

SINTONIA ADAPTATIVA DE ALGORITMOS PID DE CONTROLE DE POTÊNCIA EM REDES NG-PON BASEADO EM PSO

Layhon R. R. dos Santos, Fábio Renan Durand e Taufik Abrão

Resumo—Nesse trabalho é proposta a sintonia adaptativa de um algoritmo de controle distribuído de potência baseado no controlador *Proporcional-Integral-Derivativo* DPCA-FM-PID (*Distributed Power Control Algorithm-Foschini/Miljanic*), através da otimização por enxame de partículas (PSO - *Particle Swarm Optimization*). O controle de potência é aplicado em uma rede óptica passiva da nova geração 40GE-OCDMA-PON (*Optical Code Division Multiplexing Access - Passive Optical Network*). Os principais resultados com relação a qualidade das respostas e velocidade de convergência ilustram a superioridade do algoritmo com a sintonia adaptativa baseada em PSO com relação ao mesmo algoritmo sem sintonia adaptativa, mesmo quando se consideram erros de estimativas do canal.

Palavras-Chave—Sintonia adaptativa, algoritmo de controle DPCA-FM-PID, otimização por enxame de partículas (PSO), redes ópticas passivas nova geração (NG-PON).

Abstract—In this work the adaptive tuning of a distributed power control algorithm based on the Distributed-Integral-Derivative DPCA-FM-PID (*Distributed Power Control Algorithm-Foschini / Miljanic*) controller is proposed through optimization by particle swarm (PSO). Power control is applied to a passive optical network of the new generation 40GE-OCDMA-PON (*Optical Code Division Multiplexing Access - Passive Optical Network*). The main results regarding the quality of the responses and convergence speed illustrate the superiority of the algorithm with the adaptive tuning based on PSO with respect to the same algorithm without adaptive tuning, even when considering channel estimation errors.

Keywords—Adaptive tuning, control algorithm DPCA-FM-PID, particle swarm optimization (PSO), new generation passive optical networks (NG-PON).

I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas passivas (PON - *Passive Optical Networks*) vem se consolidando como uma tecnologia de acesso em banda larga e de integração com redes móveis em função de seu desempenho e boa relação custo-benefício [1]. A evolução das redes PON de próxima geração (NG-PONs-*Next-Generation PON*) são caracterizadas em três estágios: NG-PON1 baseada na multiplexação por divisão de tempo (*TDM-Time Division Multiplexing*) [2]; NG-PON2 baseada na multiplexação híbrida por divisão de comprimento de onda e tempo (*WDM-Wavelength Division Multiplexing-TDM*) [3]; e a NG-PON3 que pode ser baseada em tecnologias híbridas

ou individuais como WDM, multiplexação ortogonal por divisão de frequência (*OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e acesso múltiplo por divisão de códigos ópticos (*OCDMA - Optical Code Division Multiple Access*), além de empregar técnicas de modulação avançadas [4]. A tecnologia OCDMA, empregando técnicas de modulação avançada, vem sendo investigada devido as características de operação assíncrona, alta flexibilidade de rede, transparência e simplicidade de protocolos e características de segurança [5].

O desempenho das redes NG-PON3 baseadas na tecnologia OCDMA está relacionado com a alocação de recursos, como o controle da potência transmitida em cada unidade da rede óptica (ONU - *Optical Network Unit*). O controle de potência influencia vários aspectos da rede como a diminuição da interferência entre os sinais transmitidos da ONUs, o aumento da vazão da rede, bem como o aumento da eficiência energética [1]-[5]. Nesse contexto em [5] foram investigados algoritmos de controle de potência distribuídos (DPCAs-*Distributed Power Control Algorithms*) baseados no modelo de Foschini/Miljanic (FM) e Verhulst (V) e proposta a utilização de DPCAs baseados no controle proporcional-integral-derivativo (PID) para redes NG-PON3 com arquitetura 40GE-OCDMA-PON. O controle DPCA-PID proposto apresentou resultados superiores aos DPCA-FM e DPCA-V com o mesmo custo computacional.

