

Atenuação dos efeitos da temperatura ambiente em redes OCDMA 2-D utilizando controle de potência baseado em algoritmo de enxame de vaga-lumes

Thiago dos Santos Cavali, Fábio Renan Durand e Taufik Abrão

Resumo— Este trabalho apresenta uma abordagem para o controle de potência em redes OCDMA 2-D (tempo/comprimento de onda) considerando os efeitos da variação da temperatura ambiente nas fibras ópticas. O sistema proposto utiliza uma meta-heurística baseada no comportamento de enxames de vaga-lumes para a otimização da potência alocada para cada usuário da rede. Toda a estrutura da rede e do algoritmo de otimização, além das simulações computacionais são desenvolvidas em ambiente MATLAB®. Os resultados obtidos são analisados baseados na variação de parâmetros do código e mostram que o algoritmo utilizado é eficiente para realização do controle de potência nas redes OCDMA.

Palavras-Chave—Redes Ópticas, Algoritmo do Enxame de Vaga-Lumes, Controle de Potência.

Abstract—This paper presents an approach for power control in OCDMA 2-D (Time/Wavelength) networks taking in account the adverse effects of environmental temperature variation in optical fibers. The proposed system uses a meta-heuristic based on behavior of firefly swarms to optimize the allocated power for each user in the network. The network structure and the optimization algorithm, as well the computational simulations are implemented in MATLAB® environment. The obtained results are analyzed based on variation in code parameters and show that the algorithm is efficient to realize the power control in OCDMA networks.

Keywords—Optical Networks, Firefly Algorithm, Power Control.

I. INTRODUÇÃO

A utilização da fibra óptica para transmissão de informações apresenta diversas vantagens, dentre elas a grande capacidade de comunicação, baixa atenuação, imunidade a interferência eletromagnética, abundância de matéria-prima e potencial de redução de custo de fabricação [1][2]. As vantagens da utilização das fibras ópticas como meio de transmissão, aliadas com o 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 [3].

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 [2][3]. 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 com uma potência maior o sinal transmitido se comparado aos nós mais distantes [2]. Esse problema causa uma degradação da Relação Sinal-Ruído e Interferência (SNIR – *Signal to Noise Ratio*), 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 [4].

Existem diversos fatores que prejudicam o desempenho de uma rede óptica, sendo que esses fatores podem ter seus efeitos amenizados através da utilização de algoritmos de alocação de recursos que controlam, por exemplo, a potência para cada nó da rede. Essa alocação de recursos aumenta o desempenho e a utilização da rede, podendo ser realizada através da otimização da SNIR [4]. Um dos efeitos que afetam a qualidade de transmissão das redes OCDMA é a variação da temperatura ambiente. Esse efeito é geralmente difícil de ser determinado e amenizado de maneira precisa para as redes que utilizam códigos 2-D (tempo/comprimento de onda) devido a sua grande flutuação e dinâmica natural [5][6]. 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* [3][5].

A atenuação dos efeitos da variação da temperatura ambiente vem sendo estudada para redes OCDMA com códigos em duas dimensões (OCDMA 2-D) e diferentes propostas surgiram para esse fim. Em [5] há a proposta de mudanças no projeto do código a ser utilizado, tendo em vista que com uma redução do espaçamento de canal da rede os efeitos da variação da temperatura ambiente são reduzidos de maneira significativa. Já em [7] um controle de potência baseado em lógica *fuzzy* realiza o ajuste dos pesos de código da rede considerando a leitura de sensores externos que medem a temperatura na fibra. Em [8] é realizado o controle dinâmico da potência do sinal óptico transmitido através de algoritmos de enxames de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*) e de colônia de formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*). 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) [8].

Os trabalhos citados anteriormente mostram que o controle da potência transmitida através de um ajuste baseado diretamente na SNIR desejada pode atenuar de maneira dinâmica os efeitos adversos da variação da temperatura ambiente em uma rede óptica, além de ser uma solução de baixo custo e complexidade [3][8]. Nesse contexto o objetivo deste trabalho é propor a utilização de um algoritmo de otimização baseado em enxames de vaga-lumes para realizar o controle de potência na transmissão de dados nas redes

Thiago dos Santos Cavali e Fábio Renan Durand, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Cornélio Procopio-PR, Brasil, E-mails: thiagocavali@utfpr.edu.br, fabiodurand@utfpr.edu.br.

