

Otimização da Alocação de Comprimentos de Onda Considerando o Efeito de Mistura de Quatro Ondas

Helder A. Pereira, Carmelo J. A. Bastos-Filho, Daniel A. R. Chaves e Joaquim F. Martins-Filho

Resumo—Este artigo apresenta uma nova estratégia para utilização do efeito não-linear de mistura de quatro ondas como critério para alocação de comprimentos de onda em um enlace óptico. Para isso, utilizamos uma nova formulação que calcula a figura de ruído de uma fibra óptica para cada comprimento de onda propagante na alocação. Uma análise do comportamento das alocações quanto à adição, remoção e alocação aleatória de comprimentos de onda é realizada, além da determinação da melhor alocação e de alocações satisfatórias utilizando os algoritmos exaustivo e genético, e critério de qualidade de serviço baseado em taxa de erro por bit. Mostramos que nossa estratégia é capaz de determinar o número máximo de comprimentos de onda alocáveis, e a posição deles na grade, que minimizam o efeito de mistura de quatro ondas.

Palavras-Chave—Algoritmos Genéticos, Atribuição de Comprimentos de Onda, Mistura de Quatro Ondas, Redes Ópticas.

Abstract—This article presents a new strategy to assign wavelengths in an optical link considering the four wave mixing effect in the optical fibers. The four wave mixing effect is taken into account by using a new formulation that calculates the fiber noise figure for each wavelength. We analyze the assignments when there are additions and droppings of wavelengths, considering the best and satisfactory assignments using the exhaustive and genetic algorithms, and the quality of service criterion based on bit error rates. We show that our strategy is capable of determining the maximum number of wavelengths and their positions in the grid to minimize the impact of the four wave mixing effect.

Keywords—Four Wave Mixing, Genetic Algorithm, Optical Networks, Wavelength Assignment.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a conexão entre sistemas evoluiu de simples conexões ponto-a-ponto para grandes sistemas em rede conectados entre si. Com a crescente demanda por largura de banda em sistemas de telecomunicações, predominando aplicações multimídia e o aumento no tráfego da internet, o conceito de redes opacas está cada vez mais sendo substituído por redes transparentes (*all-optical networks*). Para essas redes, as funções de multiplexação, demultiplexação, comutação de dados e compensação dos efeitos lineares (atenuação e dispersão) são realizadas no domínio óptico [1].

Com a crescente necessidade de conexão entre sistemas e o aumento da demanda por alta capacidade de transmissão nas telecomunicações, a multiplexação por divisão em comprimento de onda (*WDM - wavelength division multiplexing*) viabiliza a utilização otimizada da largura de banda disponível na fibra óptica. Considerando um número grande de sinais

transmitidos, espaçamento pequeno entre canais e a presença de amplificadores ópticos nos enlaces, fenômenos não-lineares podem surgir, dependendo da fibra utilizada e da potência de cada canal transmitido [2].

Do ponto de vista da camada de rede, vários algoritmos de roteamento e alocação de comprimentos de onda (*RWA - Routing and Wavelength Assignment*) foram propostos na literatura. Alguns parâmetros de otimização, considerados por tais algoritmos, envolvem por exemplo: menor número de enlaces percorridos, menor distância, caminhos alternativos para estabelecimento das conexões e comportamento dinâmico da rede. Alguns critérios para alocação de comprimentos de onda têm sido estudados, como alocação aleatória, de acordo com uma lista pré-definida ou utilizando critérios que consideram o balanceamento de cargas na rede [3][4].

Enquanto que os efeitos lineares podem ser compensados por dispositivos ópticos bem conhecidos na literatura (amplificadores ópticos e compensadores de dispersão), as penalidades devido aos efeitos não-lineares não podem ser desprezadas, pois limitam o estabelecimento das conexões nas redes ópticas e devem ser incluídas no processo de otimização utilizado pelos algoritmos de RWA. Dentre os efeitos não-lineares, considerando a utilização de fibras com dispersão deslocada (*DSF - Dispersion Shifted Fiber*) e com dispersão deslocada não-nula (*NZDSF - Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*) nos enlaces ópticos e um crescente aumento no número de comprimentos de onda, o efeito de FWM pode ser limitante para alocações de comprimentos de onda em sistemas WDM, devido à perda de potência e geração de ruído entre os comprimentos de onda propagantes [5].

