

The Impact of Geographic Distribution in Passive Optical Network with Optical CDMA

L. R. Garcia, L. C. de Melo, D. Vechia, T. S. Cavali, F. R. Durand and T. Abrão

Abstract— This work analyses the performance of the optical code division access passive optical network (OCMDA-PON) with power control mechanisms under the perspective of geographic distribution of the multiple access interference (MAI). The impact of the geographic interference distribution on the power consumption network, as well as the robustness of the deployed power control Verhulst-based algorithm are investigated as a function of the quality of the power control response and the convergence speed feature of the algorithm.

Keywords— Passive optical network, code division access passive optical network, power control.

I. INTRODUÇÃO

A TECNOLOGIA OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) apresenta-se como uma solução promissora para acomodar o tráfego heterogêneo das redes ópticas passivas PON (*Passive Optical Network*) de acesso [1][2]. Este tráfego é caracterizado por apresentar requisitos distintos de QoS (*Quality of Service*), ou seja, taxa de erro de bit BER (*Bit Error Rate*), atraso e jitter, de acordo com o serviço utilizado (voz, dados, multimídia, etc...) [1-3]. Em sistemas OCDMA cada nó transmissor enviará a informação com o código do nó receptor de interesse. No nó receptor, ocorrerá o processo de correlação entre todos os códigos que foram transmitidos e o código alocado para este receptor, resultando em interferência de acesso múltiplo MAI (*Multiple Access Interference*) [2]. Os códigos ópticos podem ser classificados em não-coerentes e coerentes, sendo que os não-coerentes utilizam modulação em amplitude e os coerentes empregam modulação em amplitude e fase [2]. Os códigos coerentes são códigos bipolares (1,-1) e ortogonais e os códigos não-coerentes são unipolares (1,0) e pseudo-ortogonais. Desta forma, os códigos coerentes apresentam uma maior relação sinal-interferência SIR (*Signal Interference Ratio*), entretanto apresentam uma maior complexidade tecnológica [2-4]. Dentre os principais sistemas OCDMA não-coerentes pode-se citar a codificação espectral de amplitude, espalhamento temporal e codificação bidimensional (2D) [5]. Neste contexto, os sistemas com codificação 2D compostos por espalhamento temporal e salto em frequência

(comprimento de onda) tem sido intensamente investigados em função de apresentarem desempenho superior aos demais sistemas não-coerentes e flexibilidade [2-5].

Nos nós das redes OCDMA existe a diferença entre a potência recebida em função da diferença de distância em que os nós transmissores estão distribuídos [6][7]. Este tipo de problema é semelhante ao problema *near-far* existente nas comunicações sem-fio. Nas redes OCDMA o balanço de potência realizado tem intuito de garantir que a potência recebida por todos os usuários seja equalizada, porém a penalidade de potência existente em função da MAI varia de acordo com o número de nós que estão transmitindo instantaneamente [8]. Desta forma, o controle de potência tem o intuito de garantir que a equalização da potência recebida ocorra de forma dinâmica e independente do número de nós que estejam transmitindo instantaneamente [6,7]. O problema do controle de potência pode ser resolvido com a adaptação de técnicas analíticas provenientes de sistemas sem-fio, tais como o modelo clássico proposto por Foschini [7,8] e baseado no crescimento populacional de Verhulst [9]. Por outro lado, algumas técnicas numéricas vêm sendo utilizadas [10,11], porém apresentam maior complexidade computacional quando comparadas com técnicas analíticas-iterativas [6-11].

Estudos preliminares sobre o controle de potência em redes ópticas de acesso consideram a distribuição geográfica, ou seja, a distância entre os nós da rede e o ponto de distribuição do sinal óptico baseada em uma distribuição uniforme [6,7,12], porém este tipo de distribuição pode não apresentar exatidão com todos os padrões de redes utilizados [12] ou redes ópticas reais [13]. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar do controle de potência em redes de acesso PON considerando diferentes cenários de distribuição geográfica dos nós da rede. Desta forma, será investigado o impacto da distribuição geográfica no consumo de potência da rede óptica e robustez do algoritmo de controle de potência empregado. Para tanto, será empregado um algoritmo de controle de potência baseado na técnica de Verhulst, que é baseado no crescimento populacional de uma espécie biológica com restrições de espaço e alimento, em função da qualidade das respostas obtidas e velocidade de convergência [9].

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção II é apresentada a arquitetura da rede investigada. Na Seção III é ilustrada a metodologia empregada na análise de desempenho. Na Seção IV são apresentados e discutidos os principais resultados. Na Seção V são discutidas as principais conclusões obtidas no trabalho.

II. ARQUITETURA DA REDE

A arquitetura geral de uma rede óptica passiva PON

L. L. Garcia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, lukas.ricken@gmail.com.

L. C. de Melo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, larissamelo@alunos.utfpr.edu.br.

D. Vechia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, danielvechia@alunos.utfpr.edu.br.

T. S. Cavali, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, cavali.thiago@gmail.com.

F R Durand, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil, fabiodurand@utfpr.edu.br.

