

## Capítulo I – Alocação de Potência em Redes Ópticas Elásticas auxiliada pelo Modelo de Verhulst

Layhon Roberto Rodrigues dos Santos<sup>1</sup>

Renato Kazuo Miyamoto<sup>2</sup>

Wesley Candido da Silva<sup>3</sup>

Carolina Alves Bianchini<sup>4</sup>

Vicente De Lima Gongora<sup>5</sup>

### RESUMO

As redes ópticas heterogêneas, em especial as redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Networks*), são promissoras para provisionamento de recursos nas redes de transporte, que tipicamente concentram um grande volume de tráfego de dados. Os principais benefícios das EONs são a escalabilidade, que é a capacidade de acréscimo de usuários, bem como a flexibilidade, que é a capacidade da existência de vários serviços (taxas de bit) em uma mesma rede. A alocação de recursos nas EONs é um grande desafio devido a gama de parâmetros a serem controlados, tais como a potência, o formato de modulação, o espectro, as rotas, dentre outros. Esta gama de parâmetros caracteriza a alocação de recursos nas heterogêneas, como um problema de solução do tipo não polinomial difícil. Como proposta de alocação de recursos nas redes heterogêneas em tempo real, este trabalho assume que na etapa de projeto alguns parâmetros são pré-determinados e na etapa de operação um algoritmo de alocação de potência baseada no modelo populacional de Verhulst PA-V garante a qualidade de transmissão por meio do ajuste da potência de cada usuário ativo na EON. O algoritmo PA-V é comparado com o método de alocação de potência egoísta (EPA). Métricas de desempenho e complexidade computacional são avaliadas, bem como o compromisso entre elas.

**Palavras-chave:** Redes ópticas elásticas. Alocação de Potência. Verhulst. Eficiência Energética. Complexidade Computacional.

### POWER ALLOCATION IN OPTICAL NETWORKS AIDED BY VERHULT MODEL

#### ABSTRACT

Heterogeneous optical networks, especially elastic optical networks (EONs), are promising for provisioning resources in transport networks, which normally concentrate a large volume of data traffic. The main benefits of EONs are scalability, which is the ability to add users, as well as flexibility, which is the ability provides multiple services (bit rates) on the same network. Appropriated Resource allocation in EONs is a major challenge due to a range of parameters to be controlled, such as power, modulation format, spectrum, routes, among others. This parameters range characterizes the allocation of resources in heterogeneous

---

<sup>1</sup> Docente UniSenaiPR - Campus Londrina, [layhon.santos@sistefafiep.org.br](mailto:layhon.santos@sistefafiep.org.br)

<sup>2</sup> Docente UniSenaiPR - Campus Londrina, [renato.miyamoto@sistefafiep.org.br](mailto:renato.miyamoto@sistefafiep.org.br)

<sup>3</sup> Docente UniSenaiPR - Campus Londrina, [wesley.candido@sistefafiep.org.br](mailto:wesley.candido@sistefafiep.org.br)

<sup>4</sup> Docente UniSenaiPR - Campus Londrina, [carolina.bianchini@sistefafiep.org.br](mailto:carolina.bianchini@sistefafiep.org.br)

<sup>5</sup> Docente UniSenaiPR - Campus Londrina, [vicente.gongora@sistefafiep.org.br](mailto:vicente.gongora@sistefafiep.org.br)

as a problem of the type non-polynomial hard. As a proposal for resource allocation in heterogeneous networks in real time, this work assumes that in the design stage some parameters are predefined and in the operation stage a power allocation algorithm based on the population model of Verhulst PA-V guarantees the quality transmitted by adjusting the power of each active user in the EON. The PA-V algorithm is compared with the egoistic power allocation method, named as EPA. Performance metrics and computational complexity are evaluated, as well as the trade-off between them.

**Keywords:** Elastic Optical Networks. Power Allocation. Verhulst. Energy Efficiency. Computational Complexity.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o crescimento na demanda por tráfego de dados e o surgimento de novas aplicações, vem fomentando pesquisas em sistemas ópticos de telecomunicações em busca de um melhor aproveitamento dos recursos espectrais e energéticos disponíveis. Estudos apontam que o melhor aproveitamento energético e espectral, pode ser favorecido pelo conceito de alocação de recursos adaptativos, por exemplo, as larguras de bandas ópticas, as rotas, os formatos de modulação e as potências ópticas de transmissão em função da demanda. A técnica de modulação por comprimento de onda (WDM - *Wavelength-Division Multiplexing*) é uma técnica promissora no cenário óptico para alocação de recursos adaptativos, pois tem apresentado resultados promissores, dentre eles, a redução de custos de despesas capital e de operação, principalmente porque compartilha os mesmos elementos ópticos (fibras e amplificadores) com a maioria ou todos usuários, provendo então um melhor aproveitamento para alocação eficiente de recursos energéticos e espectrais (HADI; PAKRAVAN, 2017; YAN et al., 2015).