Do ponto de vista da camada física, alguns artigos propõem algoritmos de RWA que consideram as penalidades devido à presença de efeitos lineares e não-lineares [6], utilizando métodos numéricos aplicados à equação não-linear de Schrödinger [7], seleção de rotas considerando ruídos aditivos e multiplicativos na propagação dos sinais [8][9][10], bem como atribuição de comprimentos de onda segundo critérios de maior ganho na faixa de amplificação óptica [11], minimização do efeito de mistura de quatro ondas (*FWM - Four Wave Mixing*) na rota selecionada ou nas rotas estabelecidas [12][13][14].

Neste artigo, propomos otimizar a alocação de comprimentos de onda em um enlace óptico, minimizando o efeito de FWM entre eles e estimando alocações aceitáveis que não comprometam a qualidade de serviço (*QoS - Quality of Service*) exigida para estabelecimento das conexões nas redes ópticas.

Analisamos a otimização através da utilização de dois

Grupo de Fotônica, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, 50740-530, Recife-PE, Brasil. E-mail: jfmf@ufpe.br

algoritmos: o exaustivo e o genético. O primeiro examina todas as possibilidades de alocações de comprimento de onda, para uma grade de canais e comprimentos de onda alocáveis definidos previamente, enquanto que o segundo, utilizando o processo evolutivo nas soluções possíveis, executa um esforço computacional menor para determinar a melhor alocação de comprimentos de onda.

O artigo está estruturado de forma que na seção II apresentamos a formulação utilizada para quantificar o efeito de FWM no enlace óptico, na seção III definimos os parâmetros e os algoritmos utilizados no processo de otimização, na seção IV apresentamos os resultados das simulações realizadas e na seção V apresentamos as conclusões referentes a este trabalho.

II. FORMULAÇÃO UTILIZADA PARA QUANTIFICAR O EFEITO DE MISTURA DE QUATRO ONDAS

A dependência não-linear do índice de refração com a intensidade dos campos eletromagnéticos propagantes origina diversos fenômenos não-lineares (auto-modulação de fase, modulação de fase cruzada, espalhamento Raman e Brillouin, FWM) descritos na literatura. O efeito de FWM surge quando três ondas eletromagnéticas, propagando-se simultaneamente na fibra, geram uma quarta onda com frequência igual a

$$\omega_4 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3. \quad (1)$$

Considerando que nem todas as combinações satisfazem o critério de casamento de fase e que assumimos a condição de propagação de sistemas multicanais próximos do zero de dispersão, as combinações de frequências mais prejudiciais ao sistema são determinadas por

$$\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3. \quad (2)$$

O efeito de FWM degrada o desempenho de sistemas WDM, fazendo com que uma quantidade significativa de potência, em um comprimento de onda específico, seja transferida para comprimentos de onda adjacentes, além de gerar ruído entre eles [15]. Desse modo, podemos quantificar esse efeito não-linear, para uma determinada alocação, calculando o fator de ruído (F) em cada comprimento de onda, utilizando um método de avaliação de desempenho optoeletrônico, a partir de [16]

$$F = e^{\alpha \cdot L} \cdot \left[1 + \frac{\langle \Delta i_{ruído, FWM}^2 \rangle \cdot e^{\alpha \cdot L}}{2 \cdot q \cdot \Re \cdot P_{in} \cdot B_o} \right], \quad (3)$$

onde P_{in} representa a potência do sinal óptico, \Re a responsividade do fotodetector, q a carga do elétron, L o comprimento do enlace óptico, α o coeficiente de atenuação linear da fibra, B_o a largura a 3dB do filtro de demultiplexação, igual ao espaçamento entre canais, e $\langle \Delta i_{ruído, FWM}^2 \rangle$ corresponde ao ruído aditivo relacionado com o efeito de FWM obtido em [16] e dado por

$$\begin{aligned} \langle \Delta i_{ruído, FWM}^2 \rangle = & \Re^2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n P_i^2 + 6 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n P_i P_j + \right. \\ & + 4 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sqrt{P_i P_j} \cdot \left(\sum_{k=0}^n P_k + 2 \cdot \sum_{k=0, k \neq i \neq j}^n P_k \right) + \\ & + 24 \cdot \delta [n-3] \cdot \sqrt{P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3} + \\ & \left. + 24 \cdot u [n-4] \cdot \sum_{i=0}^n \sqrt{\prod_{j=0, i \neq j}^n P_j} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Onde P_0 é a potência do sinal, P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) são as potências das componentes de ruído na frequência do sinal, $\delta[n]$ é a função de Kronecker e $u[n]$ é a função degrau no regime discreto.