O DPCA-FM (*Distributed power control algorithms Foschini/Miljanic*) [6]-[8] é inspirado em um esquema de atualização linear que soluciona uma equação diferencial relacionada ao controle de potência transmitido [6], enquanto o DPCA-V (*Distributed power control algorithms Verhulst proportional-integral-derivative*) descreve o comportamento de indivíduos de uma determinada espécie, considerando limitações de espaço físico e alimentos, relacionados ao crescimento populacional [11]-[13].

Na teoria de controle clássico o controlador DPCA-FM e DPCA-V podem ser representados por um controlador integral [9]. Em [5] os termos derivativos e proporcionais foram acrescentados com o objetivo de obter maior capacidade de controle, caracterizando como algoritmos de controle PID [10], DPCAs-PID.

A qualidade das respostas obtidas dos algoritmos DPCAs-PID, estão diretamente relacionadas a sintonia dos ganhos proporcionais (K_p), integrais (K_i) e derivativos (K_d). No âmbito das técnicas tradicionais de sintonia PID, normalmente são utilizadas por Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, método de Chien-Hrones-Reswick (CHR) e outros. Esses métodos apre-

Layhon R. R. dos Santos e Fábio Renan Durand, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Cornélio Procópio, Brasil, E-mails: lay.lyns@hotmail.br e fabiodurand@utfpr.edu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e CNPq.

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

sentam resultados aproximados de K_p , K_i e K_d , que são refinados através da experiência do especialista [14]. Porém sistemas em que é desconhecido a função de transferência ou não é possível realizar manipulações para obtenção de curvas de reações, os métodos anteriores nem sempre são factíveis, sendo então as metaheurísticas aplicadas para solução de problemas relativamente complexos em tempo computacional aceitável [15].

Assim, propõe-se nesse artigo a investigação de um método de sintonia adaptativa dos ganhos (K_p , K_i e K_d) para o controlador DPCA-FM-PID através da otimização por enxame de partículas (PSO-*Particle Swarm Optimization*) devido a capacidade de soluções de problemas por esse método de otimização. Neste sentido, é importante destacar que o desconhecimento da função de transferência da rede 40GE-OCDMA-PON implica na necessidade de métodos mais sofisticados de sintonia dos ganhos do controle PID [5].

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: o modelo do sistema e formulação do problema são apresentados na Seção II; o esquema baseado na otimização por enxame de partículas (PSO) é descrito na Seção III; a metodologia empregada na sintonia dos ganhos é discutida na Seção IV; os resultados numéricos são apresentados na seção V; finalmente, as principais conclusões são discutidas seção VI.

II. MODELO DO SISTEMA E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A. Arquitetura de rede 40GE-OCDMA-PON

Os principais aspectos de configuração da rede foram extraídos de [4]-[5]. Assim, adota-se a configuração de 32 ONUs, e em cada ONU deseja-se determinar a potência mínima necessária de acordo com os níveis de qualidade de serviço (QoS -*Quality of Service*) para operação do sistema e redução da interferência por múltiplo acesso (MAI - Multiple Access Interference) [21]. A tecnologia do OCDMA permite a alocação de uma ilimitada quantidade de usuários, porém o aumento da quantidade de usuários resulta em aumento da MAI. Para redução de MAI adota-se então a transmissão na potência mínima de acordo com os níveis de QoS, que resulta em aumento da taxa de transferência de dados em um mesmo canal.