Os dois grupos principais que caracterizam as redes heterogêneas são o grupo das redes ópticas com múltiplas taxas (MLR – *Mixed Line Rates*) e o das redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Network*). As redes ópticas com MLR são compostas por diferentes tipos de transponder que configuram diferentes taxas de transmissão (pré-ajustadas) coexistindo em uma mesma fibra óptica. Já, as EONS são compostas por transponders adaptativos, os quais permitem que a taxas de transmissão na rede possam ser ajustadas em conformidade com a demanda. As tecnologias do tipo EON, tipicamente, se utilizam de tecnologias como a multiplexação por divisão de frequência ortogonal óptica coerentes (CO-OFDMA), ou, a multiplexação por divisão de comprimento de onda de Nyquist (N-WDM- *Nyquist wavelength division multiplexing*) são de comprimento de onda de Nyquist (N-WDM-*Nyquist Wavelength Division Multiplexing*) (CUKURTEPE et al., 2013; YAN et al.,

2015). Neste trabalho, assume-se a técnica NWDm, uma vez que a sua complexidade computacional para implementação é inferior a técnica CO-OFDMA para desempenho energético e espectral semelhante.

Vários parâmetros precisam ser monitorados nas redes heterogêneas para a garantia dos requisitos de qualidade de transmissão das mesmas, por exemplo a potência de transmissão, o comprimento de onda de cada usuário, a relação do sinal e ruído óptico (OSNR – *Optical Signal to Noise Ratio*), atraso diferencial de grupo, os efeitos não-lineares, topologia da rede óptica, dentre outros (CHATTERJEE et. al., 2017).

As métricas de qualidade de transmissão podem ser obtidas por diferentes métodos que estimam as condições de canais dos canais ópticos, por meio de coletas de informações em cada um dos nós, dentre elas, as fórmulas aproximadas, os modelos sofisticados e os monitores de desempenho óptico (MDO). Estes métodos de estimativa de condições de canais permitem que recursos energéticos e espectrais sejam alocados com o mínimo desperdício de recursos, resultando em redução de regeneradores, aumento do alcance de transmissão, aumento da eficiência energética e espectral. O método MDO destaca-se em relação aos demais por apresentar estimativas adequadas e em tempo real. (BIRAND et al., 2014; SOUMLIS et al., 2017)

A alocação de recursos nas EONs é definida pela atribuição de espectro, de potência, de roteamento, de formato de modulação e de potência no caso das redes ópticas elásticas, bem nas redes ópticas com MLR é definida pela atribuição de potência, de roteamento, de taxa de bit, de formato de modulação e comprimento de onda. Estes recursos podem ser otimizados na etapa de projeto ou em tempo real, principalmente quando auxiliados por MDOs. Tanto nas EONs como nas redes ópticas de taxa mista, os problemas de alocação de recursos possuem tempo não polinomial (NP), e podem ser divididos em subproblemas com complexidade computacional reduzida (SEVE et al., 2018; BOUDA et al., 2018). As EONS são capazes de prover maior eficiência espectral e energética, por isso são objetivo de estudo deste artigo.

A resolução dos problemas de alocação de recursos nas EONs pode ser realizada por três principais classes de algoritmos, os algoritmos analíticos, aproximados e heurísticos evolucionários. Normalmente, comparando as três classes de algoritmos citadas, os métodos analíticos obtêm uma melhor precisão na solução com alto custo de complexidade, os métodos aproximados encontram uma baixa precisão na solução com baixo custo de complexidade, e os métodos heurísticos evolucionários retornam soluções adequadas com custo de complexidade computacional mediano (MATA et al., 2018).

Neste trabalho investigou-se um algoritmo para alocação de potência eficiente em redes ópticas heterogêneas, tendo como estudo de caso uma topologia virtual de uma EON, com dois nós, com o intuito de obter o menor custo energético que atenda aos requisitos de qualidade de transmissão. O algoritmo investigado é baseado no modelo populacional de Verhulst, por se tratar de um algoritmo que apresenta bons resultados para alocação de potências em redes ópticas com complexidade computacional adequada. O método de alocação de potência egoísta, é adotado para realizar comparações com o algoritmo de Verhulst.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A redes ópticas elásticas são redes flexíveis, pois permitem a coexistência de multisserviços (diferentes taxas de bits), e escaláveis, pois facilitam o acréscimo no volume de dados sob demanda. Estes dois fatores, a escalabilidade e a flexibilidade, fazem com que elas apresentem um melhor aproveitamento energético e espectral em relação as redes ópticas legado que possuem taxas únicas. A maior aplicação destas redes está no campo das redes, as quais concentram um maior volume no tráfego de dados para atender as demandas de internet das coisas, serviços de multimídia, aplicações em tempo real, TV em alta definição, dentre outros (SANTOS; ABRÃO, 2022).

Os recursos espectrais nas EONS são alocados de forma adaptativa com diferentes taxas de bit, banda de guarda e formato de modulação. A granularidade das EONS é considerada mais fina do que as redes com uma única ou múltiplas taxas fixas. A técnica N-WDM é adotada neste trabalho, pois apresenta eficiência energética e espectral semelhante ao CO-OFDM com complexidade computacional inferior (SANTOS; ABRÃO, 2022).

A seguir são apresentados a arquitetura das redes ópticas elásticas, na subseção 2.1, o problema de alocação de potência, na subseção 2.2 e o algoritmo para alocação de potência, subseção 2.3. Entre os algoritmos de alocação de potência se têm o método de alocação de potência baseado no gradiente descendente, o algoritmo heurístico baseado no PSO e o algoritmo aproximado baseado na alocação de potência egoísta.