Taufik Abrão, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, taufik@uel.br.

consiste de várias unidades de rede óptica ONU (*Optical Network Unit*) localizadas nas residências/escritórios dos usuários da rede, conforme ilustra a Fig. 1. As ONUs são interligadas por meio de um ou mais estágios de nós distribuidores RN (*Remote Node*) com o terminal óptico OLT (*Optical Line Terminal*), geralmente localizado no escritório

central CO (Central Office). O OLT é empregado para conectar a PON com serviços de voz, vídeo e dados provenientes de MANs e WAN [1].

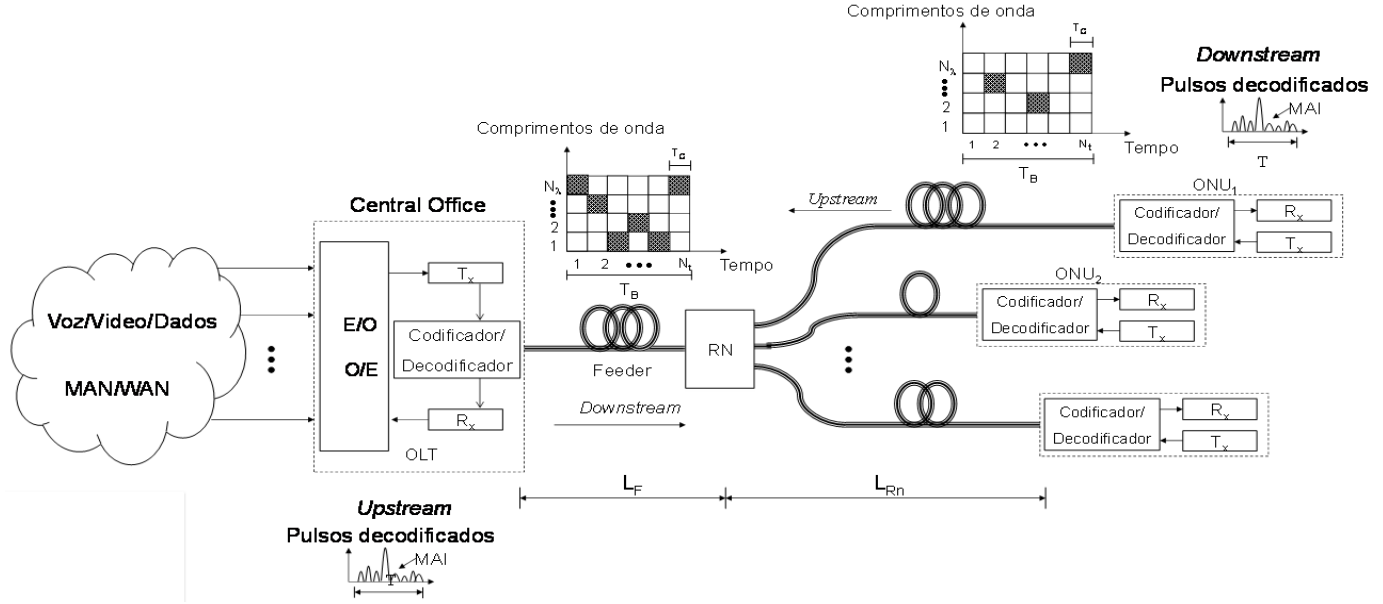


Figura 1. Arquitetura da rede de acesso OCDMA-PON.

A tecnologia empregada nos RN são dispositivos passivos, tais como estrela passiva [2], que é utilizada para agrupamento/distribuição dos canais de *upstream/downstream*. Na operação de *downstream* que é originada na OLT com destino para as ONUs é empregada a operação de difusão (*broadcast-and-select*), por outro lado na operação de *upstream* que é originada nas ONUs com destino para a OLT é empregada a operação de acesso múltiplo por divisão de códigos ópticos (OCDMA) [1]. Por características de viabilidade, todos os equipamentos utilizados na rede como codificadores/decodificadores, transmissores/receptores e acopladores em estrela são plataformas tecnológicas de baixo custo e disponíveis comercialmente [14].

No processo de transmissão e recepção das informações é estabelecido um caminho virtual baseado no código óptico com comprimento total dado por $d_{ij} = d_A + d_i^{RN}$, sendo d_A a distância entre o OLT e o RN e d_i^{RN} a distância entre as ONUs e o RN. As distâncias (d_i^{RN}) entre as ONUs e o RN podem apresentar vários cenários de distribuição geográfica, neste trabalho serão comparados três possíveis cenários: (i) Cenário real que é obtido por meio da extração dos dados de um mapa; (ii) Cenário estimado por uma distribuição de Poisson e (iii) Cenário estimado por uma distribuição Uniforme. A média (λ) das distâncias é obtida por meio de

$$\lambda = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K d_i^{RN} \quad (1)$$

A potência recebida na OLT é dada por $P_{rj} = a_{star} p_i(-\alpha_f d_{ij})$, sendo p_i a potência transmitida pela ONU_j, α_f é a atenuação da fibra (km^{-1}) e a_{star} é atenuação do acoplador em estrela (unidade linear). As perdas do acoplador em estrela são dadas por $a_{star} = 10 \log(K) - [10 \log_2(K) \log_{10} \delta]$ em dB, sendo δ as perdas do acoplador e K o número total de ONUs [6].