Taufik Abrão, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina – PR, Brasil, E-mail: taufik@uel.br.

OCDMA visando atenuar dinamicamente os efeitos da variação da temperatura ambiente.

O restante do trabalho é organizado da seguinte maneira: Na seção II são abordados aspectos relacionados às redes OCDMA 2-D, na seção III são tratados os efeitos da variação da temperatura ambiente e na seção IV é descrita a estratégia de controle proposta. Resultados numéricos são mostrados na seção V e, por fim, as conclusões são apresentadas na seção VI.

II. REDES OCDMA 2-D

Nesse trabalho, a rede utilizada é constituída por $K \times K$ nós ligados entre si através de um acoplador estrela passivo de acordo com a estrutura vista na Figura 1.

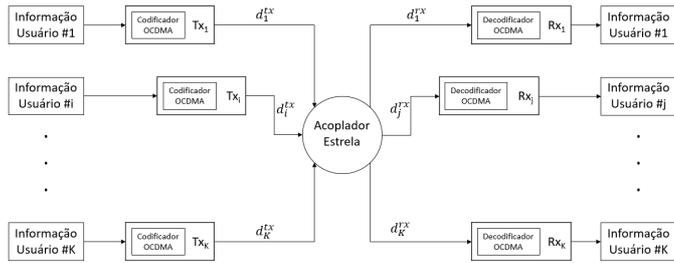


Fig. 1. Arquitetura da rede OCDMA 2-D

Na topologia mostrada na Fig. 1 os nós transmissores (Tx) e receptores (Rx) criam um caminho virtual baseado no código. Considerando essa distribuição dos nós, a potência recebida pelo j -ésimo nó é dada por [8]:

$$P_{rj} = \alpha_{estrela} p_i e^{\alpha_f d_{ij}} \quad (1)$$

sendo p_i a potência transmitida pelo i -ésimo nó transmissor, α_f a atenuação da fibra (em km^{-1}), $\alpha_{estrela}$ a atenuação do acoplador estrela (em unidades lineares) e d_{ij} a distância entre um nó Tx e um Rx [8][9].

Por características de viabilidade, os equipamentos considerados para a rede podem ser fabricados utilizando plataformas com tecnologias disponíveis de baixo custo, robustas e leves [8].

A rede em questão faz uso de uma codificação na qual os códigos são baseados em comprimentos de onda e no tempo, sendo os códigos chamados de 2-D WH/TS (2D Wavelength-Hopping/Time-Spreading), já que essa combinação proporciona maior flexibilidade na escolha dos códigos ópticos aumentando a capacidade do sistema [10]. Um código bidimensional pode ser representado por $(N_A \times N_T, \omega, I_a, I_c)$, que consiste em um conjunto de matrizes binárias $N_A \times N_T$, onde N_A simboliza o número de comprimentos de onda disponíveis para transmissão dos códigos e N_T o comprimento do código. Esses códigos possuem peso ω , restrição de auto correlação I_a e restrição de correlação cruzada I_c [2].

III. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE

Nas redes OCDMA 2-D os efeitos da variação da temperatura ambiente ocorrem devido ao fato de os cabos da rede estarem enterrados a uma profundidade de 60 a 120 cm, estando sujeitos à variações de temperatura de $\pm 20^\circ \text{C}$ [11].

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 e o comprimento do *link*. O efeito da variação na temperatura ambiente na envoltória (S_t) do sinal de autocorrelação assumindo cada pulso de comprimento de onda com uma forma Gaussiana é dado por [5]:

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

Onde P_p é uma constante que representa a potência de pico da envoltória do sinal, τ é o comprimento do *chip*, Δt é a variação de temperatura que induz a distorção temporal e $\Delta\tau$ é o encolhimento do comprimento de pulso para cada pulso de comprimento de onda. Por fim, a potência perdida pela variação de temperatura ambiente é definida por $P_{\Delta T} = S_t / \omega$ [8]. A divisão por ω ocorre devido ao fato de o pico do sinal de autocorrelação para códigos 2-D com peso de código ω ser ω para um caso ideal [5].