A SNR de saída (SNR_{out}) pode ser determinada a partir do conhecimento de F para cada comprimento de onda. Desse modo, podemos analisar a viabilidade das alocações de comprimentos de onda segundo critérios de QoS pré-estabelecidos. Estipulamos como critério de QoS uma SNR_{out} igual a 22,9652 dB (SNR_{QoS}) correspondendo a uma taxa de erro por bit (BER - *Bit Error Rate*) de aproximadamente 10^{-12} [17]. Os parâmetros utilizados nas simulações são definidos na Tabela I.

III. ALGORITMOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA

Definindo-se o número de comprimentos de onda disponíveis na grade (N_t) e o número de alocáveis (N_i), utilizamos a codificação binária para representar uma alocação de comprimentos de onda no algoritmo de otimização, ou seja, o dígito '0' representa comprimento de onda inativo e o dígito '1' significa comprimento de onda ativo na grade. Dessa forma, considerando a potência de entrada de cada canal, o comprimento de onda da grade de canais e o espaçamento entre eles, podemos calcular a degradação da SNR de cada comprimento de onda na alocação devido aos efeitos de FWM e atenuação gerados no decorrer da propagação dos sinais na fibra óptica, utilizando a equação (3).

O processo de otimização é realizado em duas etapas, utilizando dois algoritmos distintos, o exaustivo e o genético, para determinação das melhores alocações e alocações satisfatórias para transmissão WDM em um enlace óptico.

Na primeira etapa utilizamos o algoritmo exaustivo que examina todas as alocações possíveis para um dado par de parâmetros (N_t e N_i). A análise de cada alocação é baseada no critério da menor SNR calculada referente a um comprimento de onda pertencente à alocação ($SNR_{<}$). O processo de determinação da $SNR_{<}$ para cada alocação é chamado de cálculo de força e o número de cálculos de força (C_F) executados pelo algoritmo exaustivo é determinado por

$$C_F = \frac{N_t!}{(N_t - N_i)! \cdot N_i!}. \quad (5)$$

Nesta fase, determinamos a melhor alocação encontrada considerando os parâmetros informados na Tabela I.

Na segunda etapa utilizamos o algoritmo genético (*GA - Genetic Algorithm*), que se revela ideal para situações de otimização onde podemos encontrar múltiplas soluções que se tornam adequadas ao problema. Este algoritmo baseia-se no mecanismo de seleção natural idealizado por Charles Darwin, no qual indivíduos mais fortes possuem maior probabilidade de sobreviver em um ambiente específico.

Referente ao nosso problema de otimização da alocação de comprimentos de onda em um enlace óptico, o GA executa os seguintes passos no decorrer do processo evolutivo das alocações:

- 1) **População Inicial:** Com N_t e N_i definidos, diferentes alocações (indivíduos) são criadas aleatoriamente, ou seja, N_i posições na grade de comprimentos de onda são aleatoriamente selecionadas de modo que os transmissores ópticos são ativados nos comprimentos de onda associados. Dessa forma, um conjunto (população) com P indivíduos possíveis é criado inicialmente.
- 2) **Cruzamento:** Formada a população, todos os pares possíveis de indivíduos são examinados sequencialmente, de modo que a operação de cruzamento é realizada em pares selecionados de acordo com um critério probabilístico pré-estabelecido (P_{cruz}). Para isso, dado um par de indivíduos (I_1 e I_2), seleciona-se aleatoriamente um transmissor cujo estado esteja ativo em I_1 e inativo em I_2 , efetuando-se uma troca de estados entre eles. Novamente, realizamos a operação de troca de estados em um transmissor agora considerando a seleção aleatória de um transmissor que esteja inativo em I_1 e ativo em I_2 . Após o cruzamento, indivíduos resultantes desta operação são adicionados à população desde que sejam diferentes dos já existentes.
- 3) **Mutação:** O indivíduo é selecionado, seguindo critérios probabilísticos pré-estabelecidos (P_{mut}), de modo que posições dos transmissores, referentes aos estados ativo e inativo na grade de comprimentos de onda, são determinadas aleatoriamente e trocadas entre si, formando assim um novo indivíduo na população.
- 4) **Seleção:** Nesta operação, os P indivíduos com valores de $SNR_{<}$ mais elevados da população são selecionados para compor uma nova população e dar continuidade ao processo evolutivo, ou seja, repetição das operações anteriores até que se atinja um critério de parada pré-estabelecido ou o número de gerações (G) atinja o valor limite [18].

