

Aplicação de Algoritmo Genético para Atualização de Enlaces em uma Rede Óptica Elástica Multibanda Híbrida

José Roberto do Nascimento Arcanjo, Danilo de Oliveira Melo e Helder Alves Pereira

Resumo— Neste artigo, propõe-se um algoritmo genético para atualização parcial de uma rede óptica elástica multibanda, substituindo uma parte dos enlaces que utilizam fibra óptica G652-D por outros que utilizam uma fibra óptica com valores de atenuação ultra baixos (PSCF-130). Para isso, considerou-se o ruído de emissão espontânea amplificada e três bandas de transmissão (S, C e L). Os resultados mostram que o algoritmo genético proposto obteve o melhor desempenho, em comparação com quatro heurísticas disponíveis na literatura, e uma redução de aproximadamente 62,20%, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, quando comparado com a melhor heurística no cenário em que a topologia analisada possuía 30% dos enlaces utilizando fibras ópticas PSCF-130.

Palavras-Chave— Algoritmo Genético, Fibra Óptica, Atenuação Ultra Baixa, Multibanda, Rede Óptica Elástica.

Abstract— In this paper, a genetic algorithm is proposed for partial updating of a multiband elastic optical network, replacing part of the links that use G652-D optical fiber with others that use an optical fiber with ultra-low attenuation values (PSCF-130). For this purpose, amplified spontaneous emission noise and three transmission bands (S, C and L) were considered. The results show that the proposed genetic algorithm obtained the best performance, in comparison with four heuristics available in the literature, and a reduction of approximately 62.20%, in terms of calls blocking probability, when compared with the best heuristic in the scenario in which the analyzed topology had 30% of the links using PSCF-130 optical fibers.

Keywords— Elastic Optical Network, Genetic Algorithm, Multiband, Optical Fiber, Ultra Low Attenuation.

I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas têm sido bastante utilizadas nos últimos anos devido aos avanços tecnológicos na construção de dispositivos ópticos e no desenvolvimento de novas tecnologias. Isso exige cada vez mais taxas de transmissão de bit elevadas, alta confiabilidade na transmissão de dados e propagação das ondas eletromagnéticas por meio de distâncias intercontinentais [1]. Novos tipos de fibras ópticas vêm sendo desenvolvidos de modo a reduzir os valores dos coeficientes não lineares. Isso se torna importante quando se considera o aumento na capacidade dos sistemas ópticos de transmissão de longa distância, o aumento da eficiência espectral e da taxa de transmissão de

bit [1]. Nos anos 2010, uma nova classe de fibras ópticas com áreas efetivas na faixa de 120 a 155 μm^2 e coeficiente de atenuação por volta de 0,1460 dB/km foi apresentada para uso em sistemas terrestres e submarinos [1].

Nesse cenário, fibras ópticas com valores ultra baixos do coeficiente de atenuação (ULL – *Ultra-Low Loss*) se tornam eficientes em melhorar a relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*) dos sistemas ópticos de transmissão [2]. Desde que a vida útil de um cabo de fibra óptica é relatada na literatura como possuindo de 20 a 25 anos, espera-se que grande parte das instaladas seja atualizada em breve [3]. No entanto, atualizar todas as fibras ópticas de uma só vez não só representa um custo elevado como também demanda recursos de mão de obra, logística de alocação, utilização e substituição de equipamentos e intervenção de locais bastante populosos [3]. Desse modo, operadores de rede atualizariam apenas uma parte do enlace por etapa de modo a atualizar progressivamente os enlaces com fibras ópticas ULL. Interessante perceber que experimentos vêm sendo realizados no sentido de demonstrar que esse tipo de fibra óptica (perda ultrabaixa e grande área efetiva) é mais adequado para transmissão terrestre em longas distâncias com velocidade ultra-alta [4].