B. Algoritmo de controle de potência.

Os algoritmos de controle DPCAs possuem habilidades de executar o controle de potência em cada ONU, baseado no nível de SNIR (*signal-to-interference-plus-noise ratio*), ajustando as potências de controle através de um processo de iterações, baseado na SNIR atual (γ) e na SNIR desejada (γ^*). Essas iterações resultam na minimização de erros $e_i[n]$ que em DPCA-FM são dados por:

$$e_i[n] = \left[1 - \frac{\gamma^*}{\gamma[n]} \right] p_i[n-1], \quad (1)$$

A função de transferência e equação de diferenças do algoritmo de distribuição de potência DPCA-FM-PID é apresentada posteriormente na equações (2) e (3):

$$\frac{P_i(z)}{E_i(z)} = -K_p - \frac{K_i}{1+z^{-1}} - K_d(1-z^{-1}) \quad (2)$$

$$P_i[n] = P_i[n-1] - K_p(e_i[n] - e_i[n-1]) - K_i(e_i[n]) - \dots - K_d(e_i[n] - 2e_i[n-1] + e_i[n-2]) \quad (3)$$

C. Signal-to-Noise plus Interference (SNIR)

As definições dos níveis de QoS, estão relacionados com a probabilidade da taxa de erro de bit (BER-*Bit Error Rate*), que diminui de acordo com a SNIR. Sendo assim o QoS pode ser especificado de acordo com a SNIR [13].

A SNIR está presente na função de erro apresentada o algoritmo de controle o DPCA-FM-PID apresentado anteriormente na equação (1) e é dada por:

$$\gamma_i = \frac{N^2}{\rho^2} \Gamma_i, \quad (4)$$

onde ρ^2 a variância para as amplitudes da correlação cruzada, N é quantidade de entradas e saídas AWG no domínio do tempo e Γ_i a taxa de interferência na portadora CIR (*carrier-to-interference ratio*) [5].

D. Incertezas

Os procedimentos de estimação de canal estão baseados nas incertezas atualizadas e relacionadas com os erros estimados no nó receptor. São obtidas utilizando uma distribuição aleatória de ϵ , que realiza o monitoramento da rede e acrescentadas no canal G_u (canal de erros estimados). A razão da matriz G é dada por $(1 + \epsilon)$ com $\epsilon, \in [-\delta \ \delta]$ [22].

III. PSO - OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS.

O PSO é um algoritmo inspirado no comportamento dos animais que convivem em bando e se favorecem das informações compartilhadas [23].

Como se trata de uma meta-heurística, o PSO assume poucas ou nenhuma hipótese a cerca do problema em questão, podendo não garantir soluções ótimas em todos os casos [25].

As soluções candidatas são obtidas através das variáveis de projeto (com uma ou mais dimensões, nesse caso, são três: a proporcional K_p ; integral K_i ; e derivativa K_d). Onde cada variável é formada por um conjunto de indivíduos (candidatos) que percorrem um espaço de exploração, na busca de melhor resposta avaliando a qualidade do custo através de uma função de *fitness*, que são determinados pelo especialista do problema em questão, onde são capazes mensurar critérios de desempenho. A posição de deslocamento de cada partícula é dada pelas seguintes equações:

$$p_{id}(t) = p_{id}(t-1) + v_{id}(t-1) \quad (5)$$

$$v_{id}(t+1) = \omega \times v_{id}(t) + \phi_1 \times rand_{id}() \dots (p_{id}^{best}(t) - p_{id}(t)) \dots + \phi_2 \times rand_{id2}() (p_{gd}^{best}(t) - p_{id}(t)) \quad (6)$$

onde: p_{id} é a posição da partícula; v_{id} a velocidade da partícula; $p_{gd}^{best}(t)$ a melhor posição global das partículas; ϕ_2 a constante de intensidade de deslocamento (melhor posição global/aceleração global/constante social); $p_{id}^{best}(t)$ a melhor posição da partícula; ϕ_1 a constante de intensidade de deslocamento (melhor posição da partícula/aceleração local/constante

cognitivo); w é o peso inercial, responsável por uma busca mais explorativa, balanceando a consulta global e local [23]-[24].

O funcionamento do PSO é descrito adiante no algoritmo 1.

Algoritmo 1: FUNCIONAMENTO DO PSO.

```

1 início
2   inicia enxame de partículas (elementos aleatórios);
3   avalia partículas (fitness) e atualiza gBest;
4   inicia iterações;
5   repita
6     move partículas;
7     avalia partículas;
8     atualiza pbest;
9     atualiza gbest;
10  até fim iterações;
11 fim
12 retorna indivíduos com melhor custo

```

IV. METODOLOGIA

Para a sintonia dos ganhos (K_p , K_i e K_d) do controlador DPCA-FM-PID são gerados os dados da rede considerando o acréscimo de erros na estimativa do canal para incertezas de 0%, 10%, 20% e 30%.