A Figura 1 ilustra as operações realizadas pelo GA no processo de otimização das alocações de comprimento de onda. A expressão que relaciona C_F para o GA depende dos parâmetros genéticos (P , G , P_{cruz} e P_{mut}). Para determinação de C_F , consideramos que são realizados P cálculos de força para todos os indivíduos que compõe a população inicial, e posteriormente, apenas nos indivíduos que sofrem cruzamento e mutação, ou seja, $2 \cdot P \cdot P_{cruz} + P \cdot P_{mut}$, em um número de gerações especificado. Portanto, obtemos

$$C_F = P \cdot [1 + G \cdot (2 \cdot P_{cruz} + P_{mut})]. \quad (6)$$

Podemos utilizar o GA para encontrar a melhor alocação ou as alocações satisfatórias segundo o critério de parada (SNR_{QoS}) pré-estabelecido. No primeiro caso, o GA utiliza como critério de parada a melhor solução encontrada pelo algoritmo exaustivo.

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

| Parâmetro | Valor | Definição |
|-------------------|------------|--|
| N_i | 8 | Número de comprimentos de onda alocáveis |
| N_t | 16 | Número de comprimentos de onda da grade |
| P_{cruz} | 50 % | Probabilidade de cruzamento |
| P_{mut} | 5 % | Probabilidade de mutação |
| α | 0,2 dB/km | Coefficiente de atenuação da fibra óptica |
| L | 40 km | Comprimento do enlace óptico |
| P_{in} | 3 dBm | Potência de entrada do sinal |
| SNR_{in} | 60 dB | Relação sinal-ruído de entrada |
| SNR_{QoS} | 22,9652 dB | Relação sinal-ruído utilizada como critério de parada |
| B_o | 50 GHz | Largura a 3dB do filtro de demultiplexação |
| Δf | 50 GHz | Espaçamento entre canais |
| λ_i | 1550,12 nm | Comprimento de onda inicial da grade |
| λ_{NZDSF} | 1530 nm | Comprimento de onda de dispersão zero para fibra NZDSF |

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os parâmetros fornecidos na Tabela I podemos encontrar as melhores alocações de comprimentos de onda utilizando o algoritmo exaustivo, para um intervalo de variação de P_{in} entre -3 e 9 dBm, e comparar os resultados obtidos para $SNR_{<}$ com o limiar de BER correspondente a 10^{-12} , como mostra a Figura 2. Para cada Δf , determinamos qual P_{in} podemos utilizar de modo a garantir a existência de alocações que sejam adequadas aos padrões de QoS para transmissões ópticas. Portanto, para $\Delta f = 25$ GHz temos que P_{in} deve ser inferior a 2 dBm, assim como para $\Delta f = 50$ GHz temos $P_{in} < 5$ dBm e para $\Delta f = 100$ GHz temos $P_{in} < 9$ dBm.

Em redes ópticas dinâmicas frequentemente ocorre a adição de comprimentos de onda para estabelecimento de novas conexões, enquanto existir disponibilidade nos equipamentos WDM de transmissão e recepção. Portanto, considerando a melhor alocação para $N_i = 7$, podemos analisar o que ocorre com a $SNR_{<}$ e o comportamento da alocação caso haja a adição de um comprimento de onda. Os resultados são mostrados na Tabela II, que apresenta várias alocações e suas respectivas $SNR_{<}$. O algoritmo exaustivo é utilizado para obter a melhor alocação para $N_i = 7$ e $N_i = 8$. Para a melhor opção de alocação para $N_i = 7$, temos $SNR_{<} \approx 27,3$ dB,

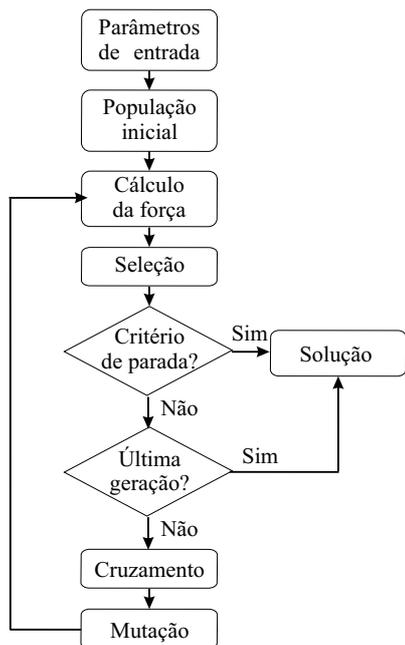


Fig. 1. Algoritmo genético utilizado para otimização da alocação de comprimentos de onda em um enlace óptico.