IV. CONTROLE DE POTÊNCIA COM ALGORITMO DO ENXAME DE VAGA-LUMES

A. 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 transmitem com uma potência maior quando comparado aos nós mais distantes, sendo essa condição chamada efeito *near-far*. Sendo assim, se faz necessário um controle de potência que possa ser realizado de maneira a atenuar dinamicamente as perdas causadas por esse efeito 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 [8][9].

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 [9]:

$$\min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} J(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} \mathbf{1}^T \mathbf{p} = \min_{p_i \in \mathbb{R}_+} \sum_{i=1}^K p_i \quad (3)$$

Sujeito à:

$$\Gamma_i \geq \Gamma^*, \quad P_{\min} \leq p_i \leq P_{\max} \quad (4)$$

Onde $\mathbf{1}^T = [1, \dots, 1]$, p_i é a potência transmitida pelo i -ésimo nó, Γ^* simboliza a CINR (Relação Portadora-Interferência mais Ruído) alvo e Γ_i é a CINR do i -ésimo nó. Vale Ressaltar que a CINR se relaciona com a SNIR (γ) em termos de N_T e do valor médio de correlação cruzada ρ , ou seja, $\gamma = (N_T / \rho)^2 \Gamma$ [8].

Utilizando notações matriciais, pode-se descrever a CINR como sendo $[I - \Gamma^* H] p \geq u$, onde I é a matriz identidade, H é a matriz de interferência normalizada e u é a potência do ruído. Substituindo a desigualdade por uma igualdade é possível determinar o vetor potência otimizado $p^* = [I - \Gamma^* H]^{-1} u$ sendo que a inversão matricial equivale a existência de um nó de controle de potência central que fornece todas as informações sobre a arquitetura da rede física, como a distância entre os nós da rede e a dinâmica do tráfego de pacotes [8,9].

Como alternativa para a alocação de potência em redes OCDMA pode-se utilizar a seguinte função custo [12]:

$$J(p) = \max \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F_k^{\text{lim}} \left(1 - \frac{p_k}{P_{\text{max}}} \right) \quad (5)$$

Sujeito à:

$$\begin{aligned} \gamma_k &\geq \gamma_k^*, \quad 0 < p_k^l \leq P_{\text{max}}, \quad R^l = R_{\text{min}}^l \\ \forall k \in K_l \text{ e } \forall l = 1, 2, \dots, L \end{aligned} \quad (6)$$

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 . F_k^{lim} é a função limiar, sendo igual a 1 para os nós nos quais $\gamma_i \geq \gamma^*$ e 0 caso contrário.

B. Algoritmo do Enxame de Vaga-Lumes

O algoritmo do enxame de vaga-lumes (FA – *Firefly Algorithm*) 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 [13]. O FA se baseia na ideia de associar o 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. Esse movimento é realizado de maneira que a cada iteração do algoritmo um vaga-lume com menos brilho se movimenta em direção a um mais brilhante. [14].

As principais variáveis de controle do algoritmo são a atratividade (β), o coeficiente de absorção do meio (γ), a aleatoriedade (α), o número de vaga-lumes e um parâmetro de controle da aleatoriedade (θ). Para mais detalhes e formulação matemática do algoritmo podem ser consultados [13] e [14].

V. RESULTADOS

A rede utilizada para as simulações é caracterizada por códigos ópticos (8 × 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 I. 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 [8] e [12].

TABELA I. PARÂMETROS DO SISTEMA

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_o – Largura de Banda Óptica	100 [GHz]
f – Frequência da luz	193 [THz]
d_{ij} – Comprimento do Link	4:50 [km]
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

A. Determinação de parâmetros otimizados para o FA

De maneira a determinar os parâmetros otimizados do FA para o controle de potência em redes OCDMA 2-D e comparar o desempenho desse algoritmo com o método matemático da inversão de matrizes, foram feitas simulações utilizando MATLAB®. A metodologia adotada é baseada na utilizada em [15] e consiste no ajuste dos parâmetros número de vaga-lumes, θ , α , β e γ , sendo que a avaliação de desempenho é feita levando em conta o número de iterações até a convergência do FA para o valor ótimo de potência transmitida e o Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE – *Normalized Mean Square Error*) entre o valor ótimo e o valor obtido. O NMSE é calculado por [8]:

$$NMSE = E \left[\frac{\|p - p^*\|^2}{\|p\|^2} \right] \quad (7)$$

Onde $\|\cdot\|$ é a norma euclidiana e $E[\cdot]$ é o operador esperança.