Neste artigo, propõe-se um algoritmo genético para atualização parcial de uma rede óptica elástica multibanda (MB-EON – *Multiband Elastic Optical Network*), considerando a substituição da fibra óptica G652-D [5], [6] pela fibra óptica ULL (PSCF-130 [7]) em alguns enlaces da rede. Para isso, considera-se como penalidade física o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*), gerado ao longo dos amplificadores ópticos dispostos nos nós e enlaces da rede, e três bandas de transmissão (S, C e L). Está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresenta-se o conceito de redes ópticas híbridas, bem como o estado da arte sobre atualização de redes ópticas que utilizam fibras ópticas monomodo padrão (SSMF – *Standard Single Mode Fiber*) com fibras ópticas ULL. Na Seção III, descreve-se o algoritmo genético proposto. Na Seção IV, define-se a configuração do cenário de simulação. Na Seção V, os resultados são apresentados e discutidos e, por fim, na Seção VI, as conclusões.

II. REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS

O estudo de como substituir as fibras ópticas SSMF gradualmente foi investigado por Guan *et al.* em 2017. Em [2], os

José Roberto do Nascimento Arcanjo, Danilo de Oliveira Melo e Helder Alves Pereira fazem parte da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, e-mails: {jose.arcanjo,danilo.melo}@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

Os autores deste trabalho agradecem à UFCG o apoio institucional e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ/PB – Termo de Outorga no 3067/2021) e ao CNPq o apoio financeiro.

autores propuseram três estratégias. Na primeira, os enlaces eram elencados de forma crescente de acordo com suas distâncias físicas e os mais longos eram substituídos (PL – *Physical Length*). Na segunda, utilizava-se o algoritmo de Dijkstra, considerando a distância física como função custo, e se obtinha a rota mais curta para cada par fonte-destino. Então, verificava-se o número de rotas que compartilhavam cada enlace da rede. Os enlaces eram elencados em ordem crescente com relação ao número de rotas compartilhadas e então substituídos. Na terceira, utilizava-se um algoritmo de roteamento e atribuição de espectro (RSA – *Routing and Spectrum Assignment*) para verificar as chamadas na rede que seriam bloqueadas por falta de qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*). Desse modo, os enlaces da rota possuíam um contador que, na medida em que as chamadas fossem bloqueadas por falta de QoT, esse era incrementado até o final da simulação. Com isso, obtinha-se uma lista ordenada dos enlaces onde ocorreram o maior número de bloqueios e esses seriam substituídos.

Nesse contexto, foi apresentado o problema de agendamento que tem como objetivo determinar a sequência ótima de atualização dos enlaces de modo a atingir o máximo benefício da atualização progressiva dos enlaces da rede [3]. Li *et al.* [3] formularam um modelo utilizando programação linear inteira (ILP – *Integer Linear Programming*) e três heurísticas. A primeira heurística considerava a atualização dos enlaces de acordo com seus comprimentos físicos, em ordem decrescente (PL). A segunda heurística gerava aleatoriamente uma sequência de atualização dos enlaces da rede (RND – *Random*) e, a terceira heurística, calculava o ganho obtido pela atualização de cada enlace, selecionando o enlace que resultasse no ganho máximo para atualização e esse processo era repetido até que todos os enlaces fossem atualizados (MG – *Maximum Gain*).

Em [8], Li *et al.* propuseram estratégias para atualização dos enlaces da rede com fibra óptica ULL, considerando redes EONs, sob condições de tráfegos estático e dinâmico. Para tráfego estático, propuseram um modelo baseado em MILP com o objetivo de minimizar o número máximo de fatias do espectro (*slots*) utilizadas na rede. Consideraram o problema de roteamento, de atribuição do formato de modulação e de espectro (RMLSA – *Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*), por meio de estratégias diferentes de seleção do tipo da fibra óptica: (1) RND; (2) PL; (3) rota mais curta percorrida (SRT – *Shortest Route Traversed*) e (4) LC. Nesse contexto, O algoritmo conhecido como de janela espectral (SWP – *Spectrum Window Plane*) foi estendido para tratar do problema RMLSA também no aspecto de seleção do tipo de fibra óptica. Quanto ao tráfego dinâmico, além das estratégias propostas para a demanda de tráfego estático, os autores propuseram uma estratégia baseada em bloqueio devido à falta de QoT, selecionando enlaces para implantação da fibra óptica ULL com base no desempenho de transmissão dos enlaces.