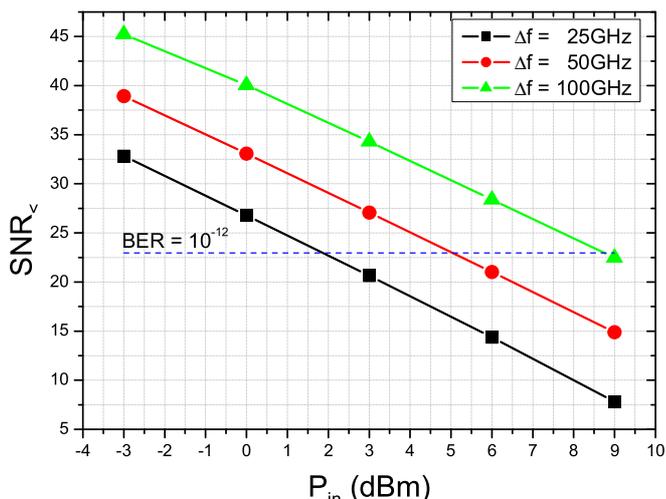


Fig. 2. Menor relação sinal-ruído de saída de um comprimento de onda na melhor alocação em função da variação da potência de entrada do sinal para diferentes espaçamentos entre canais.

que está acima da SNR_{QoS} e portanto é uma alocação satisfatória. Se tentarmos gerar uma alocação para $N_i = 8$, a partir da melhor alocação para $N_i = 7$, ativando $\lambda_2, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{12}, \lambda_{13}$ ou λ_{15} , obtemos $SNR_{<}$ abaixo do valor de SNR_{QoS} , como mostra a Tabela II.

Observamos que a melhor alocação para $N_i = 8$, apresentada na Tabela II, obedece ao critério de QoS e é bem diferente da melhor alocação para $N_i = 7$. Ou seja, adicionar aleatoriamente comprimentos de onda a partir da melhor alocação para um dado N_i , pode comprometer a QoS de todos os comprimentos de onda envolvidos na alocação devido às considerações do efeito de FWM. Com isso, é importante adicionar o comprimento de onda em uma posição

que torne viável a alocação e rearranjar posições referentes aos outros comprimentos de onda na grade, como pode ser observado nas melhores alocações para $N_i = 7$ e $N_i = 8$.

TABELA II
ANÁLISE DA ADIÇÃO DE 1 COMPRIMENTO DE ONDA A PARTIR DA MELHOR ALOCAÇÃO PARA $N_i = 7$

| Alocação | Tipo | Menor SNR_{out} |
|------------------|------------------------------------|-------------------|
| 1010010001100101 | Melhor para $N_i = 7$ | 27,3597 dB |
| 1110010001100101 | λ_2 ativo ($N_i = 8$) | 18,4981 dB |
| 1011010001100101 | λ_4 ativo ($N_i = 8$) | 21,4979 dB |
| 1010110001100101 | λ_5 ativo ($N_i = 8$) | 20,7228 dB |
| 1010011001100101 | λ_7 ativo ($N_i = 8$) | 20,5390 dB |
| 1010010101100101 | λ_8 ativo ($N_i = 8$) | 20,6165 dB |
| 1010010011100101 | λ_9 ativo ($N_i = 8$) | 17,9045 dB |
| 1010010001110101 | λ_{12} ativo ($N_i = 8$) | 17,7575 dB |
| 1010010001101101 | λ_{13} ativo ($N_i = 8$) | 19,3454 dB |
| 1010010001100111 | λ_{15} ativo ($N_i = 8$) | 17,9585 dB |
| 1010100101010011 | Aleatória ($N_i = 8$) | 21,0268 dB |
| 1100101001001101 | Melhor para $N_i = 8$ | 23,5431 dB |

Partindo da melhor alocação para $N_i = 8$, podemos considerar que um determinado comprimento de onda da alocação precisou ser removido em algum momento por causa de uma conexão liberada. Com isso, podemos analisar o que acontece com a $SNR_{<}$ para a remoção de comprimentos de onda na grade.

Considerando os comprimentos de onda removidos em posições diversas, podemos constatar, pela Tabela III, que devido à redução do efeito de FWM, quando removemos canais, obtemos QoS satisfatória para as alocações. Porém, deve-se perceber que partimos de uma alocação que obedece ao critério de QoS. Para uma alocação aleatória, obtemos uma alocação que inviabiliza o estabelecimento das conexões quando consideramos critérios de QoS.