Os códigos 2D são representados por matrizes $N_\lambda \times N_T$, sendo N_λ o número de linhas, que é igual ao número de comprimentos de onda disponíveis, e N_T é o número de colunas, que é igual ao comprimento do código. O comprimento do código é determinado pelo período do bit T_B que é dividido em unidades menores denominadas *chips* com período $T_c = T_B / N_T$. Em cada código existem w pulsos por comprimento de onda que é denominado peso do código. Um código 2D é definido pela relação $(N_\lambda \times N_T, w, \lambda_a, \lambda_c)$, sendo λ_a e λ_c números inteiros que representam as relações de auto-correlação e correlação-cruzada [2].

III. ANÁLISE DE DESEMPENHO

A. Relação Sinal-Interferência

Em sistemas OCDMA com códigos 2D a relação sinal-interferência (SIR) experimentada no decodificador que recebe os canais em *upstream*, que neste caso é situado no OLT, é dado por [9,10]:

$$\gamma_i = \frac{N_T^2 g_{ii} p_i}{\sigma^2 \sum_{j=1, j \neq i}^K g_{ij} p_j + 2\sigma_{sp}^2} \quad (2)$$

sendo N_T o comprimento do código 2D, p_i a potência transmitida pelo nó i (ONU) e g_{ii} é atenuação entre o nó transmissor e receptor. Esta atenuação é dada pela matriz \mathbf{G} que representa as atenuações entre os nós transmissores e receptores:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1K} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{K1} & g_{K2} & \cdots & g_{KK} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Os termos K , p_j , σ^2 e σ_{sp}^2 representam o número de ONUs, potência transmitida pelos demais nós e variância média de interferência dos códigos. Por outro lado, σ_{sp}^2 representa o ruído de emissão espontânea do pré-amplificador ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) em cada polarização da fibra óptica. Este ruído é muito superior ao ruído térmico e balístico no receptor, que podem ser desprezados [6]. Por outro lado, no caso de pequenas distâncias em que não se utiliza pré-amplificador os cálculos correspondem a um pior caso de ruído. A variância em função da ASE é dada por [6]:

$$\sigma_{sp}^2 = n_{sp} h f (G-1) B_o \quad (4)$$

sendo n_{sp} o fator de emissão espontânea, h é a constante de Planck, f é a frequência da portadora óptica, G é o ganho do amplificador e B_o é a largura de banda óptica. Considerando que a MAI apresenta características Gaussianas a probabilidade de erro (BER) para cada classe de nós é dada por $P_b(i) = \text{erfc}(\sqrt{\gamma_i}/2)$, sendo erfc a função de erro complementar.

B. Controle de potência

O controle de potência transmitida em uma rede OCDMA é um problema de otimização [7]. Denominando-se Γ_i a razão entre a potência da portadora pela potência da interferência (CIR) desejada na entrada do decodificador de interesse, tendo em vista obter uma certa QoS associada a BER máxima tolerada para o nó i , e definindo-se o vetor-coluna K -dimensional da potência óptica transmitida $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_K]^T$, então o problema do controle de potência óptico centralizada consiste em encontrar o vetor de potência \mathbf{P} que minimiza a função custo [7]:

$$J(\mathbf{p}) = \mathbf{1}^T \mathbf{p} = \sum_{i=1}^K p_i \quad (5)$$

Sujeito as restrições [7]:

$$\Gamma_i = \frac{g_{ii} p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^K g_{ij} p_j + 2\sigma_{sp}^2} \geq \Gamma^* \quad (6)$$

$$P_{\min} \leq p_i \leq P_{\max} \quad \forall i = 1, \dots, K$$

Γ^* é a CIR mínima para o QoS desejado. Desta forma empregando notação matricial, pode-se reescrever (6) como:

$$[\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}] \mathbf{p} \geq \mathbf{u} \quad (7)$$

sendo \mathbf{I} a matriz identidade de dimensão K , \mathbf{H} é matriz interferência normalizada, na qual os elementos pode ser obtidos por:

$$h_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ \frac{g_{ij}}{g_{ii}}, & i \neq j, \end{cases} \quad (8)$$

sendo os elementos j do vetor \mathbf{u} dado por:

$$\Gamma_i = \frac{2\Gamma^* \sigma_{sp}^2}{g_{ii}} \quad (9)$$

Observe que em (9) é obtida a versão escalar da potência de ruído. Portanto, resolvendo (7) e substituindo a desigualdade pela igualdade, obtém o vetor de potência otimizada por meio de inversão matricial:

$$\mathbf{p}^* = [\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{u} \quad (10)$$