Li *et al.* [9] propuseram um modelo baseado em MILP e três estratégias para o problema de agendamento: (1) PL; (2) SRT e (3) ganho máximo de implantação (MDG – *Maximum Deployment Gain*). Essa terceira estratégia baseava-se

na redução do número de *slots*, após a implantação da fibra óptica ULL, considerando uma ponderação entre a conclusão da reotimização da rede e o final do estágio de implantação. Em [10], Liu *et al.* propuseram uma estratégia baseada em *simulated annealing* para o problema de agendamento com fibra óptica ULL.

Yang *et al.* [11] investigaram os problemas de alocar de forma eficiente enlaces com fibras ópticas ULL e executar algoritmos RSA para estabelecer caminhos ópticos (*lighpaths*) em redes EONs, contendo ambos os tipos de fibra (SSMF e ULL) (redes ópticas híbridas). Para isso, consideraram três heurísticas: (1) RND; (2) PL e (3) máxima eficiência espectral (MSE – *Maximum Spectral Efficiency*). A terceira selecionava os enlaces tomando por base a minimização do número máximo de *slots* utilizados na rede quando todos os *lighpaths* fossem atendidos. O algoritmo SWP foi estendido para resolver o problema RSA, considerando redes ópticas híbridas (ROH). Guo *et al.* [12] investigaram o problema de como a atenuação e a área efetiva da fibra óptica afetavam o desempenho no atendimento das chamadas em uma rede óptica. Os autores propuseram estratégias RSA, considerando tráfegos incremental e dinâmico.

Em [13], Li *et al.* investigaram o problema de implantação de fibras ópticas ULL enquanto permitiam a utilização de fibras ópticas SSMF. Os autores apresentaram o conceito de redes EONs com topologias fixas e variáveis. Na primeira, não seria possível a adição de novos enlaces com fibras ópticas ULL e, na segunda, seria possível a adição de novos enlaces com esse tipo de fibra. Para isso, formularam modelos MILP e quatro heurísticas: (1) PL; (2) SRT; (3) demanda de tráfego (TD – *Traffic Demand*) e (4) máximo desempenho da rede (MNP – *Maximum Network Performance*). Li *et al.* também propuseram algoritmos de roteamento, atribuição de fibra óptica, de formato de modulação e de espectro (RFMSA – *Routing, Fiber, Modulation Format and Spectrum Assignment*) para estabelecer *lighpaths*, considerando a coexistência de fibras ópticas SSMF e ULL na rede.

III. ALGORITMO GENÉTICO PARA ATUALIZAÇÃO DE ENLACES EM UMA REDE ÓPTICA ELÁSTICA MULTIBANDA HÍBRIDA

O algoritmo genético proposto neste artigo se baseia na estrutura do algoritmo genético clássico [14], conforme ilustrado em Fig. 1. A etapa inicial (Dados de Entrada) é composta pela introdução dos parâmetros de simulação, tais como: tamanho da população (P), número de gerações (G) e valor estipulado (V) para o uso de enlaces utilizando a fibra óptica PSCF-130 [7].

Na etapa da População Inicial, são gerados aleatoriamente P indivíduos. Enquanto o número de gerações não atinge seu valor máximo (G), são realizadas as etapas de cruzamento, mutação e seleção. Quando o número de gerações atingir seu valor máximo, o algoritmo genético retorna o melhor indivíduo presente na população. Neste artigo, considerou-se $P = 50$, $G = 100$, probabilidade de cruzamento (P_C) igual a 30%, probabilidade de mutação (P_M) igual a 10% e $V = 30\%$.

O indivíduo, ou cromossomo, corresponde a um vetor que

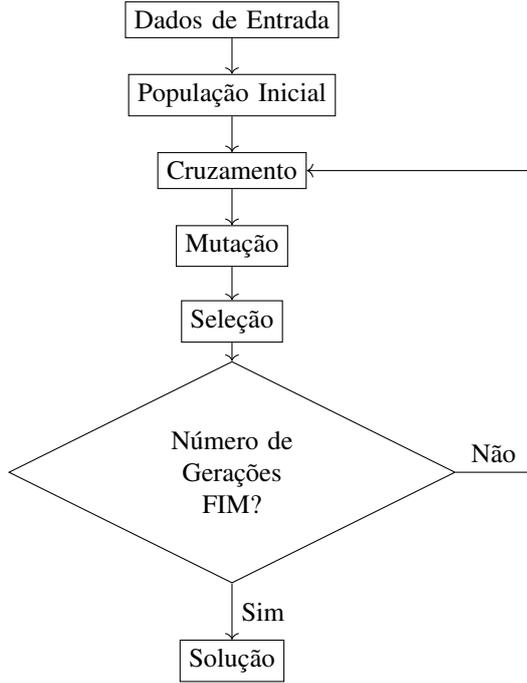


Fig. 1: Fluxograma do algoritmo genético clássico utilizado neste artigo.

