentados na análise de códigos unidimensionais e bidimensionais.

A influência do peso de código se dá na observação de que para códigos tridimensionais, um peso de código menor acarreta em uma maior potência transmitida. Isso se deve ao fato de a variância do código ser inversamente proporcional ao peso do código, isso faz com que um código com menor peso apresente maior variância e, conseqüentemente, seja necessária uma transmissão com potência mais alta para atingir uma determinada SNIR alvo.

Figura 21 - Potência transmitida por iteração para códigos com diferentes espaçamentos espectrais e peso de código 4 (a) e 8 (b)

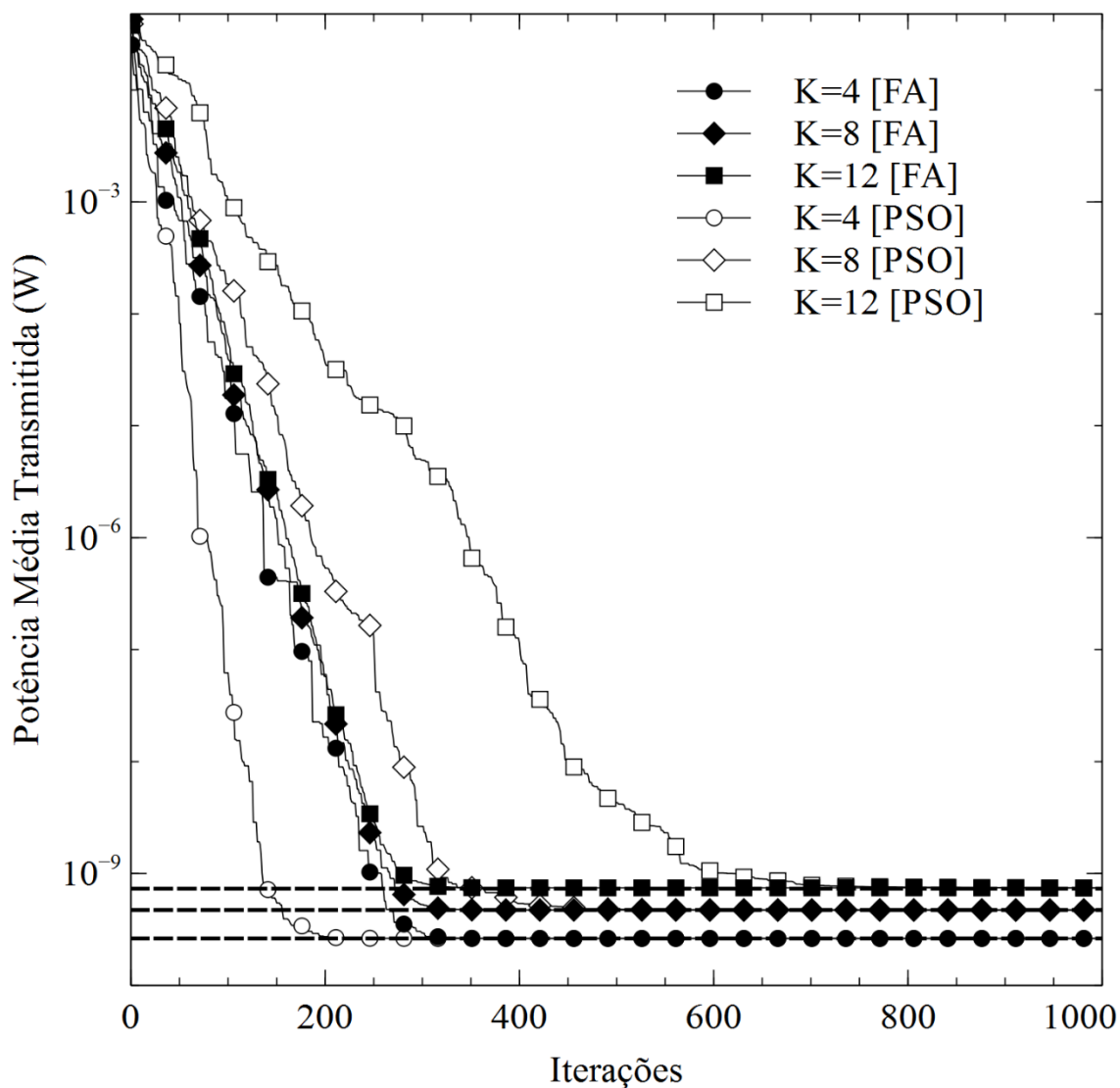


Fonte: Autoria Própria

5.2.3 Comparação com o PSO

Para a comparação com o PSO, considerou-se redes OCDMA 3-D com 4, 8 e 12 nós distribuídos entre 4 e 50 km e sujeitos a uma variação de temperatura ambiente