Este vetor representa o equilíbrio de potência no nó receptor de acordo com a CIR requerida, entretanto se uma CIR maior for solicitada deverá ocorrer um aumento de potência transmitida. Neste caso, a potência transmitida pode ser limitada pela disposição de equipamentos transmissores ou limitação de potência transmitida em função da excitação de efeitos não-lineares na fibra óptica. A potência otimizada transmitida por cada nó é obtida pela inversão matricial que representa o controle centralizado de alocação de potência. Desta forma, o controle central deve obter atualização de informações sobre nós ativos na rede, classe de QoS dos nós, características de tráfego, além de conhecer os comprimentos dos enlaces da rede. Estas características tornam o controle centralizado um fator limitador no desempenho da rede OCDMA [6,7]. Por outro lado, os algoritmos de controle de potência distribuídos DPCA (*Distributed Power Control Algorithm*) consistem no desenvolvimento de procedimentos que atuam na evolução do vetor potência para alcançar o valor otimizado $\mathbf{p}^* = [\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{u}$ baseado no conhecimento/ estimativa no próprio nó dos valores de γ_i^* , γ_i and p_i [7]. A solução otimizada do problema de alocação de potência é obtida por meio da equação que representa o equilíbrio de Verhulst [9]:

$$p_i[n+1] = (1 + \alpha)p_i[n] - \alpha \left(\frac{\gamma[n]}{\gamma_i^*} \right) p_i[n], i = 1, \dots, K \quad (11)$$

sendo n o número de iterações e α o fator de convergência que é válido para o intervalo $0 < \alpha < 1$. Em [15] é demonstrada a obtenção de (11), bem como se discute os critérios de convergência e comparação com outros algoritmos. A qualidade das soluções obtidas podem ser definidas em termos da média do erro quadrático normalizado NMSE (*Normalized Mean Squared Error*) calculado por [15]:

$$NMSE[n] = E \left[\frac{\|p[n] - p^*\|^2}{\|p^*\|^2} \right] \quad (12)$$

sendo $\|\cdot\|$ a distância Euclidiana quadrada com a origem e $E[\cdot]$ é o operador esperança. Em cenário real, a estimação da SIR (γ) em cada nó não é perfeita e pode apresentar erros aleatórios. Com intuito de incorporar estas características reais será adicionado um erro aleatório a SIR em cada iteração. A razão entre a SIR estimada e real é dada por $(1 + \varepsilon)$, sendo ε uma variável aleatória uniformemente distribuída entre $[-\delta; +\delta]$, desta forma a SIR estimada em cada iteração é dada por $\hat{\gamma}_i = (1 + \varepsilon)\gamma_i$ [9].

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para obtenção dos resultados foi considerada a utilização de fibras ópticas com 0,2 dB/km de atenuação, RN composto por acoplador em estrela passiva com perdas de 14 dB, $n_{sp} = 2$, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J/Hz, $f = 193,1$ THz, $G = 20$ dB e $B_o = 30$ GHz.

Para obtenção de um cenário real, que será empregado para comparação com os resultados estimados, foram extraídas as distâncias entre os nós (ONUs) e RN baseadas no mapa de densidade residencial da cidade de Eugene, Oregon, EUA [16]. O RN foi posicionado no centro de uma área circular de alta densidade populacional, que consiste de uma solução otimizada em [12]. A OLT apresenta distância fixa de 20 km da RN, desta forma a rede de distribuição pode apresentar distâncias (d_i^{RN}) que podem alcançar até 50 km que é conveniente no caso de PONs de longo alcance [1]. Utilizando como referência os pontos de maior densidade residencial foram estabelecidas 32 regiões circulares com raio de aproximadamente 0,75 km para fixação das ONUs.

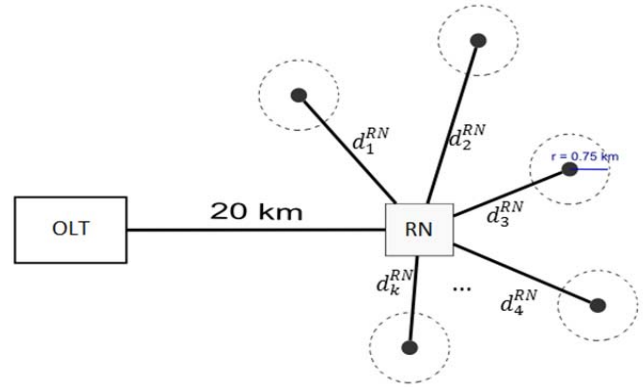


Figura 2. Esquema de uma rede PON baseada na densidade populacional da cidade de Eugene, Oregon, EUA [16].

Os dados extraídos de [16], que será denominado rede real, ilustram uma distância mínima entre ONUs e RN de 2,0 km e uma distância máxima de 11,1 km, com média $\lambda = 6,55$ km. A Fig. 3 ilustra a curva de distribuição de probabilidade para (i) rede real que é obtido por meio da extração dos dados, (ii) Cenário estimado por uma distribuição de Poisson com média $\lambda = 6,55$ km e (iii) Cenário estimado por uma distribuição Uniforme com distância mínima e máxima de 2,0 e 11,1 km.

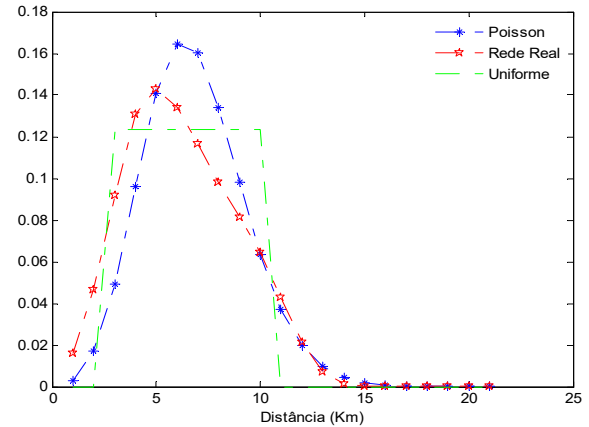


Figura 3. Distribuição de probabilidade em função da distância.