cont m o número de posi es, ou genes, igual ao número de enlaces da topologia de rede analisada (l) da seguinte forma:

$$I = [g_0, g_1, g_2, \dots, g_{l-1}]$$

Cada posi o (g_j), ou gene, representa um enlace que utiliza fibra  ptica G652-D [5], [6] ou PSCF-130 [7].

Inicialmente, os indivíduos são gerados aleatoriamente de modo a se ter uma certa quantidade de genes (V) representando o uso de fibra  ptica PSCF-130 [7] e o restante de fibra  ptica G652-D [5], [6] ($100\% - V$). A opera o de cruzamento   realizada com base no valor de P_C de modo que os indivíduos são selecionados aos pares. Essa etapa se baseia na sele o de três posi es aleatórias (x , y e z), ao longo do cromossomo, formando assim quatro conjuntos de genes em cada indivíduo:

$$I_a = \begin{cases} a_1 = [g_{a,0}, g_{a,1}, \dots, g_{a,x}] \\ a_2 = [g_{a,x+1}, g_{a,x+2}, \dots, g_{a,y}] \\ a_3 = [g_{a,y+1}, g_{a,y+2}, \dots, g_{a,z}] \\ a_4 = [g_{a,z+1}, g_{a,z+2}, \dots, g_{a,l-1}] \end{cases}$$

e

$$I_b = \begin{cases} b_1 = [g_{b,0}, g_{b,1}, \dots, g_{b,x}] \\ b_2 = [g_{b,x+1}, g_{b,x+2}, \dots, g_{b,y}] \\ b_3 = [g_{b,y+1}, g_{b,y+2}, \dots, g_{b,z}] \\ b_4 = [g_{b,z+1}, g_{b,z+2}, \dots, g_{b,l-1}] \end{cases}$$

Dessa forma, são gerados dois novos indivíduos (I_c e I_d), em que o indivíduo I_c   composto pelos conjuntos de genes: a_1 , b_2 , a_3 e b_4 , enquanto que o indivíduo I_d pelos conjuntos de genes: b_1 , a_2 , b_3 e a_4 . Para se manter a restri o de apenas um certo número V de enlaces utilizar fibra  ptica PSCF-130 [7], cada indivíduo resultante da etapa de cruzamento

passa por uma etapa de verifica o de restri o. Essa etapa verifica se o número de fibras  pticas PSCF-130 [7] está acima do valor estipulado (V). Caso esteja, aleatoriamente são atribuídas fibras  pticas G652-D [5], [6] aos genes excedentes.

Na etapa de muta o, os indivíduos são selecionados com base em um certo valor de probabilidade (P_M) e, em seguida, clonados. Esses indivíduos passam por um processo de embaralhamento em seus genes, de modo a manter a restri o de um certo número V de enlaces utilizando fibras  pticas PSCF-130 [7].

Por fim, todos os indivíduos presentes na popula o (popula o atual + resultantes da etapa de cruzamento + resultantes da etapa de muta o) passam por um processo de sele o. Nesse processo, verifica-se o valor de aptidão (*fitness*) de cada indivíduo, que, neste artigo, corresponde ao valor da probabilidade de bloqueio de chamadas (P_B) obtida devido   respectiva configura o da topologia de rede analisada, consistindo de um certo número V de enlaces que utilizam fibra  ptica PSCF-130 [7] e ($100\% - V$) que utilizam G652-D [5], [6]. Dessa forma, selecionam-se os P indivíduos mais aptos (com maiores valores de *fitness*) e a popula o passa a ter novamente o tamanho original (P). Caso o número de gera es alcance o valor máximo, o algoritmo genético proposto fornece o melhor indivíduo presente na popula o, encerrando o processo evolutivo. Caso não atinja, a popula o resultante passa novamente pelas etapas de cruzamento, de muta o e de sele o até que o número final de gera es seja alcançado.