Adota-se como função *fitness* no PSO, o cálculo normalização do erro quadrático médio acumulada dos 32 usuários ($NMSE^2$). A $NMSE$ é dada por:

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

onde: n é o número de iterações [1, 500]; p vetor de potências calculadas através do controlador DPCA-FM-PID; e p^* vetor das potências ótimas calculadas pelo método de inversão de matrizes.

O vetor de potências ótimas (p^*) é obtido através do método de inversão de matrizes, onde $p^* = [I - \Gamma^* H]^{-1} u$.

O objetivo dos indivíduos gerados através do PSO, é minimizar a função ($NMSE^2$) para maior velocidade no processo de convergência da potência para os valores ótimos (p^*).

Para a análise do comportamento das partículas ao longo das iterações será utilizado a somatória da distância euclidiana média $\overline{\sum (euc_{n_{ij}})}$ da última iteração, relacionando o melhor ponto com os demais (exploradores), que é definida por:

$$\overline{\sum (euc_{n_{ii}})} = \frac{1}{n_i} \sum_{n_{ii}=1}^{n_i} \dots \sqrt{(K_p^* - K_{pn_{ii}})^2 + (K_i^* - K_{in_{ii}})^2 + (K_d^* - K_{dn_{ii}})^2} \quad (8)$$

onde n_{ii} é cada indivíduo do algoritmo PSO (que resulta na combinação das dimensões, K_p , K_i e K_d). Sendo possível verificar se o algoritmo estagnou em um mínimo local. Essa técnica no PSO mostra-se eficiente para situações que não é possível verificar graficamente a exploração dos indivíduos para dimensões superiores a três.

A. Topologias adotadas no PSO para sintonia dos controladores.

Através de análises na etapa de sintonia, ajustou-se faixa de exploração dos indivíduos (ganhos do controlador) entre [-4,4], respectivamente ΔK_p , ΔK_i e ΔK_d . E para efeito de análises e busca de melhores ganhos, adotou-se a variação de ϕ_1 e ϕ_2 , considerando uma população de 40 indivíduos com limite de n_i iterações.

As configurações das topologias candidatas Tp podem ser verificadas adiante na tabela I.

TABELA I

CONFIGURAÇÃO DAS TOPOLOGIAS ADOTADAS NO PSO

Tp	ϕ_1	ϕ_2	n_i	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
1	0,1	0,8	50	[-4,4]	[-4,4]	[-4,4]
2	0,5	0,5	50	[-4,4]	[-4,4]	[-4,4]
3	0,8	0,1	50	[-4,4]	[-4,4]	[-4,4]

V. RESULTADOS NUMÉRICOS.

Nessa etapa serão analisados os comportamentos durante a sintonia dos controladores, através do PSO. Após esta etapa serão analisados as repostas obtidas para as melhores sintonias dos controladores DPCA-FM-PID. Em seguida serão realizadas comparações com os ganhos obtidos em [5]. Uma transmissão de 40Gbps é assumida para cada ONU, comprimento do *link* remoto das OLTs de 40Km e ligação remota para ONUs distribuída uniformemente em um raio de 2 e 50Km. Os parâmetros da rede podem ser verificados adiante na tabela II.