### 2.1 Arquitetura das Redes Ópticas Elásticas

Os principais elementos da EON são os  $M$  transmissores que ajustam os formatos de modulação, as bandas de guarda, os níveis de potência, as taxas de bits;  $N^{span}$  por link,

em que cada span tem um comprimento de fibra  $L$  e um amplificador de fibra dopado com Érbio (EDFA – *Erbium – Doped Fiber Amplifier*), bem como  $M$  receptores com habilidades de processamento digital de sinais para compensar os efeitos de dispersão. Assume-se três tipos de nós, o nó transmissor, o nó receptor e o nó intermediário. Cada destes nós tem um multiplexador óptico de adição e retirada de comprimento de onda reconfigurável (ROADM – *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*). O ROADM pode adicionar, remover e permitir a passagem de um determinado comprimento de onda, compensando flutuações indesejadas que podem ser causadas pelo EDFA. Cada EDFA opera no modo ganho automático controlado, em conformidade com o ROADM (SANTOS; ABRÃO, 2022).

Os caminhos ópticos são representados pela tecnologia de supercanais de Nyquist-WDM, em que a largura de banda do  $i$ -ésimo canal é dada por (SANTOS; ABRÃO, 2022):

$$u_i = \frac{R_i}{c_i}, \quad (1)$$

sendo  $c_i$  a eficiência espectral do formato de modulação do  $i$  – éximo canal em  $\text{bps} \cdot \text{hz}^{-1}$ ,  $R_i$  a taxa de bit do  $i$  – éximo canal em  $\text{bps}$ . A eficiência espectral de modulação é descrita a seguir na Tabela 1, para a modulação em fase (PM–*Phase Modulation*) com chaveamento por deslocamento de fase binário (BPSK–*Binary Phase Shift Keying*), com chaveamento por deslocamento de fase em quadratura (QPSK–*Quadrature phase-shift keying*) e com modulação de amplitude em quadratura (QAM–*Quadrature Amplitude Modulation*), bem como razão sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal to Noise Ratio*) considerando uma taxa de erro de bit tolerável de  $4 \cdot 10^{-3}$  na correção antecipada de erros e a taxa de bit recomendada ( $R^*$ ) para cada formato de modulação. (SANTOS; ABRÃO, 2022).

Tabela 1 – Formato de Modulação, eficiência de modulação e OSNR alvo

Formato de Modulação	Eficiência Espectral $c_i$ [bps/hz]	$R^*$ [Gbps]	$\gamma^*$ [db]
PM – BPSK	2	50	5.5
PM – QPSK	4	100	8.5
PM – 8QAM	6	150	12.5
PM – 16QAM	8	200	15.15
PM – 32QAM	10	250	21.10

Fonte: (SANTOS; ABRÃO, 2022)

A potência de transmissão do  $i$ -ésimo canal em  $W$  é dada por (SANTOS; ABRÃO, 2022):

$$p_i = g_i \cdot u_i, \quad (2)$$

em  $g_i$  é a densidade de potência espectral relacionada ao  $i$ -ésimo canal óptico em W/Hz. A qualidade de transmissão pode ser aferida por meio do modelo de OSNR no receptor do  $i$ -ésimo canal óptico, que em termos admissionais é dada por (SANTOS; ABRÃO, 2022):

$$\gamma_i = \frac{p_i}{p_i^{\text{ASE}} + p_i^{\text{NLI}}}, \quad (3)$$

sendo  $p_i^{\text{ASE}}$  é a potência de ruído emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplifier Spontaneous Emission*) em W e  $p_i^{\text{NLI}}$  é a potência de ruído não linear em W. A potência de ruído ASE em W é dada por (SOUMPLIS et al. (2017) e YAN et al. (2015):

$$p_i^{\text{ASE}} = N_i \cdot ((A_i^{\text{span}} - 1) + (A_i^{\text{ROADM}} - 1)) \cdot h \cdot f, \quad (4)$$

em que  $N_i$  é a figura de ruído do EDFA relacionado ao  $i$ -ésimo canal óptico;  $h$  é a constante de Planck em  $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$  e  $f = c/\lambda$  é a frequência do caminho de luz em Hz, sendo composto pela velocidade da luz  $c$  em m/s e o comprimento de onda  $\lambda$  em m;  $A_i^{\text{ROADM}}$  é a perda provadas pelos ROADMs percorridos pelo  $i$ -ésimo canal óptico em dB, seja no acréscimo, passagem e retirada do mesmo ao longo do seu perfil óptico; e  $A_i^{\text{span}}$  é a perda total nos spans relacionados ao  $i$ -ésimo canal óptico, dada por (SANTOS; ABRÃO, 2022):

$$A_i^{\text{span}} = L_i \cdot a, \quad (5)$$

sendo  $L_i$  o comprimento de fibra relacionado ao  $i$ -ésimo canal óptico e  $a$  o parâmetro de atenuação da fibra em decibel por km.