Na abordagem adotada a potência transmitida utilizada para o cálculo da NMSE é obtida a partir de uma média de 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 5×10^{-4} .

Para o ajuste dos valores dos parâmetros citados anteriormente o processo de otimização foi dividido em quatro etapas, consistindo na determinação do valor otimizado para: número de vaga-lumes e θ (considerando $\alpha = \beta = \gamma = 1$), α , β e γ . Após a análise de desempenho *versus* erro, foi possível chegar nos valores mostrados na Tabela II.

B. Utilização do FA para controle de potência

Após a determinação dos parâmetros otimizados para o FA foram feitos testes para verificação da eficácia do controle de potência utilizando o algoritmo proposto. Esses testes se basearam na metodologia adotada em [8] que consiste em uma

TABELA II. VALORES OTIMIZADOS PARA OS PARÂMETROS DO FA

Parâmetro	Valor Otimizado
Número de vaga-lumes	20
θ	0,965
α	0,8
β	0,2
γ	0,1

verificação da eficácia do controle de potência com base na variação dos parâmetros da rede OCDMA e dos códigos 2-D mostrados na Tabela I.

O primeiro cenário considerado foi a variação da temperatura ambiente. Os resultados obtidos para essa condição podem ser vistos na Fig. 2 e consideram uma rede com 4 nós distribuídos em uma área de 4:50 km dividida em distância do transmissor até o acoplador e distância do acoplador até o receptor, além de um código 2-D com espaçamento espectral de 0,4 nm e 0,8 nm.

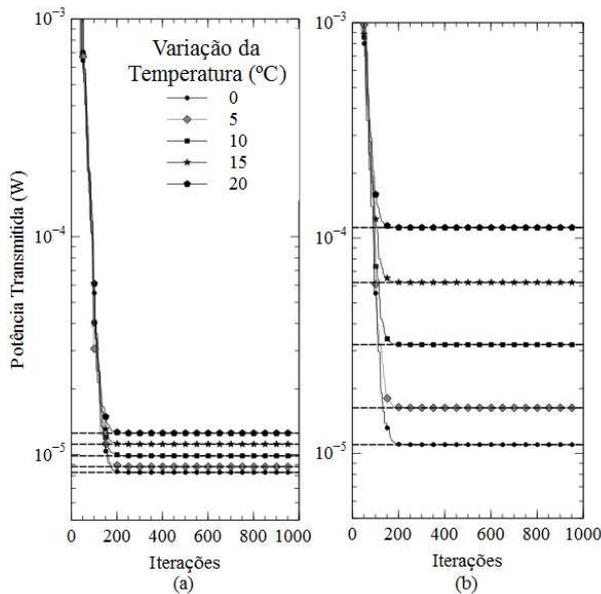


Fig. 2. Potência Transmitida por iteração do FA considerando variação da temperatura ambiente e um espaçamento espectral de 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b)

Na Fig. 2 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 dos valores da potência transmitida estimada pelo FA para os valores calculados via inversão matricial. Pode-se perceber também 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. Outra observação a ser feita é a influência do espaçamento espectral tendo em vista que ao realizar uma comparação da Fig. 2 (a) com a Fig. 2 (b) é notório 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 composta por 8 nós. Esse cenário é mostrado na Fig.

3 e considera os 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 a potência obtida via inversão de matrizes é representada pelas linhas tracejadas horizontais para efeito de comparação.