IV. CONFIGURA O DAS SIMULA ES

Neste artigo, foi considerada uma arquitetura de nó baseada na de comuta o espectral [15] e adaptada para redes MB-EONs [6]. Essa arquitetura de nó, em conjunto com a arquitetura de enlace, leva em conta os seguintes dispositivos em sequência, considerando um respectivo enlace: transmissor, comutador, multiplexador, amplificador de potência, fibra óptica, em conjunto com amplificadores de linha, pré-amplificador, demultiplexador e receptor.

O valor de limiar para a rela o sinal-ruído  ptica ($OSNR_{th}$), utilizado como parâmetro de avalia o da QoT no nó receptor, pode ser obtido conhecendo-se a taxa de transmissão de bit, o formato de modula o e a rela o sinal-ruído por bit (snr_b) [15]. Para os formatos de modula o 64-QAM, 32-QAM, 16-QAM, 8-QAM e 4-QAM, foram utilizados os seguintes valores de snr_b : 14,77 dB, 12,59 dB, 10,52 dB, 8,58 dB e 6,79 dB, respectivamente [15]. Considerou-se que os ganhos dos amplificadores ópticos compensam exatamente as perdas de um enlace óptico. Como penalidade física, considerou-se o ruído ASE, gerado nos amplificadores ópticos. Dessa forma, a expressão da rela o sinal-ruído óptica no nó destino pode ser calculada do seguinte modo [16]:

$$OSNR_{out} = \frac{P_{in}}{N_{in} + N_{AMP-TOTAL}}, \quad (1)$$

em que N_{in} representa a potência de ruído gerada no transmissor e $N_{AMP-TOTAL}$ a potência total de ruído ASE, sendo dada por [16]:

$$N_{AMP-TOTAL} = N_{AMP-AP} + N_{AMP-AL} + N_{AMP-PA}, \quad (2)$$

em que N_{AMP-AP} representa a parcela da potência de ruído ASE total gerada pela presença dos amplificadores ópticos de potência, N_{AMP-AL} a parcela referente à presença dos amplificadores ópticos de linha e N_{AMP-PA} a que se refere à presença dos pré-amplificadores ao longo da rota analisada. N_{AMP-AP} , N_{AMP-AL} e N_{AMP-PA} foram modeladas considerando a arquitetura de nó e de enlace denominada de AP, AL[$s + 1$], PA e utilizando as equações (4) a (6) propostas por Sarmiento *et. al* [16].

Para realizar a comparação entre as diferentes estratégias de atualização dos enlaces com fibras ópticas ULL, utilizou-se um simulador de código aberto em Python (SONDA [17]). O princípio de funcionamento desse simulador consiste em verificar quatro condições básicas para que uma chamada seja estabelecida, são elas: (1) banda de transmissão disponível; (2) rota disponível; (3) *slots* contínuos e contíguos disponíveis e (4) QoT acima do limiar para o sinal óptico recebido. O algoritmo de roteamento utilizado foi o de menor distância física (SP – *Shortest Path*) e o de atribuição espectral foi o do primeiro encaixe (*First Fit*). Para cada solicitação de chamada, a alocação do formato de modulação seguiu a ordem do mais eficiente ao menos eficiente em termos espectrais. A alocação de banda foi considerada fixa, com base no produto entre a constante de atenuação e o fator de ruído do amplificador óptico utilizado na respectiva banda de transmissão, ou seja, C→L→S. A topologia considerada nas simulações foi a US-Backbone. Os parâmetros utilizados nas simulações foram os seguintes: (1) distância entre os amplificadores ópticos de linha de 70 km; (2) formatos de modulação: 4, 8, 16, 32 e 64-QAM; (3) largura de banda de referência de 12,5 GHz; (4) largura de banda dos *slots* de 12,5 GHz; (5) perdas no multiplexador e no demultiplexador de 0 dB; (6) perda no comutador de 5 dB; (7) relação sinal-ruído óptica de entrada de 30 dB e (7) taxas de transmissão de bit de 100 a 400 Gbps com distribuição uniforme.