de 20°C. Os resultados obtidos com as simulações são apresentados na Figura 22, na qual as linhas tracejadas indicam a potência ótima calculada por inversão matricial e as linhas contínuas e marcadas representam a evolução da potência estimada pelo FA e pelo PSO.

Figura 22 - Potência Média transmitida por iteração para o FA e para o PSO considerando redes com 4, 8 e 12 nós.



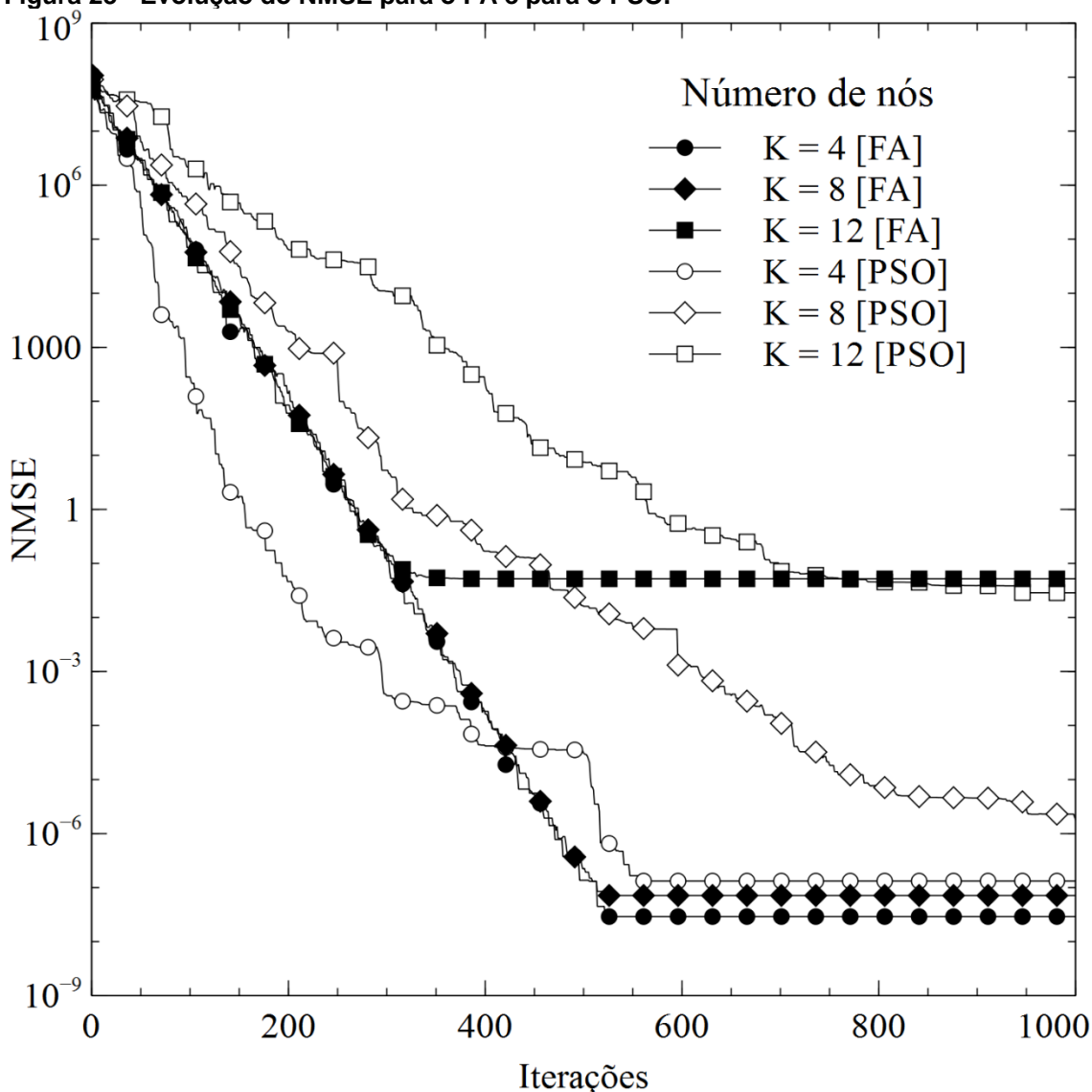
Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que ambos os algoritmos atingem a convergência para o valor estimado via inversão matricial, porém ao se analisar a diferença em termos de iterações até a convergência pode-se notar algumas diferenças. Quando se considera uma rede com 4 nós o PSO apresenta um número menor de iterações até a convergência, porém quando se considera um aumento no número de usuários, o FA passa a ser mais eficiente.