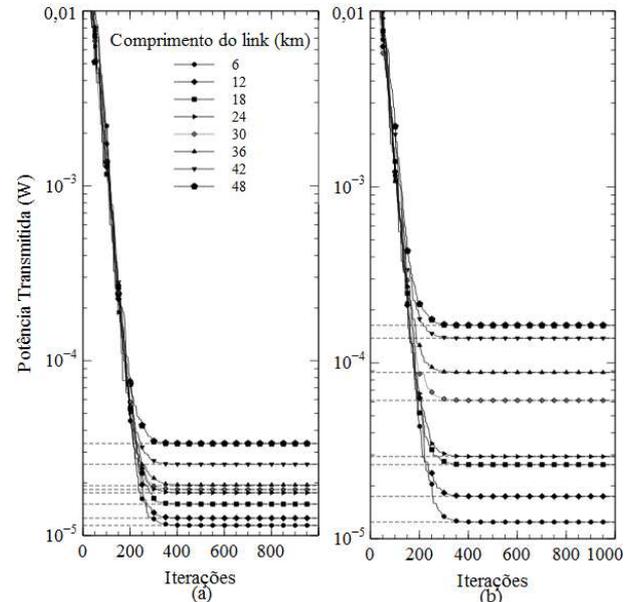


Fig. 3. Potência transmitida por iteração do FA considerando variação no comprimento do *link* para espaçamento espectral de 0,4 nm (a) e 0,8 nm (b)

Novamente pode-se perceber que os resultados do FA convergem para os resultados obtidos pela inversão de matrizes em todos os cenários 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 atenuar o efeito *near-far*, melhorando o desempenho da rede. A análise da influência do espaçamento espectral é similar à realizada para a Fig. 2.

A próxima análise a ser feita se refere à qualidade dos resultados obtidos. Essa análise se baseia no NMSE a cada iteração e na variação do número de usuários da rede e os resultados podem ser vistos na Fig. 4. Considera-se uma variação de temperatura fixa de 20° C para todos os nós da rede, uma distribuição uniforme dos nós em uma área de 4 até 50 km e códigos com espaçamento espectral de 0,4 nm.

Na Fig. 4 pode-se perceber que o NMSE começa com um valor alto e diminui com o passar das iterações. 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 mesmo após a convergência. Esse resultado mostra a qualidade do FA na busca pelo valor ótimo, já que mesmo após atingir a convergência há uma busca pela diminuição do erro para a rede com 4 usuários, sendo que próximo a iteração 1000 o NMSE apresenta uma ordem de 10⁻²⁴. Para as redes com 8 e 12 nós, no qual o NMSE se estabiliza após a convergência, o valor do erro é bastante pequeno quando comparado a outras abordagens presentes na literatura. Pode-se observar também que 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 [8].

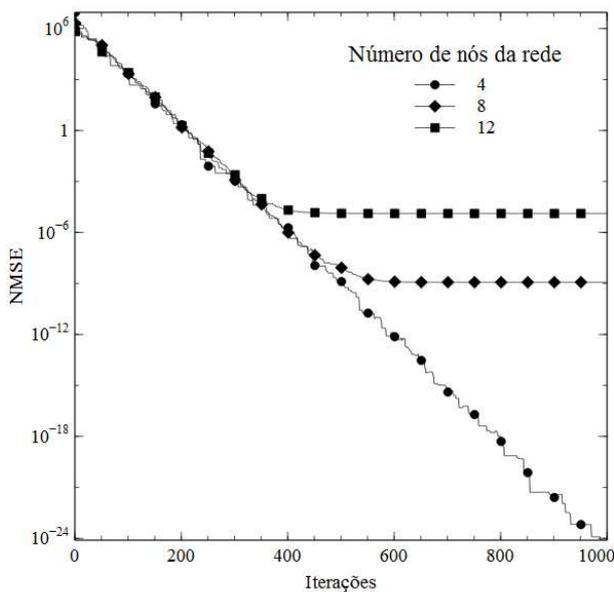


Fig. 4. NMSE por iteração considerando a utilização do FA para controle de potência em uma rede com 4, 8 e 12 usuários.

Através da comparação dos resultados obtidos pelo FA com os presentes em [8] que utiliza PSO e ACO como algoritmos para controle de potência, pode-se observar que com a utilização do FA é possível a obtenção de resultados melhores ou iguais ao PSO em termos de iterações até a convergência. Além disso, ao se considerar a evolução do NMSE por iteração, o FA apresenta resultados significativamente melhores quando comparados tanto ao PSO quanto ao ACO. Vale ressaltar que as redes utilizadas para as simulações em [8] apresentam parâmetros similares aos utilizados nas simulações mostradas nesse trabalho.

Pode-se concluir, portanto, que a utilização do algoritmo dos vaga-lumes é uma boa opção para o controle da potência de uma rede OCDMA com uma configuração como a utilizada nessas simulações.