A análise da Fig. 3 possui o objetivo de ilustrar a curva que apresenta maior semelhança com a curva obtida por meio da rede real. Por meio da análise de correlação verifica-se que a correlação entre a distribuição Uniforme e distribuição de Poisson com a distribuição obtida por meio da rede real é de 0,9173 e 0,9387, respectivamente. Portanto, se observa que no contexto estudado a distribuição de Poisson apresenta maior semelhança com uma rede real. A Fig. 4 apresenta as distâncias de cada nó transmissor ao RN (d_i^{RN}).

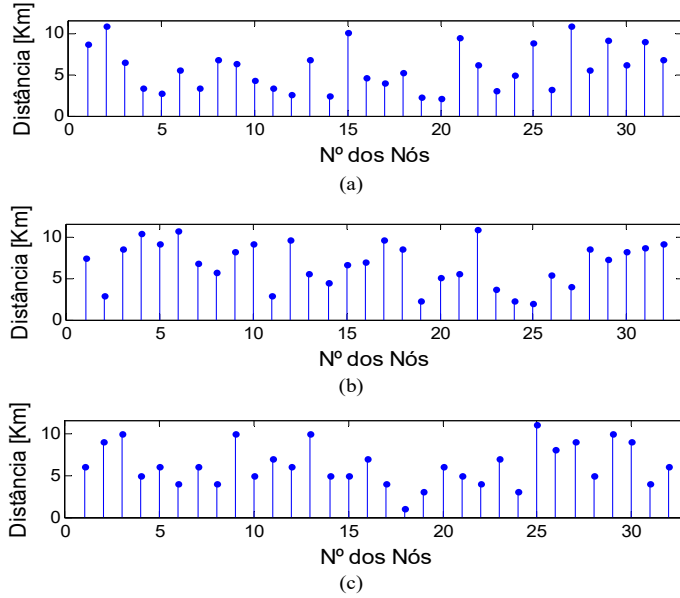


Figura 4. Distância entre os nós transmissores e o acoplador estrela. (a) Rede real. (b) Distribuição Normal. (c) Distribuição de Poisson.

A Fig. 5 apresenta a potência transmitida pelas 32 ONUs considerando os três casos descritos anteriormente utilizando o algoritmo de Verhulst com $\alpha = 0.8$. Este valor de α garante que sejam obtidas qualidade de reposta e velocidade de convergência adequada [9,15]. Por outro lado, as linhas tracejadas representam os valores de potência obtidos com a inversão de matriz (controle centralizado). Observe que as sequências de linhas tracejadas representam os nós da rede, de cima para baixo, conforme ilustra a Fig. 5.

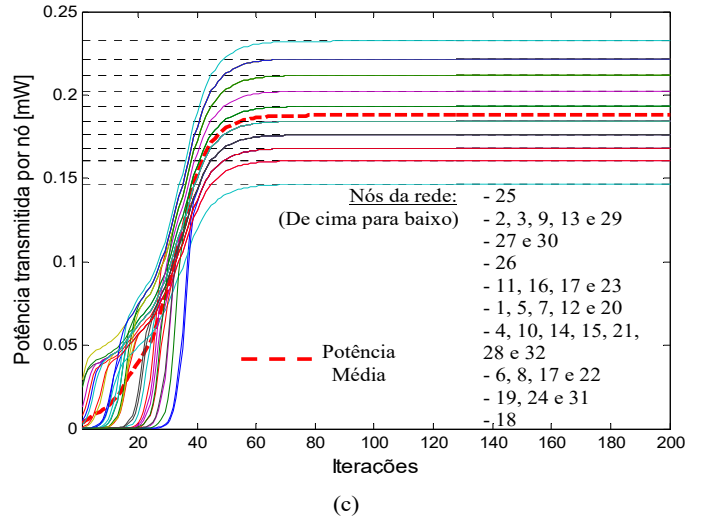
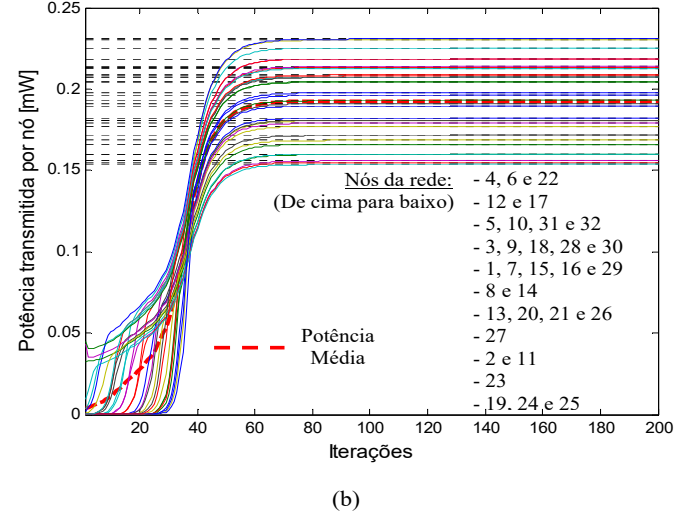
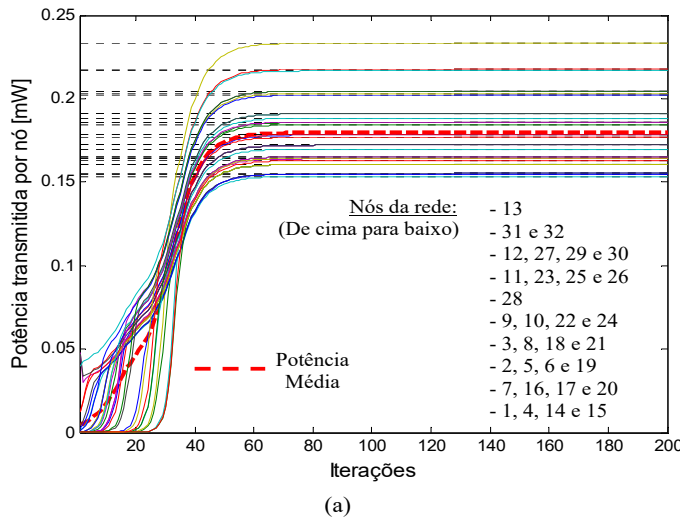