Outra observação a ser feita se refere ao aumento de potência conforme se aumenta a quantidade de usuários na rede. Esse fato se deve a presença do efeito *near-far* que mesmo tendo seus efeitos diminuídos pela utilização dos códigos tridimensionais ainda se mostram presentes nas redes OCDMA.

A comparação qualitativa dos algoritmos pode ser vista na Figura 23:

Figura 23 - Evolução do NMSE para o FA e para o PSO.



Fonte: Autoria Própria.

A análise da Figura 23 é feita com a comparação em termos da evolução do NMSE por iteração e mostra que, para códigos tridimensionais, o FA apresenta um desempenho semelhante ou superior ao PSO em termos de erro. Essa diferença entre os algoritmos é acentuada quando se considera um aumento no número de usuários, já que pode-se perceber que, para redes com 8 e 12 usuários, o FA apresenta um erro menor que o PSO. Em um cenário com 4 usuários, por sua vez, o PSO possui erro ligeiramente menor que o FA.

Nesse contexto vale ressaltar o aumento do erro conforme o número de usuários aumenta. Esse aumento se deve ao fato de um maior número de usuários da rede ocasionar em um problema mais complexo e que apresenta um maior número de máximos locais. Esse aumento nos máximos locais pode ocasionar convergência prematura do algoritmo e, conseqüentemente, um aumento no erro.

Esses fatos demonstram que o PSO, com a configuração utilizada nas simulações, perde eficiência conforme a complexidade do problema a ser resolvido aumenta. Sendo assim, faz-se necessário a utilização de abordagens mais elaboradas que sejam mais eficientes para evitar máximos locais, como o FA se mostra nas simulações realizadas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foi proposta a utilização de um controle de potência baseado no FA para atenuação dos efeitos da variação da temperatura ambiente em redes OCDMA com códigos em duas e três dimensões. Esse controle de potência se mostra importante já que a variação de temperatura ambiente causa um deslizamento temporal do código que acarreta em distorção no sinal de autocorrelação fazendo com que a informação transmitida seja recebida erroneamente pelo receptor, o que diminui o desempenho da rede OCDMA.

Foi proposto um método para sintonia dos parâmetros do FA de maneira a melhorar o desempenho do algoritmo para a aplicação em questão. Essa sintonia visa ajustar as variáveis que realizam controle de atratividade e aleatoriedade e os resultados obtidos mostraram que a utilização dos parâmetros sintonizados reduz o NMSE e faz com que o algoritmo atinja a convergência em um número menor de iterações.

Também se realizou uma análise das redes OCDMA 2-D e 3-D sob influência de diferentes parâmetros, bem como a utilização do controle de potência baseado em FA para vários cenários. Foi possível observar, além dos impactos adversos dos efeitos *near-far* e da variação da temperatura ambiente, que o controle de potência se mostra eficaz para atenuação desses efeitos através da compensação das perdas de potência ocasionada por estes fatores.

Foi possível observar que quando a rede OCDMA utiliza códigos tridimensionais, a variação da temperatura ambiente acarreta uma perda de potência causada pela distorção do pico do sinal de autocorrelação. Pôde-se observar também que, mesmo com a redução da MAI proporcionada por esses códigos, o efeito *near-far* ainda se apresenta como um dos principais fatores que causam perda de potência e consequente degradação do desempenho da rede. Esse fato reforça a necessidade da realização de um controle de potência eficiente, que possa vir a compensar os efeitos e melhorar a qualidade na transmissão dos dados nas redes ópticas.