TABELA II

PARÂMETROS DO SISTEMA

Variável	Valor
α_f : coeficiente de atenuação da fibra	0.2 dB/km
d_{ij} : comprimento dos <i>link</i>	[42 : 90]km
h : constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ J/Hzs
f : frequência da luz	193,1THz
B_o : banda óptica	100GHz
n_{sp} : fator de emissão espontânea	2
G_{amp} : amplificador de fibra dopada com érbio	20dB
R_c : taxa de chip	320Gchips
N : comprimento do código	64
R_i : taxa de bit individual	40Gbps
L_{AWG} : perdas de AWG	16dB
L_{Bragg} : perdas de Bragg	6,7dB
P_{min} : mínima potência transmitida	-100dBm
P_{max} : máxima potência transmitida	20dBm
γ^* : SNIR desejada	20dB

A. Análises das sintonias dos controladores utilizando o PSO e repostas do controle de potência.

A partir das topologias estipuladas na tabela I foram obtidos os valores de K_p , K_i e K_d e $\overline{\sum (euc_{n_{30}})}$ registrados adiante tabela III. Nela é possível verificar que a variação dos parâmetros ϕ_1 e ϕ_2 está diretamente relacionada a exploração das partículas nas suas faixas de operações. Com uma maior influência de grupo, conforme apresentado em Tp_1 , todos indivíduos convergem para um mínimo local, pois apresentam

uma menor exploração quantificada por $\sum(\overline{euc_{n_{ii}}})$. Já com influência mais equilibrada conforme apresentado em T_{p2} , verificou-se $\sum(\overline{euc_{n_{ii}}})$ mediana em relação as demais, enquanto T_{p3} com menor influência de grupo, realizou uma maior exploração. Nesse contexto, as explorações dos indivíduos determinam: um menor *fitness*; e diversidade de ganhos estáveis.

Adiante na tabela III e figura 1 é possível verificar a dinâmica de exploração dos indivíduos e retorno dos *fitness*. Em T_{p1} , devido a maior influência do grupo ao explorar regiões promissoras (região de mínimo local), ocorre retorno de *fitness* superiores para incertezas de 0% e 10%, porém o mesmo não ocorrer para as incertezas de 20% e 30% que devido ao maior acréscimo de incertezas, faz-se necessário explorar novas regiões de mínimos locais.

TABELA III
GANHOS RESULTANTES DO CONTROLADOR DPCA-PID-FM.

T	$\epsilon\%$	K_p	K_i	K_d	$\sum(\overline{euc_{n_{ii}}})$	$(NMSE)^2$
T_{p1}	0	1,8356	0,0043	-0,0016	0,0667	1,0000
T_{p2}	0	1,8244	-0,0128	0,0043	0,4035	1,0000
T_{p3}	0	1,8504	-0,0147	0,0168	1,1342	1,0002
T_{p1}	10	1,8155	-0,0021	-0,0196	0,0635	1,0013
T_{p2}	10	1,7879	-0,0065	-0,0324	0,3301	1,0027
T_{p3}	10	1,8214	-0,0438	0,0013	1,0888	1,0017
T_{p1}	20	1,7808	-0,0205	-0,0368	0,0622	1,0056
T_{p2}	20	1,7899	-0,0213	-0,0246	0,3529	1,0062
T_{p3}	20	1,7943	-0,0575	-0,0030	1,1652	1,0048
T_{p1}	30	1,7410	-0,0292	-0,0365	0,0637	1,0113
T_{p2}	30	1,7655	-0,0521	-0,0121	0,3700	1,0080
T_{p3}	30	1,7804	-0,1402	-0,0035	1,1428	1,0092

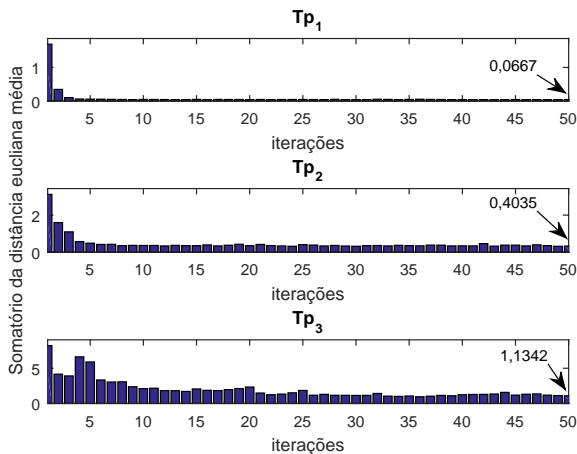


Fig. 1. $\sum(\overline{euc_{n_{ii}}})$ do processo de sintonia do controlador DPCA-FM-PID, sem incertezas (tabela III).