Figura 5. Potência transmitida por nó (ONU) em função do número de iterações, seguindo as distâncias apresentadas na Fig. 4. (a) Rede real. (b) Distribuição Normal. (c) Distribuição de Poisson.

A Fig. 5 mostrou que o algoritmo de controle de potência baseado no algoritmo de Verhulst converge para os valores obtidos por meio do controle centralizado para os três cenários. Porém, o valor médio da potência apresenta maior semelhança entre a rede real e a distribuição de Poisson. Neste contexto, será investigado o impacto da distribuição geográfica quando as distâncias entre RN e OLT são maiores, ou seja, para distâncias compatíveis com as redes estudadas em outros trabalhos [6,7,12]. A Fig. 6. ilustra a potência média em função da distância média das ONUs para distribuição Uniforme e de Poisson. A distância média é obtida por meio de (1).

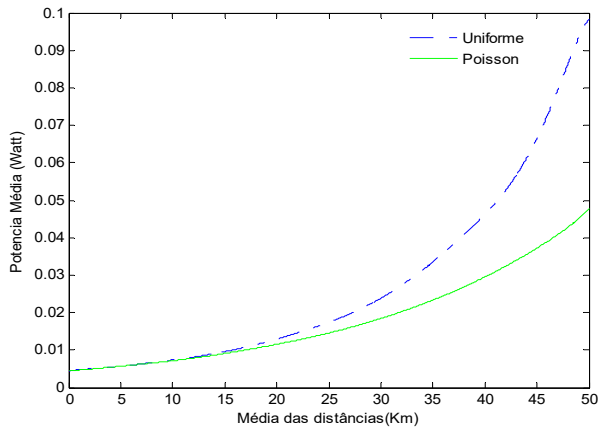


Figura 6. Potência média em função da distância média das ONUs para distribuição Uniforme e de Poisson.

Por meio da Fig. 6 verifica-se que a potência média em função da média das distâncias apresenta valores próximos tanto para distribuição Uniforme como para distribuição de Poisson para média de distâncias de até aproximadamente 15 km. Este resultado confirma o resultado ilustrado na Fig. 4. Por outro lado, observa-se que a partir desta distância a distribuição Uniforme apresenta um maior valor de potência quando comparado com a distribuição de Poisson. Por exemplo, a variação em termos de potência média é 28,1 e 52 % maior para média de 35 e 50 km, respectivamente, quando emprega-se a distribuição Uniforme comparada com a distribuição de Poisson. Este maior valor de potência apresenta elevado impacto no consumo de energia da rede [8]. Portanto, este resultado indica que o projeto físico de redes de acesso PON deve priorizar o atendimento das ONUs por meio de uma distribuição de Poisson ao invés de uma distribuição Uniforme.

Com intuito de verificar o impacto da distribuição geográfica na estimação da SIR (γ) em cada nó não é ilustrada na Fig. 7 a NMSE em função do número de iterações e do erro estimado. Foi considerado o erro de estimação na recepção do sinal na OLT considerando uma (a) rede real, (b) distribuição Uniforme e (c) distribuição de Poisson.