Por fim, foi abordada uma comparação entre os resultados obtidos pelo FA e pelo PSO para o controle de potência considerando cenários de rede semelhantes. Os resultados mostraram que o FA possui um desempenho melhor ou igual aos outros algoritmos tanto em termos de número de iterações até a convergência quanto em termos do NMSE por iteração.

Como os resultados indicam a utilização do algoritmo do enxame de vaga-lumes é uma opção viável e de baixo custo computacional para a realização do controle da potência visando atenuar os efeitos da variação da temperatura ambiente em redes OCDMA 2-D e 3-D com configurações como as utilizadas nas simulações realizadas.

6.1 TRABALHOS PRODUZIDOS

Com os resultados obtidos por esse trabalho foi possível a submissão dos seguintes artigos:

CAVALI T. S.; DURAND, F. R.; ABRÃO, T. Atenuação dos efeitos da temperatura ambiente em redes OCDMA 2-D utilizando controle de potência baseado em algoritmo de enxame de vaga-lumes. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. 35. **Anais...** São Pedro, SP: SBrT. Set. 2017. (Aceito para publicação)

CAVALI T. S.; DURAND, F. R.; SCALASSARA, P. R.; ABRÃO, T. Power Allocation Scheme for Mitigation of Fiber Temperature Fluctuations in OCDMA Networks based on Firefly Algorithm. Submetido para o periódico **Journal of Optical Communications and Networking**.

6.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Existem na literatura poucos trabalhos relacionados aos efeitos da variação da temperatura ambiente nas redes OCDMA, portanto existe ainda um amplo campo a ser estudado para análise desses efeitos nas redes ópticas. O algoritmo do enxame de vaga-lumes também se mostra relativamente novo quando comparado a outras meta-heurísticas como PSO e ACO, por isso cabe estudar novas variações desse algoritmo.

Uma das variações a ser utilizada é a utilização de diferentes métodos para a sintonia de parâmetros e comparação com a abordagem utilizada nesse trabalho. Um exemplo de abordagem é a utilização do LFA, alterando a forma de controle da

aleatoriedade do algoritmo. Pode-se também realizar um controle da atratividade através da utilização de funções aleatórias, como proposto em Zhang et al. (2016).

A utilização de versões modificadas do FA também é uma variação a ser estudada. Exemplos dessas modificações estão presentes em Hackl, Magele e Renhart (2016) que utilizam agrupamento dos vaga-lumes e em Xiao e Hatanaka (2016) que propõem um algoritmo híbrido FA-PSO. A utilização dessas versões modificadas apresentou desempenho satisfatório para as aplicações propostas nos trabalhos citados anteriormente. Sendo assim, são abordagens que podem vir a apresentar bons resultados se aplicadas ao problema de controle de potência em redes OCDMA.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, T. et al. Multiple Access Network Optimization Aspects via Swarm Search Algorithms. In: **Search Algorithms and Applications**. [s.l.]: InTech, 2011.

ADANIYA, M. H. A. C. et al. Firefly Algorithm in Telecommunications. In: **Bio-Inspired Computation in Telecommunications**. Waltham: Elsevier, 2015. p. 43–72.

AMER, B.; NOURELDIN, A. RSS-based indoor positioning utilizing Firefly algorithm in Wireless Sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER ENGINEERING & SYSTEMS (ICCES), Cairo. **Proceedings...** Cairo: IEEE, dec. 2016. p. 329-333.

BRUZA ALVES, T. A. et al. Power Allocation Scheme for OCDMA NG-PON With Proportional–Integral–Derivative Algorithms. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 8, n. 9, p. 645-655, sep. 2016.

CHUNG, F. R. K.; SALEHI, J. A.; WEI, V. K. Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 35, n. 3, p. 595–604, 1989.

DE PAULA MARQUES, M.; DURAND, F. R.; ABRÃO, T. WDM/OCDM Energy-Efficient Networks Based on Heuristic Ant Colony Optimization. **IEEE Systems Journal**, v. 10, n. 4, p. 1482–1493, 2014.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. **Ant Colony Optimization**. Cambridge, MA: MIT Press, 2004, 321 p.

DOS REIS JUNIOR, J. V. et al. Mitigation of environmental temperature variation effects using fuzzy systems and source-matched spreading codes for OCDMA networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS. **Proceedings...**Graz, Austria: IEEE, 2014. p. 5-8.