Já na comparação de T_{p2} e T_{p3} , verifica-se que o *fitness* T_{p3} é superior para incertezas de 10% e 20%. Enquanto T_{p2} apresenta superioridades nos *fitness* para incertezas de 0% e 30%. Nessa situação é possível verificar que o coeficiente de grupo com menor atuação em relação a T_{p1} , está diretamente relacionado a robustez proporcionada por cada partícula, ou seja, a promissora é capaz de absorver as não linearidades, por isso não ocorre coerência, entre T_{p2} e T_{p3} , dos coeficientes de grupos e mínimos locais em relação as incertezas do sistema.

O desempenho dos melhores ganhos das topologias candidatas (tabela III), são apresentados adiante nas tabelas IV e V. Já o controle de potência na figura 2 e a normalização do erro quadrático médio (*NMSE*) na figura 4.

TABELA IV
PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO DPCA-FM-PID. - PARTE A.

$\epsilon\%$	T	MO%	i_{MO}	σ_{MO}	σ_{MO}^2
0	T_{p1}	0,2037	2	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$2,61 \cdot 10^{-8}$
10	T_{p2}	2,5472	3	0,0138	$1,90 \cdot 10^{-4}$
20	T_{p3}	4,4037	3	0,0240	$5,77 \cdot 10^{-4}$
30	T_{p2}	5,3839	3	0,0278	$7,73 \cdot 10^{-4}$

TABELA V
PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO DPCA-FM-PID. - PARTE B.

$\epsilon\%$	T	i_s	σ_s	σ_s^2	i_a	σ_a	σ_a^2
0	T_{p1}	2	0	0	4	0,2540	0,0645
10	T_{p2}	3	0,4568	0,2087	10	2,0633	4,2571
20	T_{p3}	3	0,4709	0,2218	14	3,9549	15,6461
30	T_{p2}	3	0,4568	0,2087	12	3,0559	9,3387

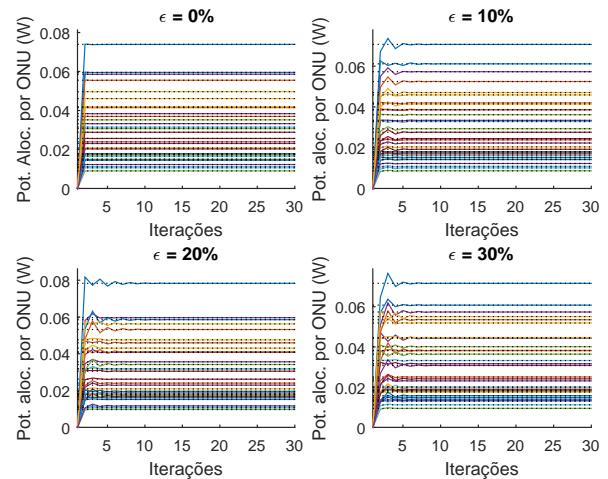


Fig. 2. Controle de potências DPCA-FM-PID dos melhores ganhos para cada incerteza, conforme tabela III, obtidos através PSO. Em 0% T_{p1} , 10% T_{p2} , 20% T_{p3} e 30% T_{p2} .

B. Comparações da sintonia adotada em [5] e PSO

A partir da sintonia dos ganhos do controlador DPCA-FM-PID adotados em [5], para $K_p = 0,5$, $K_i = K_d = 0,2$ obteve o controle de potência e normalização do erro quadrático médio, conforme ilustrado adiante, respectivamente nas figuras 3 e 4.

O controle de potência para os ganhos determinados através PSO demonstrou capacidade de controle e superioridade aos ganhos de [5]. Com os ganhos de [5] os controles de potência presença de estimativas de erros no canal (para $\epsilon = 10\%$, 20% e 30%) não convergiram, e na ausência embora tenha convergido, os critérios (tais como iterações de subida, de assentamento e o *NMSE*) possuem desempenhos inferiores.