TABELA III
ANÁLISE DA REMOÇÃO DE 1 COMPRIMENTO DE ONDA A PARTIR DA MELHOR ALOCAÇÃO PARA $N_i = 8$

| Alocação | Tipo | Menor SNR_{out} |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------|
| 1100101001001101 | Melhor para $N_i = 8$ | 23,5431 dB |
| 0100101001001101 | λ_1 inativo ($N_i = 7$) | 24,2890 dB |
| 1000101001001101 | λ_2 inativo ($N_i = 7$) | 25,2064 dB |
| 1100001001001101 | λ_5 inativo ($N_i = 7$) | 24,9220 dB |
| 1100100001001101 | λ_7 inativo ($N_i = 7$) | 25,6200 dB |
| 1100101000001101 | λ_{10} inativo ($N_i = 7$) | 26,6771 dB |
| 1100101001000101 | λ_{13} inativo ($N_i = 7$) | 25,3562 dB |
| 11001010010001001 | λ_{14} inativo ($N_i = 7$) | 24,4440 dB |
| 1100101001001100 | λ_{16} inativo ($N_i = 7$) | 24,5076 dB |
| 1010101000010101 | Aleatória ($N_i = 7$) | 20,1765 dB |
| 1010010001100101 | Melhor para $N_i = 7$ | 27,3597 dB |

Com o algoritmo exaustivo, considerando $N_i = 8$ e $N_t = 16$, obtemos a partir da equação (5) que são necessários 12870 cálculos de força (C_F) para determinarmos a melhor alocação de comprimentos de onda. Com o GA, podemos obter a melhor alocação com C_F consideravelmente menor. Para isso devemos determinar o ponto de convergência, onde encontramos a melhor alocação, segundo parâmetros genéticos otimizados (P e G), resultando em C_F inferior e consequentemente menor esforço computacional comparado com o algoritmo exaustivo.

Para isso, precisamos analisar o comportamento do GA, considerando variações dos parâmetros genéticos (P e G), e do C_{FMedio} na obtenção da melhor alocação encontrada pelo algoritmo exaustivo.

A Figura 3 mostra o número médio de cálculos de força (C_{FMedio}) executados pelo GA para encontrar a melhor alocação determinada pelo algoritmo exaustivo, em função da população inicial. Verificamos que para $P = 50$, C_{FMedio} é mínimo, ou seja, nesse ponto o GA realiza o menor esforço computacional para encontrar a melhor alocação de comprimentos de onda. Note ainda que para todos os valores de P simulados, o C_{FMedio} é muito menor para o GA em comparação com o valor encontrado utilizando o algoritmo exaustivo.

Para determinarmos o número de gerações (G) ótimo para o GA, a partir de $P = 50$, realizamos simulações para obter o número médio de gerações (G_{Medio}) necessárias para encontrar a melhor alocação determinada pelo algoritmo exaustivo, em função da população inicial, como mostra a Figura 4. Verificamos que o ponto ótimo para P e G é $P = 50$ e $G = 27$, pois para populações iniciais menores são necessárias mais gerações para encontrar a melhor alocação. Enquanto que para populações iniciais maiores, o número de gerações necessárias permanece praticamente o mesmo.

Vale a pena ressaltar ainda, a partir da Figura 3 e da Figura 4, que G_{Medio} e C_{FMedio} têm pouca dependência com a potência dos canais (P_{in}). Isso se deve ao critério de parada do GA nessas simulações, que consiste da busca pela melhor alocação encontrada pelo algoritmo exaustivo.

Para o ponto de convergência ($P_{conv} = 50$ e $G_{conv} = 27$), C_F pode ser determinado a partir da equação (6). Portanto, para o GA, $C_F \approx 1467,5$, sendo portanto aproximadamente 8,49 vezes menor que o algoritmo exaustivo, para os dados fornecidos na Tabela I.

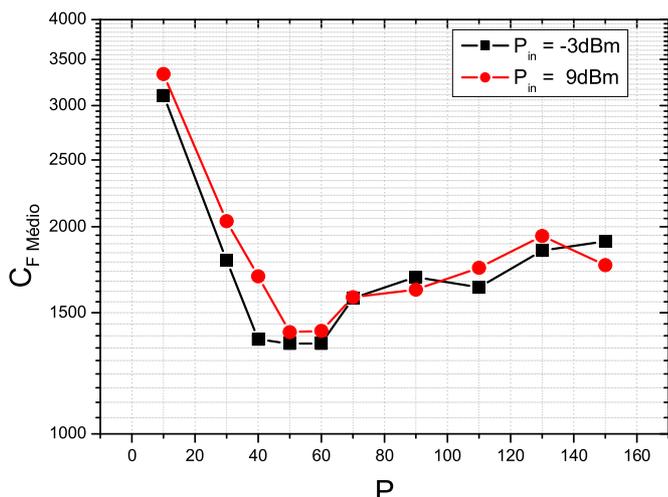


Fig. 3. Número médio de cálculos de força executados pelo algoritmo genético para encontrar a melhor alocação determinada pelo exaustivo, em função da população inicial.