DOS SANTOS, A. J. **Estudo de alocação de recursos em redes ópticas WDM/OCDM baseada em inteligência de enxame de partículas**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

DOS SANTOS, A. J.; DURAND, F. R.; ABRÃO, T. Mitigation of Environmental Temperature Variation Effects in OCDMA Networks Using PSO Power Control. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 7, n. 8, p. 707–717, 2015.

DOS SANTOS FILHO, R. V. B. **Análise de Sistemas CDMA Ópticos**. 2006. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

DURAND, F.; ABRÃO, T. Distributed SNIR Optimization Based on the Verhulst Model in Optical Code Path Routed Networks With Physical Constraints. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 3, n. 8, p. 683–691, 2011.

DURAND, F. R. et al. The effects of polarization mode dispersion on 2D wavelength-hopping time spreading code routed networks. **Photonic Network Communications**, v. 20, n. 1, p. 27–32, 2010.

DURAND, F. R.; ABRÃO, T. Energy-Efficient Power Allocation for WDM/OCDM Networks With Particle Swarm Optimization. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 5, n. 5, p. 512–523, 2013.

DURAND, F. R.; ABRÃO, T. Time-delay and estimation uncertainty impact on the heuristic-based power control of optical networks. **Optical and Quantum Electronics**, v. 48, n. 1, p. 1–22, 2016.

ELKAMCHOUCI, H. M.; ELRAGAL, H. M.; MAKAR, M. A. Power Control in CDMA System using Particle Swarm Optimization. In: NATIONAL RADIO SCIENCE CONFERENCE, 24. 2007, Cairo. **Proceedings...** Cairo: IEEE, mar. 2007. p. 1-8.

FOULI, K.; MAIER, M. OCDMA and optical coding: Principles, applications, and challenges. **IEEE Communications Magazine**, v. 45, n. 8, p. 27–34, 2007.

GHAFOURI-SHIRAZ, H.; KARBASSIAN, M. M. **Optical CDMA Networks**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. 424 p.

GHOSH, G.; ENDO, M.; IWASAKI, T. Temperature-Dependent Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Optical fiber glasses. **Journal of Lightwave Technology**, v. 12, n. 8, p. 1338–1342, 1994.

HACKL, A.; MAGELE, C.; RENHART, W. Extended firefly algorithm for multimodal optimization. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL APPARATUS AND TECHNOLOGIES (SIELA), 19., 2016, Bourgas. **Proceedings...** Bourgas: IEEE, may 2016. p. 1-4.

HUNG, H. L. et al. Performance of PTS-based firefly algorithm scheme for PAPR reduction in SFBC MIMO-OFDM communication systems. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER, CONSUMER AND CONTROL (IS3C), 2016, Xi'an. **Proceedings...** Xi'an: IEEE, 2016. p. 854-857.

JYOTI, V.; KALER, R. S. Design and implementation of 2-dimensional wavelength/time codes for OCDMA. **Optik**, v. 122, n. 10, p. 851–857, 2011.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle Swarm Optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 1995, Piscataway. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, 1995. p. 1942-1948.

KILPER, D. et al. Optical Networks Come of Age. **Optics and Photonics News**, v. 25, n. 9, p. 50, sep. 2014.

KIM, S.; YU, K.; PARK, N. New family of space/wavelength/time spread three-dimensional optical code for OCDMA networks. **Journal of Lightwave Technology**, v. 18, n. 4, p. 502–511, 2000.

LALWANI, P.; GANGULI, I.; BANKA, H. FARW: Firefly algorithm for Routing in wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN INFORMATION TECHNOLOGY (RAIT), 2016, Dhanbad. **Proceedings...**Dhanbad: IEEE, mar. 2016. p. 248-252.

LI, X.; FAN, P.; SHUM, K. W. Construction of space/wavelength/time spread optical code with large family size. **IEEE Communications Letters**, v. 16, n. 6, p. 893–896, 2012.

MCGEEHAN, J. E. et al. 3D Time-Wavelength-Polarization OCDMA Coding for Increasing the Number of Users in OCDMA LANs. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE, 2004, Los Angeles, CA. **Proceedings...** Los Angeles, CA: Optical Society of America, 2004.