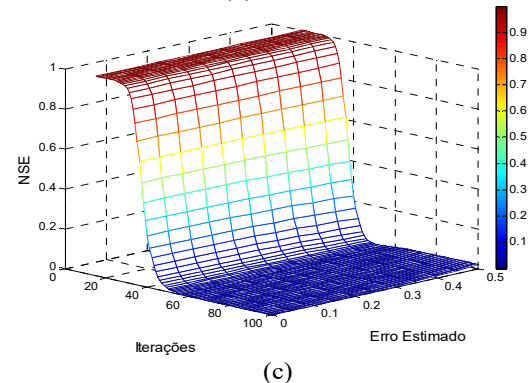
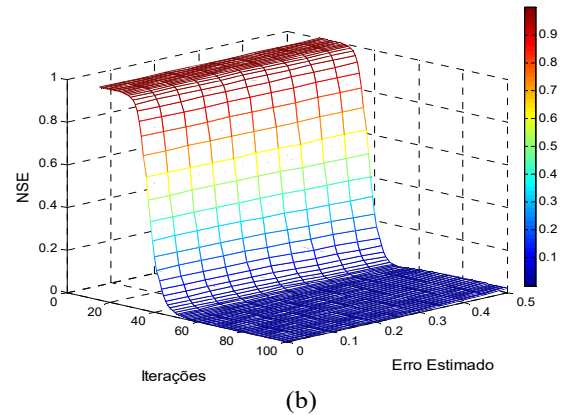
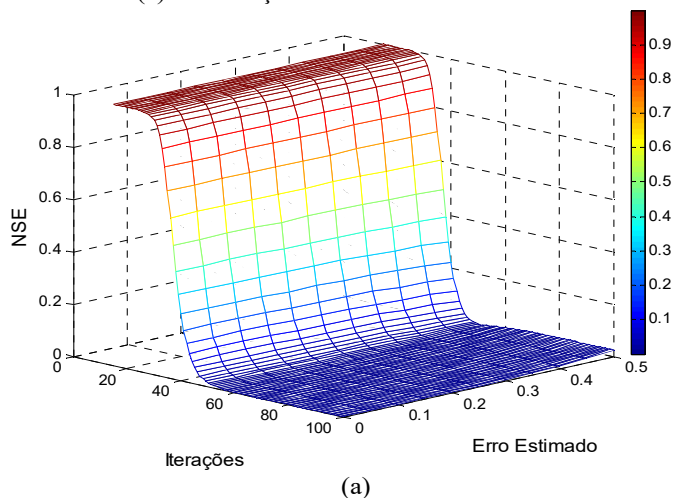


Figura 7. NMSE em função do número de iterações e do erro estimado. (a) Rede real, (b) distribuição Uniforme e (c) distribuição de Poisson.

Por meio da Fig. 7 foi observado que a NMSE apresenta pequenos valores, mesmo quando o erro estimado é elevado, ou seja, próximo de 0,5 (50 %). Este comportamento ocorre em função da robustez apresentada pelo algoritmo de controle de potência baseado no algoritmo de Verhulst quando o erro na estimativa do sinal recebido é considerado [9,15]. Desta forma, se observa que a utilização da rede real, distribuição de Poisson e distribuição Uniforme não afeta a robustez do algoritmo de controle.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi abordado o impacto da distribuição geográfica das ONUs de redes ópticas de acesso PON com acesso múltiplo por divisão de códigos ópticos (OCDMA). A distribuição geográfica representa a distribuição de distâncias entre as ONUs e o terminador óptico OLT. Os objetivos principais são a análise do consumo de potência da rede óptica e robustez do algoritmo de controle de potência baseado na técnica de Verhulst. Foram comparados três possíveis cenários de distribuição geográfica: (i) Rede real que é obtido por meio da extração dos dados de um mapa; (ii) Cenário estimado por uma distribuição de Poisson e (iii) Cenário estimado por uma distribuição Uniforme. Neste caso, foi verificado que a distribuição de Poisson apresenta maior correlação que a distribuição Uniforme quando comparado com os dados extraídos da rede real. Com relação a potência média transmitida em função da distância das ONUs se verifica valores próximos tanto para distribuição Uniforme como para distribuição de Poisson para distâncias