A potência de ruído não-linear, resultando da soma da interferência própria do canal e da interferência cruzada dos canais em W, é dada por:

$$p_i^{\text{NLI}} = 3 \frac{(\eta^{\text{fibra}})^2}{2 \pi \cdot a |\beta_2|} \sinh^{-1} \left( \frac{\pi^2 |\beta_2|}{2a} u_i \right) N_i^{\text{SPAN}} \cdot p_i^3 \quad (6)$$

$$+ 6 \frac{(\eta^{\text{fibra}})^2}{a^2} \sum_{i \neq j} \frac{a}{4\pi |\beta_2|} \log \left| \frac{|f_i - f_j| + \frac{u_j}{2}}{|f_i - f_j| - \frac{u_j}{2}} \right| N_i^{\text{SPAN}} \cdot p_i \cdot p_j^2$$

em  $\eta^{\text{fibra}}$  é o coeficiente de não linearidade da fibra devido às duas características físicas em W/km,  $B_2$  é a dispersão por velocidade de grupo em  $\text{s}^2/\text{km}$ ,  $p_j$  é a potência interferente do  $j$ -ésimo canal óptico em W.

As condições obtidas a partir da eq. (3) são mensuradas pelos MDO instalados em cada um dos nós da rede e então reportadas ao plano de controle para a garantia da qualidade de transmissão. O total conhecimento das condições de canais resulta em acréscimo de confiabilidade, economia de recursos, acréscimo do número de usuários, dentre outros benefícios (SANTOS; ABRÃO, 2022).

## 2.2 Problema de Alocação de Potência

A atribuições de rotas, de formato de modulação e do posicionamento dos canais no espectro disponível são resolvidos previamente na etapa de projeto, enquanto o problema de alocação de potência é solucionado durante a operação regular das redes ópticas (SANTOS; ABRÃO, 2022).

Basicamente, a alocação de potência consiste em buscar o vetor de potência que é composto pela potência de cada um dos canais ópticos, definido como  $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_M]^{M \times 1}$ , sendo  $M$  a quantidade de canais ópticos, que minimiza a função custo  $J^{PA}(\mathbf{p})$  enquanto as restrições  $\Lambda$  de qualidade de transmissão são garantidas (SANTOS; ABRÃO, 2022):

$$p_i^{NLI} = 3 \frac{(\eta^{\text{fibra}})^2}{2 \pi \cdot a |\beta_2|} \sinh^{-1} \left( \frac{\pi^2 |B_2|}{2a} u_i \right) N_i^{\text{SPAN}} \cdot p_i^3 + 6 \frac{(\eta^{\text{fibra}})^2}{a^2} \sum_{i \neq j} \frac{a}{4\pi |B_2|} \log \left| \frac{|f_i - f_j| + \frac{u_j}{2}}{|f_i - f_j| - \frac{u_j}{2}} \right| N_i^{\text{SPAN}} \cdot p_i \cdot p_j^2 \quad (6)$$

em que  $R_i$  é a taxa de bit do  $i$ -ésimo canal óptico [bps] e  $R_i^{\min}$  é a taxa de bit mínima solicitada pelo  $i$ -ésimo canal óptico; em que  $p_{\min}$  e  $p_{\max}$  são os valores mínimos e máximos que podem ser alocados para o  $i$ -ésimo canal óptico [W], respectivamente; e  $\Lambda_i$  são os requisitos de qualidade de transmissão no canal óptico (SANTOS; ABRÃO, 2022).

## 2.3 Algoritmos de Alocação de Potência

A seguir são apresentados os algoritmos adotados para alocação de potência na EON, na subseção 2.3.1, o algoritmo para alocação de potência em EONs baseado no modelo populacional de Verhulst, e na subseção 2.3.2, o algoritmo aproximado baseado na alocação de potência egoísta.

### 2.1.1. Algoritmo de alocação de potência baseada no gradiente descendente.

O modelo populacional de Verhulst considera que potência do  $i$ -ésimo canal evolui de forma análoga a evolução temporal de uma quantidade de indivíduos de algumas espécies biológicas, quem tem o seu crescimento limitado pelos alimentos e espaços físicos os quais habitam (GROSS et. al, 2011) (SANTOS; ABRÃO, 2022). Então, é possível realizar a alocação de potência, nomeada como PA-V, minimizando o valor da margem residual  $\left(1 - \frac{\gamma^*}{\gamma}\right)$  do canal óptico na  $n$ -ésima iteração, modelada como:

$$p_i[n] = p_i[n - 1] + k_v \left(1 - \frac{\gamma^*}{\gamma}\right) \cdot p_i[n - 1], \quad (7)$$

sendo  $k_v$  o coeficiente de aprendizado de Verhulst. O critério de para poder ser dado por uma quantidade de iterações e a qualidade das soluções pelo critério do erro quadrático médio normalizado (NMSE – Normalized Mean Square Error), tal como em (SANTOS; ABRÃO, 2022).

#### 2.1.2. Algoritmo de Alocação de Potência Baseado na Alocação de Potência Egoísta.

O algoritmo de alocação de potência egoísta (EPA – *Egoistic Power Allocation*) é um método não iterativo que consistem em alocar a potência que maximiza a OSNR de  $M$  canais ópticos, isto é, a potência máxima que pode ser alocada para o  $i$ -ésimo canal óptico em uma determinada configuração dos canais ópticos. Para isso, calcula-se a primeira derivada da eq. (3) assumindo uma aproximação na qual a potência interferente ( $p_j$ ) tem o mesmo valor da potência de transmissão do  $i$ -ésimo canal óptico ( $p_i$ ) em  $W$ , tal como em (SANTOS; ABRÃO, 2022):

$$p_i \approx \sqrt[3]{\frac{p_i^{ASE}}{2\eta_i}}, \quad (7)$$

sendo  $\eta_i$  o a quantia não linear da potência de ruído não linear que é dada por:

$$\eta_i \approx \eta'_i + \eta''_i, \quad (8)$$

em que  $\eta'_i$  é a quantia não linear da potência de ruído não linear relacionada a interferência própria do canal óptico, obtida por meio de (6), dada por:

$$\eta'_i \approx 3 \frac{(\eta^{\text{fibra}})^2}{2\pi \cdot a |\beta_2|} \sinh^{-1} \left( \frac{\pi^2 |B_2|}{2a} u_i \right) N_i^{\text{SPAN}}, \quad (9)$$

bem como em que  $\eta''_i$  é a quantia não linear da potência de ruído não linear relacionada a interferência cruzada entre os canais ópticos, obtida por meio de (6), dada por:

$$\eta''_i \approx 6 \frac{(\eta^{\text{fibra}})^2}{a^2} \sum_{i \neq j} \frac{a}{4\pi|B_2|} \log \left| \frac{|f_i - f_j| + \frac{u_j}{2}}{|f_i - f_j| - \frac{u_j}{2}} \right| N_i^{\text{SPAN}}. \quad (10)$$

### 3 METODOLOGIA

Os métodos utilizados neste trabalho são a caracterização do problema de pesquisa, tal como discutido nas seções anteriores, bem como a simulação do problema em um programa matemático, tanto para a simulação do modelo rede óptica elástica, como para a implementação dos algoritmos de alocação de potência baseados no modelo populacional de Verhulst (PA-V), e alocação de potência egoísta (EPA). O Algoritmo de PA-V é sintonizado, ajustando o seu ganho  $k_v$ , então é realizado a alocação de potência e analisado aspectos de convergência. Então, os resultados do PA-V são comparados com os resultados do EPA, em termos de desempenho e complexidade computacional (ms).

### 4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Esta seção apresenta os principais elementos da camada física da rede óptica elástica (EON), subseção 4.1, bem como os algoritmos de alocação de potência, subseção 4.2. As simulações foram realizadas em um computador pessoal com 16 GB RAM e processador Intel (R) Core (TM) i7-8550U CPU com velocidade base de 1.80 GHz podendo chegar a 1.99 GHz via turbo. As simulações numéricas são avaliadas sobre um comportamento médio de 100 tentativas.

#### 4.1 Camada Física da EON

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos da alocação de potência na EON para dois algoritmos de alocação de potência o EPA e o PA-V. O estudo de caso é uma topologia da rede virtual de uma EON, que assume dois nós com um link composto por 6 spans de 80 km. Uma grade com granularidade de 6.25 Ghz é assumida para alocação dos canais, adotando-se uma banda de guarda de 12.5 GHz. Seis tipos de serviços, i.e., taxas de bit, com 10 canais cada, trafegam do no A até o nó B, e.g., 10 x 50 Gbps, 10 x 100 Gbps, 10 x 150 Gbps, 10 x 200 Gbps e 10 x 250 Gbps. Os parâmetros físicos da EON são os mesmos adotados em (SOUMPLIS et. al, 2017) (YAN et. al, 2015),

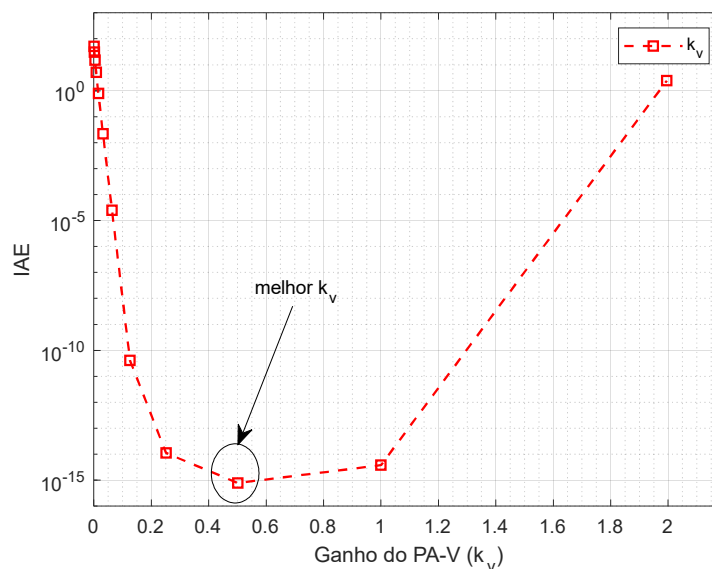
considerando que a EON está operando no início de vida. Para atribuir o formato de modulação se considera os valores da Tabela 1.

#### 4.2 Algoritmo de Alocação de Potência.

Nesta subseção são discutidos os algoritmos de alocação de potência PA-V e e EPA. Ambos os algoritmos são discutidos em termos de desempenho e complexidade computacional. O ganho  $k_v$  do algoritmo PA-V será otimizado para o melhor proveito deste ao longo de sua operação.