MOHAMMED, H. J. et al. Evaluation of genetic algorithms, particle swarm optimisation, and firefly algorithms in antenna design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYNTHESIS, MODELING, ANALYSIS AND SIMULATION METHODS AND APPLICATIONS TO CIRCUIT DESIGN (SMACD), 2016, Lisboa. **Anais...**Lisboa: IEEE, jun. 2016.

NEDJA, N.; MOURELLE, L. DE M. Swarm Intelligent Systems. In: **Studies in Computational Intelligence**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. v. 26. 197 p.

OSADOLA, T. B. et al. Effect of Variations in Environmental Temperature on 2D-WH/TS OCDMA Code Performance. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 5, n. 1, p. 68, 1 jan. 2013a.

OSADOLA, T. B. et al. Investigating the influence of thermal coefficients on 2-D WH/TS OCDMA code propagation in optical fiber. In: CONFERENCE ON LASERS & ELECTRO-OPTICS EUROPE & INTERNATIONAL QUANTUM ELECTRONICS CONFERENCE CLEO EUROPE/IQEC, 2013, Munique. **Proceedings...** Munique: IEEE, may 2013b.

PAL, S. K.; RAI, C. S.; SINGH, A. P. Comparative Study of Firefly Algorithm and Particle Swarm Optimization for Noisy Non-Linear Optimization Problems. **International Journal of Intelligent Systems and Applications**, v. 4, n. 10, p. 50–57, 2012.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N.; SASAKI, G. H. **Optical Networks: A Practical Perspective**. 3. ed. Burlington: Elsevier, 2010. 928 p.

RAO, S. S. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 829 p.

RAVI KUMAR, M.; PATHAK, S. S.; CHAKRABARTI, N. B. Design and analysis of three-dimensional OCDMA code families. **Optical Switching and Networking**, v. 6, n. 4, p. 243–249, 2009.

STÁBILE FILHO, M. **Controle de Potência em Redes Ópticas de Múltiplo Acesso OCDMA**. 2011. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2011.

STOK, A.; SARGENT, E. H. Lighting the local area: optical code-division multiple access and quality of service provisioning. **IEEE Network**, v. 14, n. 6, p. 42–46, 2000.

TARHUNI, N. G. et al. Power control of optical CDMA star networks. **Optics Communications**, v. 259, n. 2, p. 655–664, 2006.

XIAO, H.; HATANAKA, T. Heterogenous swarm with first and second order dynamics for function optimization. In: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC), 2016, Vancouver. **Proceedings...Vancouver: IEEE**, jul. 2016. p. 2077-2082.

YANG, X. Firefly Algorithm. In: **Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms**. 1. ed. Frome, UK: Luniver, 2008. 115 p.

YANG, X. Firefly algorithms for multimodal optimization. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**, v. 5792, p. 169–178, 2009.

YANG, X. Firefly Algorithm, Levy Flights and Global Optimization. **Research and Development in Intelligent Systems: Incorporating Applications and Innovations in Intelligent Systems**, v. 26, n. 17, p. 1–10, 2010.

YANG, X. Bat Algorithm for Multiobjective Optimization. **International Journal of Bio-Inspired Computation**, v. 3, n. 5, p. 267–274, 2011.

YANG, X. **Nature-Inspired Optimization Algorithms**. 1. ed. London: Elsevier, 2014. 258 p.

YANG, X.; CHIEN, S. F.; TING, T. O. **Bio-Inspired Computation in Telecommunications**. Waltham: Elsevier, 2015. 333 p.

YANG, X.; HE, X. Firefly algorithm: recent advances and applications. **International Journal of Swarm Intelligence**, v. 1, n. 1, p. 36-50, 2013.

YEH, B.-C.; LIN, C.-H.; WU, J. Noncoherent Spectral/Time/Spatial Optical CDMA System Using 3-D Perfect Difference Codes. **Journal of Lightwave Technology**, v. 27, n. 6, p. 744–759, mar. 2009.

YEN, C.; CHEN, C. BER Analysis Using Beat Probability Method of 3D Optical CDMA Networks with Double Balanced Detection. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, p. 1–6, 2015.

YIN, H.; RICHARDSON, D. J. **Optical Code Division Multiple Access Communication Networks: Theory and Applications**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. 398 p.

ZHANG, L. et al. Modified firefly algorithm using randomized mechanisms. In: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC), 2016, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: IEEE, jul. 2016. p. 169-178.