A metodologia para se determinar a potência óptica de entrada por *slot* (P_{in}) para cada banda tomou como base a análise da viabilidade da maior rota, dentre as mais curtas encontradas pelo algoritmo de Dijkstra, utilizando a distância física como função custo do enlace. Assumiu-se que a solicitação de chamada que utilizasse essa maior rota deveria ter QoT igual ou acima do limiar correspondente ($OSNR_{out} \geq OSNR_{th}$), quando considerados: a maior taxa de transmissão de bit (400 Gbps) e o formato de modulação menos eficiente (4-QAM). Além disso, o menor valor de carga simulado (2000 Erlangs) foi obtido considerando: (1) 1000 bloqueios como critério de parada e (2) um valor de probabilidade de bloqueio de chamadas igual, ou próximo, a 10^{-3} . Os parâmetros referentes às bandas S, C e L se encontram descritos na Tabela I [6], [7], [18].

Para comparação com o algoritmo genético proposto neste artigo (Seção III), foram implementadas as seguintes heurísticas disponíveis na literatura: PL [2], [3], [8], [9], [11], [13], SRT [2], [8], [9], [13], RMLSA [2], [8] e RND [3], [8], [11].

TABELA I: Parâmetros referentes às bandas S, C e L [5]–[7], [18].

Parâmetros	Banda S	Banda C	Banda L
Frequência inicial (THz)	196,08	191,69	184,62
Frequência final (THz)	205,48	196,08	191,69
Frequência central (THz)	200,78	193,89	188,16
Número de <i>slots</i>	752	352	566
Figura de ruído (dB)	7	5,5	6
Coefficiente de atenuação – G652-D (dB/km)	0,198	0,191	0,194
Coefficiente de atenuação – PSCF-130 (dB/km)	0,163	0,150	0,152
Potência óptica de entrada (dBm)	-0,82	-3,50	-2,94

V. RESULTADOS

Fig. 2 ilustra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função do número de gerações. Foram considerados 100 bloqueios e o valor de carga na rede de 2000 Erlangs para obtenção da curva de convergência do algoritmo genético proposto. Observa-se uma redução na probabilidade de bloqueio de chamadas entre o melhor indivíduo da 100ª geração ($PB \approx 8 \times 10^{-3}$) e o da 1ª geração ($PB \approx 2,59 \times 10^{-2}$) em torno de aproximadamente 69,10%. Além disso, percebe-se que esse melhor indivíduo pode ser obtido já na 22ª geração.

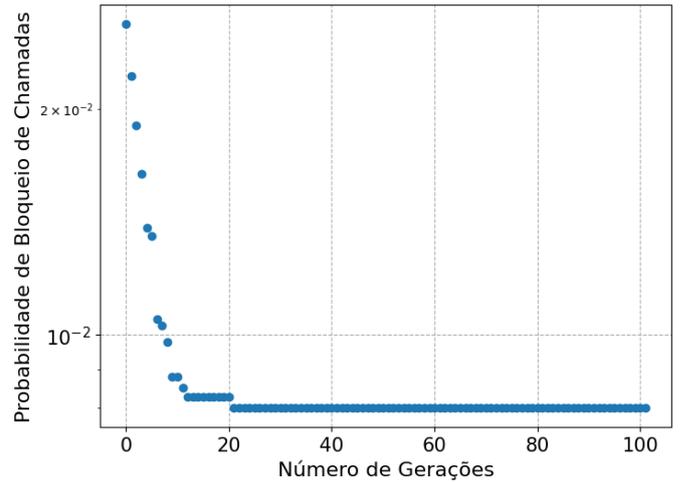


Fig. 2: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função do número de gerações.