VI. CONCLUSÕES

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 dimensões. Esse controle de potência se mostra importante já que a variação de temperatura ambiente causa distorção no sinal de autocorrelação fazendo com que a informação transmitida seja recebida erroneamente pelo receptor, o que diminui o desempenho da rede.

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

Realizou-se então simulações com variação nos parâmetros da rede e dos códigos 2-D. Os resultados obtidos mostraram que a potência estimada pelo FA converge com um erro

pequeno para a potência ótima obtida pelo método da inversão de matrizes para todos os cenários considerados. Por fim foi abordada uma comparação entre os resultados obtidos pelo FA e por outros algoritmos como PSO e ACO 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 em termos de número de iterações até a convergência e um desempenho significativamente melhor em termos do NMSE por iteração.

Como os resultados numéricos indicam a utilização do algoritmo dos vaga-lumes é uma opção viável e de baixo custo computacional (já que elimina a necessidade da utilização de métodos numéricos custosos computacionalmente, como a inversão matricial) para a realização do controle da potência transmitida visando atenuar dinamicamente os efeitos da variação da temperatura ambiente em uma rede OCDMA 2-D com uma configuração como a utilizada nas simulações realizadas.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Kilper, K. Bergman, V. W. S. Chan, I. Monga, G. Porter, and K. Rauschenbach, "Optical Networks Come of Age," *Opt. Photonics News*, vol. 25, no. 9, p. 50, Sep. 2014.
- [2] H. Yin and D. J. Richardson, *Optical Code Division Multiple Access Communication Networks: Theory and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] A. J. dos Santos, "Estudo de alocação de recursos em redes ópticas WDM/OCDM baseada em inteligência de enxame de partículas," Universidade Estadual de Londrina, 2015.
- [4] F. Durand and T. Abrão, "Distributed SNIR Optimization Based on the Verhulst Model in Optical Code Path Routed Networks With Physical Constraints," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 8, pp. 683–691, 2011.
- [5] T. B. Osadola, S. K. Idris, I. Glesk, and W. C. Kwong, "Effect of Variations in Environmental Temperature on 2D-WH/TS OCDMA Code Performance," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 1, p. 68, Jan. 2013.
- [6] T. B. Osadola, S. K. Idris, I. Glesk, and W. C. Kwong, "Investigating the influence of thermal coefficients on 2-D WH/TS OCDMA code propagation in optical fiber," in *2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC*, 2013, vol. 73, pp. 1–1.
- [7] J. V. Dos Reis Junior, T. R. Raddo, A. L. Sanches, and B. H. V Borges, "Mitigation of environmental temperature variation effects using fuzzy systems and source-matched spreading codes for OCDMA networks," in *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2014, 16th ed., pp. 5–8.
- [8] A. J. dos Santos, F. R. Durand, and T. Abrão, "Mitigation of Environmental Temperature Variation Effects in OCDMA Networks Using PSO Power Control," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 8, pp. 707–717, 2015.
- [9] N. G. Tarhuni, T. O. Korhonen, M. S. Elmusrati, and E. Mutafungwa, "Power control of optical CDMA star networks," *Opt. Commun.*, vol. 259, no. 2, pp. 655–664, 2006.
- [10] R. V. B. Dos Santos Filho, "Análise de Sistemas CDMA Ópticos," Universidade de São Paulo, 2006.
- [11] G. Ghosh, M. Endo, and T. Iwasaki, "Temperature-Dependent Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Optical fiber glasses," *J. Light. Technol.*, vol. 12, no. 8, pp. 1338–1342, 1994.
- [12] F. R. Durand and T. Abrão, "Energy-Efficient Power Allocation for WDM / OCDM Networks With Particle Swarm Optimization," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 5, pp. 512–523, 2013.
- [13] X. Yang, "Firefly Algorithm," in *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, 1st ed., Frome, UK: Luniver, 2008, p. 115.
- [14] X. Yang, S. F. Chien, and T. O. Ting, *Bio-Inspired Computation in Telecommunications*. Waltham: Elsevier, 2015.
- [15] M. H. A. C. Adaniya *et al.*, "Firefly Algorithm in Telecommunications," in *Bio-Inspired Computation in Telecommunications*, Waltham: Elsevier, 2015, pp. 43–72.