Para o ajuste do ganho  $k_v$  do algoritmo PA-V, assume-se o cálculo do do erro quadrático médio de  $\left(1 - \frac{\gamma^*}{\gamma}\right)$  na n-ésima iteração, sendo analisada na faixa de valores  $k_v \in [10^{-3}; 2]$ , em que valores de  $k_v$  abaixo de  $10^{-3}$  apresentam convergência lenta e valores acima de 2 não apresentam convergência; e adota-se um número máximo de 250 iterações. Os resultados obtidos de  $k_v$  em função ISE são ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Seleção do valor de  $k_v$



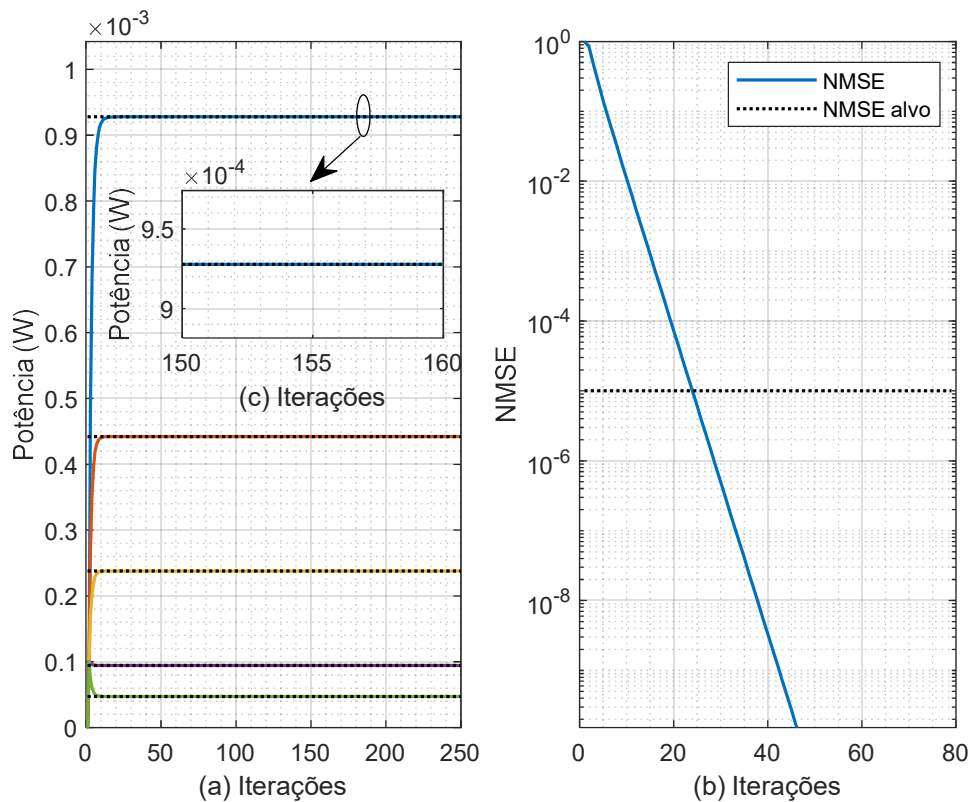
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Como pode ser observado na Figura 1, o melhor ganho que pode ser obtido para o algoritmo PA-V é  $k_v^* = 0,5012$ , pois valores superiores e inferiores a  $k_v^*$  obtêm um custo IAE superior.

A convergência da alocação de potência é ilustrada na Figura 2, sendo a linha pontilhada o valor médio da alocação de potência obtido em 100 realizações do procedimento de PA para  $k_v^* = 0,5012$ . Somente cinco dos canais ópticos 50 alocados são

apresentados, para ilustrar de forma clara a convergência da alocação de potência. Além disso, a Figura 2 também ilustra o erro quadrático médio normalizado para a alocação de potência dos 50 canais alocados em função do número de iterações.

Figura 2 – Alocação de potência e NMSE utilizando o algoritmo PA-V.



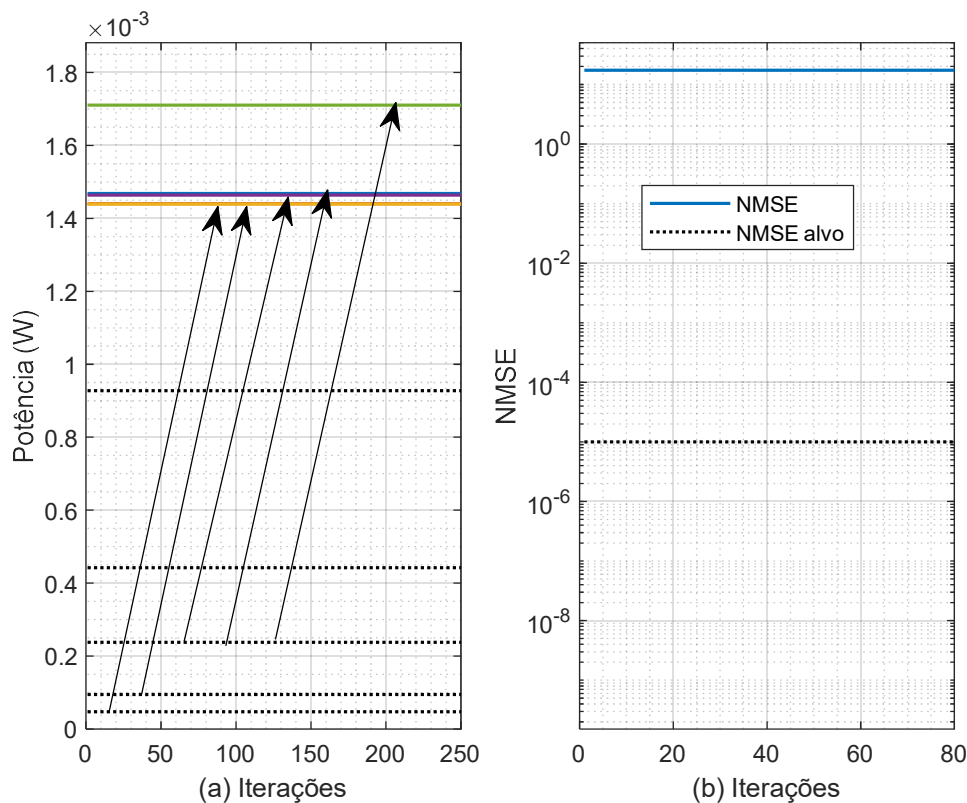
PA – V: (a) alocação de potência para cinco de cinquenta canais da EON, em função do número de iterações, com o intuito de apresentar uma ilustração limpa; (b) NMSE em função do número de iterações para 50 canais ópticos alocados; (c) zoom para enfatizar a convergência da alocação de potência de um canal óptico.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Como pode ser observado na Figura 2, todos os canais ilustrados alcançam a convergência total em termos de alocação de potência e NMSE. No que diz respeito ao NMSE, que compara a potência alocada pelo PA-V na iteração atual na sua última iteração, em aproximadamente 23 iterações se obtém a alocação de potência alvo que garante a qualidade de transmissão estabelecida como  $NMSE = 10^{-5}$ . Este valor de NMSE é assumido como o suficiente para garantir uma taxa de erro de bit tolerável.