de até aproximadamente 15 km. Porém, observa-se que a partir desta distância a distribuição Uniforme apresenta um maior valor de potência transmitida quando comparado com a distribuição de Poisson. Portanto, este resultado indica que o projeto físico de redes de acesso PON deve priorizar o atendimento das ONUs por meio de uma distribuição de Poisson ao invés de uma distribuição Uniforme. Finalmente, os resultados obtidos confirmam a robustez do algoritmo de controle baseado na técnica de Verhulst para todos os cenários utilizados.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Wong, "Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 597 – 608, Feb., 2012.
- [2] H. Yin and D. J. Richardson, *Optical code division multiple access communication networks: theory and applications*. Berlin: Springer-Verlag and Tsinghua University Press, 2009.
- [3] Kerim Fouli e Martin Maier, "OCDMA and Optical Coding: Principles, Applications, and Challenges", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 8, pp. 27 – 34, Aug. 2007.
- [4] E. Mutaungwa, "Comparative analysis of the traffic performance of fiber-impairment limited WDM and hybrid OCDM/WDM networks", *Photon Network Commun.*, vol. 13, pp.53–66, Jan. 2007.
- [5] N. Karafolas and D. Uttamchandani, "Optical Fiber Code Division Multiple Access Networks: A Review", *Optical Fiber Technology*, no. 2, pp. 149 – 168, Feb. 1996.
- [6] N. Tarhuni, T. Korhonen, M. Elmusrati and E. Mutaungwa, "Power Control of Optical CDMA Star Networks", *Optics Communications*, vol. 259, pp. 655 – 664, Mar. 2006.
- [7] F. R. Durand, M. S. Filho and T. Abrão, "The effects of power control on the optical CDMA random access protocol", *Optical Switching and Networking*, (In press) doi:10.1016/j.osn.2011.06.002.
- [8] 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*, vol. 11, no.1, pp. 39 – 55, June 2012.
- [9] F. R. Durand and T. Abrão, "Distributed SNIR Optimization Based on the Verhulst Model in Optical Code Path Routed Networks With Physical Constraints", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 9, pp. 683–691, Sep. 2011. doi:10.1364/JOCN.3.000683
- [10] R. Raad, E. Inaty, P. Fortier, and H. M. H. Shalaby, "Optimal resource allocation scheme in a multirate overlapped optical CDMA system," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 25, no. 8, pp. 2044 – 2053, August 2007.
- [11] E. Inaty, R. Raad, P. Fortier, and H. M. H. Shalaby, "A Fair QoS-Based Resource Allocation Scheme For a Time-Slotted Optical OV-CDMA Packet Networks: a Unified Approach," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 21, pp. 1-10, Jan. 2009.
- [12] Rad, Mohammad M., Fathallah, Habib A., Rusch Leslie A. Fiber fault PON monitoring using optical coding: effects of customer geographic distribution. *IEEE Transactions On Communications*, Vol. 58, No. 4, April 2010.
- [13] Richard E. Wagner, Member, John R. Igel, Robert Whitman, Mark D. Vaughn, Member, A. Boh Ruffin, Member, and Scott Bickham, "Fiber-Based Broadband-Access Deployment in the United States", *Journal of Lightwave Technology*, VOL. 24, NO. 12, pp 4526 - 4540, Dec. 2006.
- [14] Camille-Sophie Brès and Paul R. Prucnal, "Code-Empowered Lightwave Networks", *J. Lightw. Technol.*, vol. 25, n. 10, pp. 2911 – 2921, Oct. 2007.
- [15] T. J. Gross, T. Abrão, and P. J. E. Jeszensky, "Distributed power control algorithm for multiple access systems based on verhulst model," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 65, no. 4, pp. 361–372, April 2011.
- [16] Harry R. Anderson, *Fixed Broadband Wireless System Design*. Wiley 2003.



Lucas R. Garcia possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus Campo Mourão. Atualmente, é aluno de mestrado acadêmico em Engenharia Biomédica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI da UTFPR - campus Curitiba.



Larissa C. de Mello é aluna de graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus Campo Mourão. Durante o ano de 2014 participou do programa Ciência sem Fronteiras, na modalidade de graduação sanduíche, na Western Michigan University nos Estados Unidos.



Daniel Dalla Vecchia é aluno de graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus Campo Mourão.



Thiago dos Santos Cavali possui curso técnico em informática (2006-2009) e graduação em Engenharia Eletrônica (2010-2014) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus Campo Mourão. Atualmente, é aluno de mestrado acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE da UTFPR - campus Cornélio Procopio.



Fábio R. Durand possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS (1999), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP/São Carlos (2002) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP (2007). Atualmente, é professor Adjunto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) no campus de Cornélio Procopio atuando no curso de graduação em Engenharia Eletrônica e professor permanente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE). Desde 2010 vem atuando como professor permanente do Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina (UEL). No período de 2002 a 2009 foi professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Norte do Paraná - UNOPAR. Atuou ainda como Coordenador do curso de Engenharia Elétrica (2005 a 2009) e Diretor do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (2006 a 2009) da UNOPAR. Entre os anos de 2003 e 2004 participou do projeto UNOSAT em que foi desenvolvido o primeiro satélite universitário brasileiro. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em otimização e alocação de recursos em redes ópticas, redes sem fio, redes inteligentes (Smartgrids) e sistemas de geração distribuída utilizando energias renováveis.



Taufik Abrão (membro Senior IEEE, 2012) possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1992), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1995), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2001) e estágio de pós-doutorado pela UPC - Universitat Politècnica de Catalunya (Radio Communication Group), Espanha (Jun-2007 a Nov-2008). Em 2012 (2o. semestre) foi Visitante Acadêmico do grupo CSPC - Communications, Signal Processing & Control Research Group, ECS - Electronics and Computer Science, University of Southampton, England. Atualmente é professor Associado C da Universidade Estadual de Londrina, onde atua no ensino e pesquisa em Eng. Elétrica, desde 1996. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Telecomunicações, atuando principalmente nos seguintes temas: detecção multi-usuário, técnicas de diversidade e sistemas/redes cooperativas, métodos de otimização aplicados a sistemas de comunicação (otimização convexa, teoria de jogos, métodos heurísticos etc) e processamento de sinais aplicado a telecomunicações. Foi promovido para Senior Member do Institute of Electric and Electronics Engineers (IEEE), USA, em 2012. Atua como membro editorial e revisor de diversos periódicos internacionais e nacionais; é Editor do IEEE Communications Surveys. Tem contribuído como membro técnico e revisor ad hoc de várias FAPs brasileiras e atuado em vários congressos nacionais e internacionais na área de Telecomunicações e Processamento de Sinais. Membro do Comitê de Assessores de Área (CAA - Engenharias, 2007-2008 e 2012-atual) da Fundação Araucária, PR. Foi bolsista-produtividade em pesquisa da Fundação Araucária, PR (2009). Página pessoal: <http://www.uel.br/pessoal/taufik>.