Fig. 3 ilustra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga na rede, considerando a disposição de enlaces na topologia com: (1) apenas fibra óptica G652-D [5], [6], (2) apenas fibra óptica PSCF-130 [7] e utilização das estratégias: (3) PL; (4) SRT; (5) RMLSA; (6) RND e (7) GA para utilização de 30% dos enlaces com fibra óptica PSCF-130 [7]. Nessa simulação, foram considerados 1000 bloqueios para cada valor de carga na rede. No caso, com relação ao uso de apenas fibra óptica G652-D [5], [6] ($PB \approx 1,09 \times 10^{-1}$) na topologia, utilizar 100% dos enlaces com fibra óptica PSCF-130 [7] ($PB \approx 7,0 \times 10^{-4}$) fornece uma redução de aproximadamente 99,35% em termos de PB . Utilizando cerca de 30% dos enlaces com a fibra PSCF-130 [7] na topologia e considerando a estratégia PL, tem-se uma redução de aproximadamente ($PB \approx 4,84 \times 10^{-2}$) 55,39%. Para a estratégia SRT ($PB \approx 4,14 \times 10^{-2}$), tem-se 61,84%. Para a estratégia RMLSA ($PB \approx 3,36 \times 10^{-2}$), tem-se 69,03%.

Para a estratégia RND ($PB \approx 5,63 \times 10^{-2}$), tem-se 48,11%. Por fim, com a estratégia proposta neste artigo, utilizando algoritmo genético ($PB \approx 1,27 \times 10^{-2}$), obtém-se a maior redução dentre todas as estratégias consideradas neste artigo, de aproximadamente 88,29%. Comparando ainda com o resultado obtido pela melhor heurística (RMLSA), o algoritmo genético proposto obteve uma redução de aproximadamente 62,20% em termos de PB .

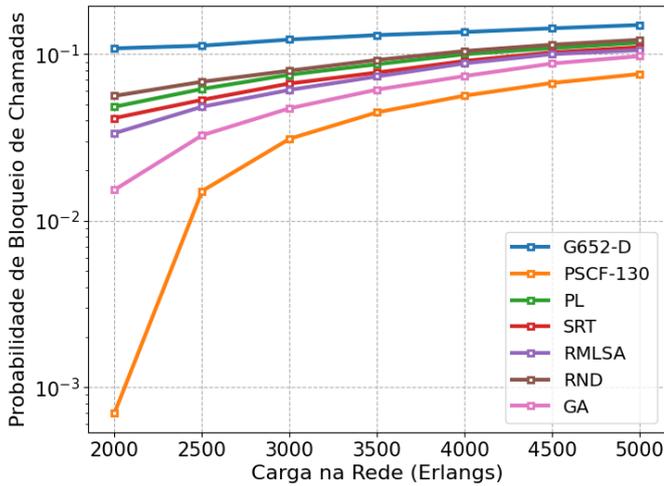


Fig. 3: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga na rede, considerando a disposição de enlaces na topologia com: (1) apenas fibra óptica G652-D [5], [6], (2) apenas fibra óptica PSCF-130 [7] e utilização das estratégias: (3) PL; (4) SRT; (5) RMLSA; (6) RND e (7) GA para utilização de 30% dos enlaces com fibra óptica PSCF-130 [7].

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, propôs-se um algoritmo genético para atualização parcial de uma rede óptica elástica multibanda, substituindo 30% dos enlaces que utilizam fibra óptica G652-D [5], [6] por outros que utilizam fibra óptica PSCF-130 [7]. Para isso, considerou-se o ruído de emissão espontânea amplificada e três bandas de transmissão (S, C e L).

O algoritmo genético proposto se baseia na estrutura do algoritmo genético clássico [14], possuindo as etapas de entrada de dados, geração da população inicial, cruzamento, mutação e seleção. No entanto, foi implementada a restrição do número de enlaces que são substituídos de modo a permitir uma comparação justa com heurísticas disponíveis na literatura.

Com isso, no processo de convergência, observou-se uma redução na probabilidade de bloqueio de chamadas entre o melhor indivíduo da 100ª geração ($PB \approx 8 \times 10^{-3}$) e o da 1ª geração ($PB \approx 2,59 \times 10^{-2}$) em torno de aproximadamente 69,10%. Além disso, percebeu-se que esse melhor indivíduo poderia ser obtido já na 22ª geração do processo evolutivo.