A alocação de potência pelo algoritmo EPA também é realizada para efeito de comparação com os resultados obtidos pelo algoritmo PA-V. Tanto a alocação de potência para 5 usuários como o NMSE para todos os 50 canais ópticos é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Alocação de potência e NMSE utilizando o algoritmo EPA.



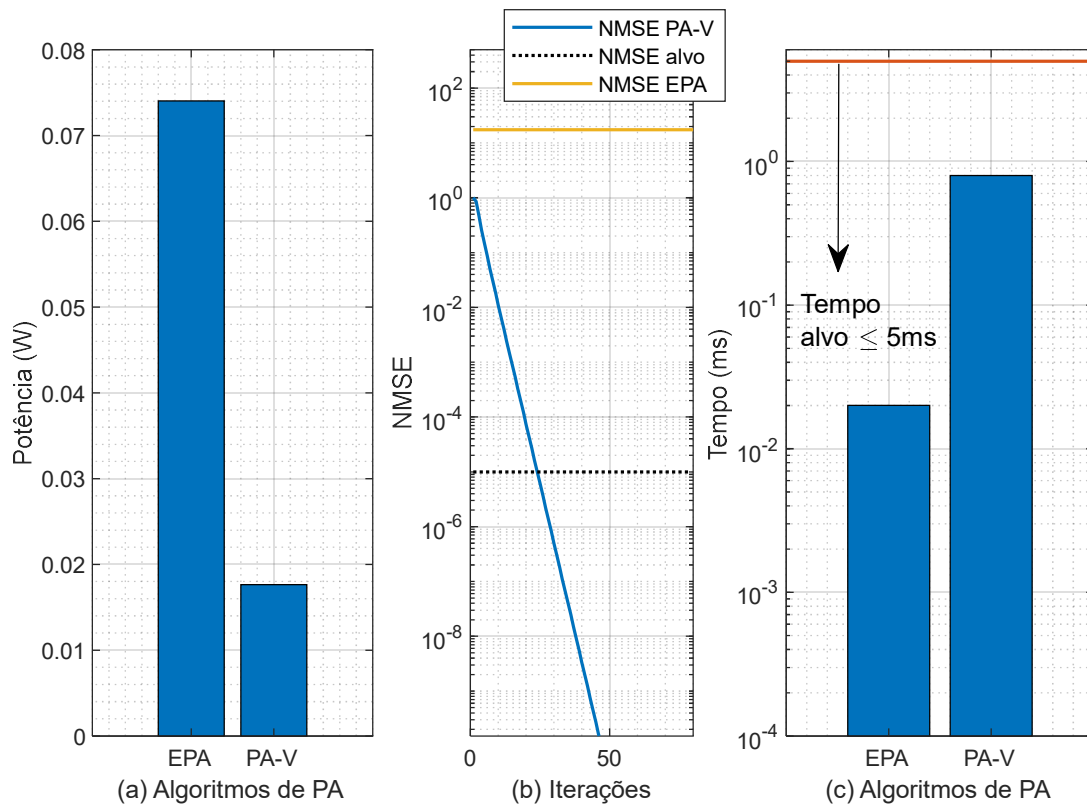
EPA: (a) alocação de potência para cinco canais de cinquentas canais da EON, em função do número de iterações, com o intuito de apresentar uma ilustração limpa; (b) NMSE em função do número de iterações para cinquentas canais da EON.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Como pode ser observado na Figura 3, nenhum dos canais convergem para a mínima potência que garante a qualidade de transmissão por meio do PA-V. No que diz respeito ao NMSE, que compara a potência alocada pelo EPA em relação a potência alocada por canal óptico no PA-V em sua última iteração, o EPA não encontra o valor  $NMSE^* = 10^{-5}$ . O NMSE encontrado pelo EPA evidencia a não convergência para o  $NMSE^*$  com desperdício de energia.