Após a análise de convergência do GA para encontrar as melhores alocações de comprimento de onda, podemos determinar alocações satisfatórias segundo o critério de pa-

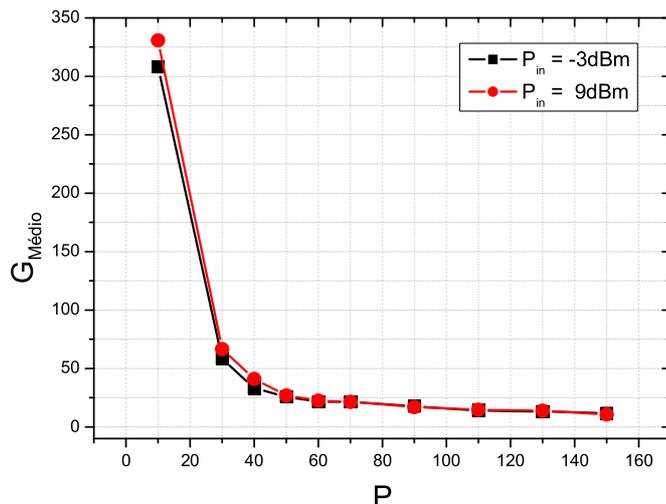


Fig. 4. Número médio de gerações necessárias para encontrar a melhor alocação determinada pelo algoritmo exaustivo, em função da população inicial.

rada estabelecido por SNR_{QoS} . Ou seja, para os parâmetros fornecidos na Tabela I, podemos encontrar alocações que atendam critérios de QoS para transmissão óptica, viabilizando o estabelecimento de conexões com os comprimentos de onda respectivos da alocação encontrada.

Portanto, utilizando o ponto de convergência ($P_{conv} = 50$ e $G_{conv} = 27$), SNR_{QoS} como critério de parada e os parâmetros fornecidos na Tabela I, a Figura 5 ilustra o comportamento do GA e do C_F para determinação das alocações satisfatórias, considerando uma variação de P_{in} de 0 a 5 dBm.

Para P_{in} com valores inferiores a 2,5 dBm, as alocações são encontradas a partir da população inicial, resultando em $G = 0$ e $C_F = 50$. Para valores de P_{in} superiores a 2,5 dBm, o efeito de FWM torna-se mais relevante, consequentemente fica mais difícil encontrar uma alocação satisfatória nas primeiras gerações, fazendo com que o GA evolua de modo a encontrar uma alocação adequada. Quando o valor de P_{in} se aproxima de 4,5 dBm, o GA passa a atingir o valor limite do número de gerações ($G = 27$) sem encontrar uma alocação satisfatória conforme visto na análise da Figura 2.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo mostramos que o efeito de FWM deve ser considerado no processo de alocação de comprimentos de onda em um enlace óptico, representando assim, um fator importante no estabelecimento de conexões nas redes ópticas.

O processo de otimização das alocações pode ser realizado utilizando os algoritmos exaustivo ou genético. Considerando critérios de QoS, o GA mostra-se ideal para determinação das alocações satisfatórias a partir do conhecimento do ponto de convergência do algoritmo, realizando um número de cálculos de força bem menor que o algoritmo exaustivo.

Considerando o efeito de FWM como critério para alocação de comprimentos de onda, percebemos que a partir de uma alocação satisfatória para uma determinada configuração do

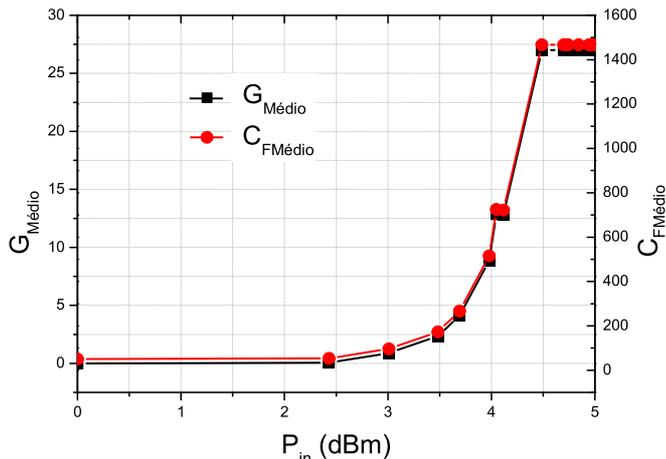


Fig. 5. Número médio de gerações e de cálculos de força necessários para encontrar alocação aceitável segundo critério de qualidade de serviço pré-estabelecido em função da potência de entrada do sinal para $P = 50$ e $G = 27$.