A ocorrência de robustez na sintonia adaptativa dos ganhos através do PSO é justificada pela capacidade fornecer ganhos não-lineares (tabela III) para o controlador DPCA-FM-PID.

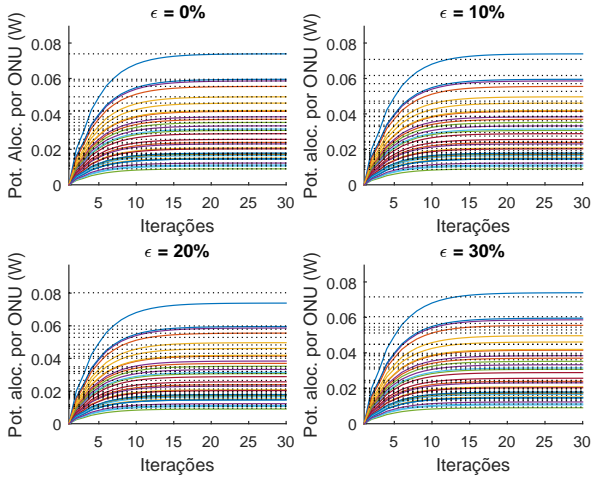


Fig. 3. Controle de potências DPCA-FM-PID para cada incerteza a partir dos ganhos obtidos em [5].

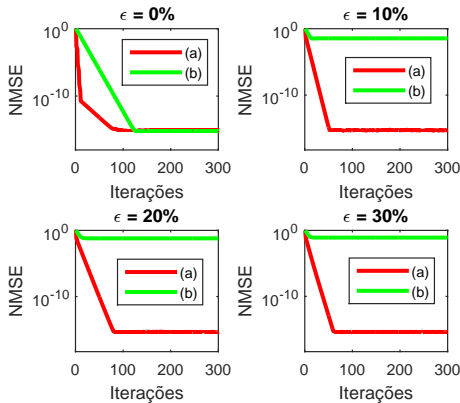


Fig. 4. Normalização do erro quadrático médio para cada incerteza de estimativa de erros no canal. Onde: (a) $NMSE$ dos melhores ganhos para cada incerteza, conforme tabela III, obtidos através PSO; e (b) $NMSE$ dos ganhos obtidos em [5].

VI. CONCLUSÕES

A sintonia adaptativa do PSO no controlador DPCA-FM-PID mostrou-se eficiente para o controle de potência das ONUs na arquitetura de rede 40GE-OCDMA-PON, demonstrando capacidade de controle na presença de erros no canal e aumento do desempenho de todos os critérios de projeto especificados nesse artigo para ausência de erros no canal. Embora na ausência de erros no canal apresente overshoot, as iterações de subida e de assentamento demonstraram convergência superior para o controle de potência. Acrescentando robustez ao processo de sintonia devido a absorção das não linearidades provocadas pela estimativa de erros no canal.

REFERÊNCIAS

[1] M. Maier, M. Levesque, L. Ivanescu. "NG-PONs 1 & 2 and beyond: the dawn of the uber-FiWi network". *IEEE Network* 26(2), 2012.
 [2] J. I. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, R. Davey, S. Rodrigues. "Next-generation PON-part I: Technology roadmap and general requirements". *IEEE Communications Magazine* 47(11), 2009.
 [3] M. Maier. "Survivability techniques for NG-PONs and FiWi access networks". In: *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on. IEEE*, p. 6214-6219, 2012.