Uma comparação dos algoritmos em termos da potência alocada total em W, NMSE por iteração e do tempo computacional em milissegundos (ms) é ilustrado na Figura 4. Estas comparações são apresentadas para uma melhor compreensão do compromisso entre as métricas de desempenho (potência alocada e NMSE) e a complexidade (ms) dos algoritmos de alocação de potência PA-V e EPA. Os valores alvos de NMSE e tempo (ms) são destacados na Figura 4.

Figura 4 – Alocação de potência e NMSE utilizando o algoritmo EPA.



Comparação entre os algoritmos PA – V e EPA: (a) potência alocada para todos os canais da EON; (b) NMSE em função do número de iterações para 50 canais ópticos alocados; (c) tempo computacional em ms.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Como pode ser observado na Figura 4 – a) e b) o algoritmo EPA apresenta desperdícios de potência em relação ao algoritmo PA-V, por isso em termos de desempenho o PA-V é superior. Já em termos de complexidade computacional em ms, o algoritmo EPA vence o algoritmo PA-V, porém o PA-V está dentro os limites de tempo aceitáveis para que ocorra a alocação de potência em tempo real em redes ópticas heterogêneas. Estes resultados demonstram que o PA-V vence o algoritmo de baixa complexidade EPA, pois apresenta um menor desperdício de potência com custo computacional realizável.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma estratégia de alocação de recursos em EONs, por meio dos algoritmos PA-V e EPA. As soluções são avaliadas em termos do desempenho e da complexidade dos algoritmos, bem como pelo compromisso desempenho-complexidade. O algoritmo PA-V apresentou bons resultados de alocação de potência em termos alocação

de potência mínima enquanto a qualidade de transmissão é garantida, bem como em termos da complexidade computacional adequada para operação em tempo real em EONs. Os resultados numéricos deixam claro que o PA-V vence o EPA. Para trabalhos futuros, destaca-se ainda que, as soluções obtidas podem ainda ser otimizadas através de estratégias de FPGA e outros algoritmos que podem garantir um custo computacional inferior ao obtido pelo PA-V.

## REFERÊNCIAS

BIRAND, B.; WANG, H.; BERGMAN, K.; KILPER, D.; NANDAGOPAL, T.; ZUSSMAN, G. Real-time power control for dynamic optical networks—algorithms and experimentation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 32, n. 8, p. 1615–1628, 2014.

BOUDA, M.; ODA, S.; VASSILIEVA, O.; MIYABE, M.; YOSHIDA, S.; KATAGIRI, T.; AOKI, Y.; HOSHIDA, T.; IKEUCHI, T. Accurate prediction of quality of transmission based on a dynamically configurable optical impairment model. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 10, n. 1, p. A102–A109, 2018

BOYD, Stephen; BOYD, Stephen P.; VANDENBERGHE, Lieven. *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.

CUKURTEPE, H.; TORNATORE, M.; YAYIMLI, A.; MUKHERJEE, B. Provisioning of dynamic traffic in mixed-line-rate optical networks with launch power determination. *Photonic Network Communications*, Springer, v. 27, n. 3, p. 154–166, 2014.

Gross, T. J., Abrão, T., & Jeszensky, P. J. E. (2011). Distributed power control algorithm for multiple access systems based on Verhulst model. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 65(4), 361-372.

HADI, M.; PAKRAVAN, M. R. Resource allocation for elastic optical networks using geometric optimization. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 9, n. 10, p. 889–899, 2017.

HATTERJEE, B. C.; BA, S.; OKI, E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 20, n. 1, p. 183–210, 2017.

KENNEDY, James; EBERHART, Russell. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*. IEEE, 1995. p. 1942-1948.

ROBERTS, Ian; KAHN, Joseph M.; BOERTJES, David. Convex channel power optimization in nonlinear WDM systems using Gaussian noise model. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34.13: 3212-3222.

SANTANA, Gisele Alves, et al. Halton-Chaos-Beta-Pso: uma nova abordagem metaheurística baseada em enxame de partículas aplicada à problemas de engenharia elétrica. 2021.

SANTOS, Layhon R. Rodrigues dos; ABRAO, Taufik. Heuristic chaotic hurricane-aided efficient power assignment for elastic optical network. *IEEE Access*, 2020, 8: 83359-83374.

SANTOS, L. R. R. dos, & ABRÃO, T. (2022). Low-margin efficient power and spectrum assignment in elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, 43, 100649.

SEVE, E.; PESIC, J.; DELEZOIDE, C.; BIGO, S.; POINTURIER, Y. Learning process for reducing uncertainties on network parameters and design margins. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 10, n. 2, p. A298–A306, 2018.

SOUMPLIS, P.; CHRISTODOULOPOULOS, K.; QUAGLIOTTI, M.; PAGANO, A.; VARVARIGOS, E. Network planning with actual margins. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 35, n. 23, p. 5105–5120, 2017.

MATA, J.; MIGUEL, I. de; DURAN, R. J.; MERAYO, N.; SINGH, S. K.; JUKAN, A.; CHAMANIA, M. Artificial intelligence (AI) methods in optical networks: A comprehensive survey. *Optical switching and networking*, Elsevier, v. 28, p. 43–57, 2018.

YAN, L.; AGRELL, E.; WYMEERSCH, H.; BRANDT-PEARCE, M. Resource allocation for flexible-grid optical networks with nonlinear channel model. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 7, n. 11, p. B101–B108, 2015.