Em comparação com as heurísticas implementadas e disponíveis na literatura (PL, SRT, RMLSA e RND), o algoritmo genético proposto obteve o melhor desempenho ao longo de todo o intervalo de variação de carga na rede, obtendo uma redução, em termos de PB , de aproximadamente 62,20%,

em comparação com o resultado obtido pela melhor heurística (RMLSA) no valor de carga de 2000 Erlangs.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Zhu, D. Peckham, A. McCurdy, R. Lingle, B. Palsdottir, M. F. Yan, P. W. Wisk, and D. J. DiGiovanni, "Large-area low-loss fibers and advanced amplifiers for high-capacity long-haul optical networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 7, pp. A55–A63, 2016.
- [2] Y. Guan, H. Jiang, M. Gao, S. K. Bose, and G. Shen, "Migrating elastic optical networks from standard single-mode fibers to ultra-low loss fibers: strategies and benefits," in *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2017, pp. W4H–3.
- [3] Y. Li, X. Fu, S. K. Bose, and G. Shen, "Scheduling strategies for network link upgradation with ultra low loss fibers," in *Asia Communications and Photonics Conference (ACPC)*. IEEE, 2018, pp. 1–3.
- [4] D. Wang, Y. Li, D. Zhang, H. Zhou, Y. Zhao, L. Wang, R. Tang, X. Zhao, L. Zhang, J. Wu *et al.*, "Ultra-low-loss and large-effective-area fiber for 100 gbit/s and beyond 100 gbit/s coherent long-haul terrestrial transmission systems," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, p. 17162, 2019.
- [5] "Optical fiber attenuation," <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052294-optical-fiber-attenuation>, acesso em: 02 de Julho de 2022.
- [6] A. A. Santos-Júnior, J. R. N. Arcanjo, H. A. Pereira, and R. C. A. Almeida-Júnior, "Analysis of the impact of wavelength-dependent physical impairments considering a multiband elastic optical network," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 92–104, 2023.
- [7] Y. Yamamoto, Y. Kawaguchi, and M. Hirano, "Low-loss and low-nonlinearity pure-silica-core fiber for C- and L-band broadband transmission," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 321–326, 2016.
- [8] Y. Li, Y. Yan, W. Chen, S. K. Bose, and G. Shen, "Strategies and benefits of deploying ultralow-loss fiber links in an elastic optical network," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 5, pp. 238–249, 2019.
- [9] Y. Li, W. Chen, S. K. Bose, and G. Shen, "Efficient multi-stage deployment of ultra-low loss fibers in elastic optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 14, pp. 3542–3552, 2020.
- [10] Y. Liu, J. Hu, Y. Zhao, J. Wang, Y. Fu, J. Li, and Y. Li, "Scheduling strategy for multi-stage ultra-low loss fiber deployment in an elastic optical network," in *International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. IEEE, 2022, pp. 1–3.
- [11] H. Yang, Y. Li, N. Guo, G. Shen, and B. Mukherjee, "Deploying ultra-low loss fibers for enhancing lightpath provisioning performance in an elastic optical network," in *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2021, pp. W1F–6.
- [12] N. Guo, S. K. Bose, B. Mukherjee, and G. Shen, "Impact of fiber attenuation and effective area on spectrum efficiency of elastic optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 8, pp. 2200–2213, 2021.
- [13] Y. Li, K. Ouyang, N. Guo, V. Curri, and G. Shen, "Ultra-low loss fiber deployment in elastic optical networks with fixed and variable topologies," *Journal of Lightwave Technology*, 2024.
- [14] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, "A review on genetic algorithm: past, present, and future," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, pp. 8091 – 8126, 2020. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:226227415>
- [15] B. C. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki, "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776–1800, 2015.
- [16] E. B. Sarmento, J. R. N. Arcanjo, and H. A. Pereira, "Análise de desempenho de arquiteturas de nó e de enlace em redes ópticas multibandas," in *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBTr)*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023, pp. 1–5.
- [17] E. B. Sarmento, G. B. Guerra-Júnior, M. G. Costa, I. M. A. Santos, H. A. Pereira, and R. C. A. Almeida-Júnior, "SONDA: Simulador em python para redes óticas," in *X Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM)*. IECOM, 2020, pp. 1–2.
- [18] A. Ferrari, E. Virgillito, and V. Curri, "Band-division vs. space-division multiplexing: a network performance statistical assessment," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1041–1049, 2020.