[4] R. Matsumoto, T. Kodama, S. Shimizu, R. Nomura, K. Omichi, N. Wada, K. I. Kitayama. "40G-OCDMA-PON system with an asymmetric structure using a single multi-port and sampled SSFBG encoder/decoders". *Journal of Lightwave Technology*, 32(6), 1132-1143, 2014.
 [5] T. A. B. Alves, et al. "Power allocation scheme for OCDMA NG-PON with proportional-integral-derivative algorithms". *Journal of Optical Communications and Networking* 8.9 (2016): 645-655.
 [6] G. J. FOSCHINI and Z. MILJANIC. "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence". *IEEE transactions on vehicular Technology*, v. 42, n. 4, p. 641-646, 1993.
 [7] J. ZANDER. "Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems". *IEEE transactions on vehicular technology*, v. 41, n. 1, p. 57-62, 1992.
 [8] F. R. DURAND, B. A. ANGÉLICO and T. ABRÃO. "Increasing energy efficiency in OCDMA network via distributed power control". *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 11, n. 1, p. 39-55, 2012.
 [9] D. U. Campos-Delgado, J. M. Luna-Rivera, F. J. Martinez-Lopez. "Distributed power control algorithms in the uplink of wireless code-division multiple-access systems". *IET Control Theory Applications* 4(5), 2010, 795-805: 645-655.
 [10] K. H. Ang, G. Chong, Y. Li. "PID control system analysis, design, and technology". *IEEE transactions on control systems technology* 13(4), 2005, 559-576.
 [11] P. F. VERHULST. "Notice sur l'histoire de la population poursuit dans son accroissement". *Correspondance*, 1838.
 [12] L. R. GARCIA, et al. "The Impact of Geographic Distribution in Passive Optical Network with Optical CDMA". *IEEE Latin America Transactions*, v. 13, n. 7, p. 2152-2158, 2015.
 [13] T. J. GROSS, T. ABRÃO e P. J. E. JESZENSKY. "Algoritmo de Controle de Potência Distribuído Fundamentado no Modelo Populacional de Verhulst". DOI: 10.14209/jcis. 2006.5. *Journal of Communication and Information Systems*, v. 21, n. 1, 2006.
 [14] L. H. S. de ANDRADE, B. L. G. COSTA e B. A. ANGÉLICO. "PSO aplicado à sintonia do controlador PI/PID da malha de nível de uma planta didática industrial". *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Fortaleza CE, 13 a 17 de outubro de 2013.
 [15] R. VALERDI. "Heuristics for systems engineering cost estimation". *IEEE Systems Journal*, v. 5, n. 1, p. 91-98, 2011.
 [16] L. G. KAZOVSKY et al. "Next-generation optical access networks". *Journal of lightwave technology*, v. 25, n. 11, p. 3428-3442, 2007.
 [17] G. KRAMER and G. PESAVENTO. "Ethernet passive optical network (EPON): building a next-generation optical access network". *IEEE Communications magazine*, v. 40, n. 2, p. 66-73, 2002.
 [18] K. FOULI and M. MAIER. "Ocdma and optical coding: Principles, applications, and challenges [topics in optical communications]". *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 8, p. 27-34, 2007.
 [19] S. AYOTTE et al. "Experimental verification and capacity prediction of FE-OCDMA using superimposed FBG". *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 2, p. 724-731, 2005.
 [20] S. KIM, K. YU and N. PARK. "A 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.
 [21] J. A. SALEHI. "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks. I. Fundamental principles". *IEEE transactions on communications*, v. 37, n. 8, p. 824-833, 1989.
 [22] F. R. DURAND and T. ABRÃO. "Distributed SNIR optimization based on the Verhulst model in optical code path routed networks with physical constraints". *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 9, p. 683-691, 2011.
 [23] R. EBERHART and J. KENNEDY. "A new optimizer using particle swarm theory". In: *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95, Proceedings of the Sixth International Symposium on. IEEE*, 1995. p. 39-43.
 [24] T. SILVEIRA, H. OLIVEIRA e L. SILVA. "Controle de inércia para fuga de mínimos locais de funções não-lineares na otimização por enxame de partículas". *ENCONTRO NACIONAL DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (ENIA'09)*, VII, Bento Gonçalves, p. 739-748, 2009.
 [25] G. F. DE MEDEIROS e M. KRIPKA. "Algumas aplicações de métodos heurísticos na otimização de estruturas". *Revista CIATEC-UPF*, v. 4, n. 1, p. 19-32, 2012.