enlace óptico, podemos obter alocações satisfatórias, quanto ao critério de QoS, quando comprimentos de onda são removidos da grade de canais. Dessa forma, o nosso algoritmo pode determinar o número máximo de comprimentos de onda alocáveis, e a posição deles na grade, com garantia de QoS dada em termos de BER.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq e Siemens-Brasil.

REFERÊNCIAS

[1] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*, 2nd ed. Morgan Kaufmann, 2002.

[2] D. H. Richards, J. L. Jackel, N. Smyth, M. Goodman, and W. T. Anderson, "Advances in optical network modeling," *Lasers and Electro-Optics Society*, vol. 1, pp. 96–97, November 2000.

[3] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks," *Optical Networks Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 47–60, January 2000.

[4] R. G. Dante, E. Moschim, and J. F. Martins-Filho, "Modified distributed relative capacity loss algorithm for wdm optical networks," *Journal of Optical Networking*, vol. 4, no. 5, pp. 271–284, May 2005, <http://www.osa-jon.org/abstract.cfm?URI=JON-4-5-271>.

[5] N. Biryukov, O. Tytarchuk, and N. Triska, "Evaluation of four-wave mixing products in c-range," in *Proceedings of the 4th International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 1. IEEE, April 2002, pp. 229–232.

[6] M. Kowalewski, M. Marciniak, and A. Sedlin, "Optimisation of short-haul dwdm fibre telecommunication systems in presence of nonlinear optical phenomena," in *2nd International Conference on Transparent Optical Networks*. IEEE, June 2000, pp. 139–142.

[7] E. Iannone, F. Matera, R. Sabella, and M. Settembre, "Impact of fiber non-linearities in transmission across geographical optical networks," in *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, vol. 1. IEEE, November 1996, pp. 103–104.

[8] D. Levandovsky, "Wavelength routing based on physical impairments," in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, vol. 2. IEEE, 2001, pp. TuG7-1–TuG7-3.

[9] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, S. C. Oliveira, E. A. J. Arantes, E. Fontana, and F. D. Nunes, "Novel routing algorithm for optical networks based on noise figure and physical impairments," in *Proceedings of ECOC*, vol. 3. OSA, 2003, pp. 856–857.

[10] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, E. A. J. Arantes, S. C. Oliveira, L. D. Coelho, J. P. G. de Oliveira, R. G. Dante, E. Fontana, and F. D. Nunes, "Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier saturation," *Proceedings of IMOC*, vol. 2, pp. 919–923, September 2003.

[11] C. Marand, S. Baroni, F. Di Pasquale, and P. Bayvel, "Design of wavelength-routed optical networks with optimised channel allocation in the edfa bandwidth," in *22nd European Conference on Optical Communication*, vol. 2. IEEE, September 1996, pp. 273–276.

[12] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr., and H. Waldman, "Preserving global optical qos in fwm impaired dynamic networks," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 3, pp. 191–192, February 2004.

[13] I. E. Fonseca, R. C. Almeida Jr., M. R. N. Ribeiro, and H. Waldman, "Algorithms for fwm-aware routing and wavelength assignment," in *Proceedings of IMOC*, vol. 2. IEEE-MTS/SBMO, September 2003, pp. 707–712.

[14] I. E. Fonseca, R. C. Almeida Jr., H. Waldman, and M. R. N. Ribeiro, "Meeting optical qos requirements with reduced complexity in dynamic wavelength assignment," in *Proceedings of First International Conference on Broadband Networks*. IEEE, October 2004, pp. 331–334.

[15] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc., 1997.

[16] C. J. A. Bastos-Filho and J. F. Martins-Filho, "Noise figure model for transmission performance evaluation considering four wave mixing and source spontaneous emission," in *Proceedings of IMOC*. IEEE-MTS/SBMO, July 2005.

[17] K. Thyagarajan and A. K. Ghatak, *An Introduction to Fiber Optics*, 1st ed. Cambridge - USA, 1998.

[18] K. F. Man, K. S. Tang, and S. Kwong, "Genetic algorithms: Concepts and applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 5, pp. 519–534, October 1996.