

## Comparação de desempenho de Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio para diferentes perfis de índice de refração

S. L. Stevan Jr., A. Pohl\*, A. L. J. Teixeira

\* Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 80230-901 - Curitiba - Pr, Brasil

**Resumo** Neste trabalho são comparados vários Amplificadores de Fibra Dopada com Érbio nos quais se varia os perfis índice de refração da fibra dopada que os constitui. São analisados quatro perfis. Numa primeira etapa são analisados os comportamentos dos diferentes perfis com mesma área de núcleo da fibra, e numa segunda etapa alterou-se o raio do núcleo da fibra de forma a manter o valor da abertura numérica igual para os quatro perfis. Este trabalho é efectuado com base em modelos teóricos simulados. Os efeitos principais deste tipo de variação são observados e discutidos.

### I. INTRODUÇÃO

Os Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFA) são, à mais de uma década, foco de estudos em todo o mundo. Estes trabalhos têm, de entre outros, o objectivo de melhorar a qualidade da resposta destes dispositivos, o alcance do sinal e os ritmos da informação transmitida num meio óptico. Por este motivo, alguns modelos matemáticos têm sido apresentados com o intuito de prever as possibilidades de melhoria no desenvolvimento do equipamento e dos sistemas como um todo [1-5].

### II. MODELIZAÇÃO DE UM EDFA

Através do modelo analítico de propagação de sinal e da bomba através de uma fibra dopada com érbio [1,7], pode-se fundamentar um modelo numérico, baseado numa solução incremental de diferenças finitas numa fibra, conforme apresentado na figura 1.

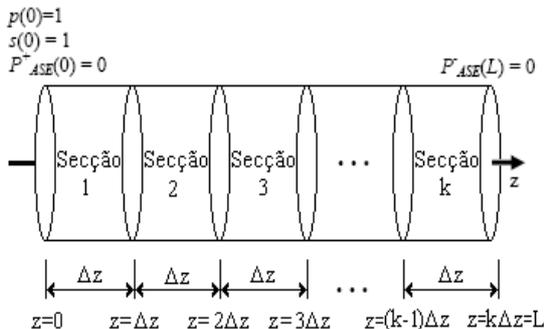


Fig. 1 – Modelo incremental para uma fibra dopada com comprimento L [6].

O simulador implementado baseia-se nas equações de propagação, propostas por Desurvire [1], nas quais são descritas a evolução das potências do sinal propagante e contra-propagante e das potências de bomba co- e contra-propagante, e ainda as potências de emissão estimulada (ruído) nas duas direcções de propagação, conhecidas por ASE<sup>+</sup> e ASE<sup>-</sup>.

Poderemos definir a variação das potência óptica de sinal a uma frequência  $\nu_s$ , para um dado ponto,  $z$ , numa fibra de comprimento  $L$ , como sendo função o valor do sinal no ponto  $z$  multiplicado pelo coeficiente de emissão espectral,  $\gamma_e$ , conforme apresentado na expressão abaixo [7]:

$$\frac{\partial s(\nu_s, z)}{\partial z} = [\gamma_e(\nu_s, z)]s(z) \quad (1)$$

O mesmo se pode fazer para as potência de ASE<sup>+</sup> e ASE<sup>-</sup>, como indicado nas expressões (2) e (3) abaixo [7]:

$$\frac{\partial P_s^+(\nu_s, z)}{\partial z} = +[\gamma_e(z)(P_s^+(\nu_s, z) + P_0) - \gamma_a(z)P_s^+(\nu_s, z)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_s^-(\nu_s, z)}{\partial z} = -[\gamma_e(z)(P_s^-(\nu_s, z) + P_0) - \gamma_a(z)P_s^-(\nu_s, z)] \quad (3)$$

onde  $\gamma_a$  e  $\gamma_e$  são, respectivamente os coeficientes de absorção e emissão espectral, que são proporcionais às secções de absorção e emissão transversais,  $P_s^+$  é a potência de ASE co-propagante,  $P_s^-$  é a potência de ASE contra-propagante,  $\nu_s$  a frequência do sinal e  $P_0$  é o ruído devido a ASE [7].

A variação da potência de bombeio podem ser calculada por [7],

$$\frac{\partial P_p(\nu_p, z)}{\partial z} = [D\gamma_p(\nu_p, z)]P_p(z) \quad (10)$$

onde  $D$  é a direcção de bombeio, e tem valor igual a 1 para direcção  $z$  (co-propagante) e valor igual a -1, para a direcção  $-z$  (contra-propagante) e  $\gamma_e$  é o coeficiente de absorção da potência da bomba [6].

Através do modelo calcula-se a evolução da potência de cada sinal acima indicado para cada secção de fibra  $\Delta z$ , definida como sendo passo de cálculo. Como condições iniciais para a primeira iteração, assumem-se as potências de bombagem e de sinal para o comprimento zero como sendo unitárias [ $P(0) = S(0) = 1$ ] e as potências de ASE<sup>+</sup>(0) inicial e ASE<sup>-</sup>(L) final como nulas. Nesta condição (potências de ASE<sup>+</sup> e ASE<sup>-</sup> nulas, ou seja, a inexistência de ruído inicial), os resultados obtidos no final do comprimento da fibra após a primeira iteração ainda não são os correctos. Desta forma, para a segunda iteração utilizam-se os resultados finais para as potências obtidas na iteração anterior, e assim consecutivamente até se obter uma convergência significativa dos valores.

Foram realizadas análises para diferentes perfis de índice de refração da fibra utilizada para constituir o amplificador. Foram considerados 4 tipos de índice de refração diferentes, sendo um em degrau, dois elípticos e um último triangular, conforme indicado na figura 2.

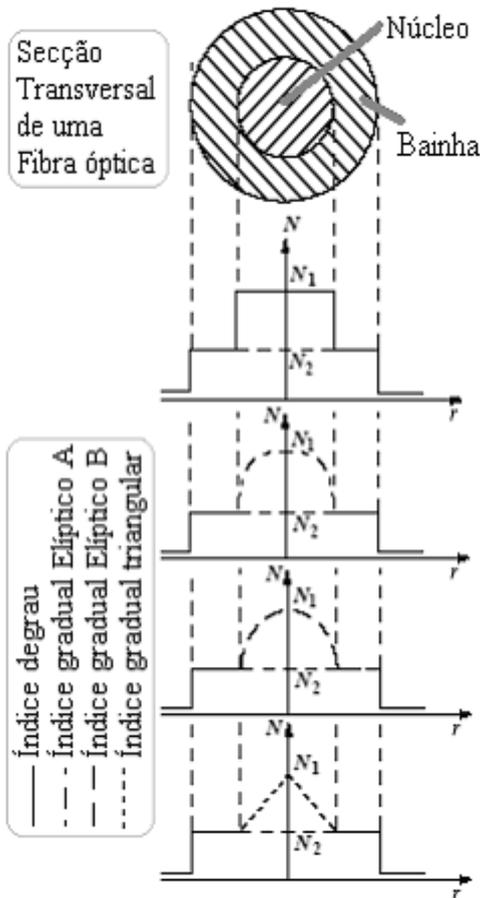


Fig.2- Tipos de perfis de índices de refração utilizados na simulação

Uma primeira análise foi realizada considerando as variações dos perfis de índice de refração para um raio de núcleo da fibra igual para as quatro situações. Numa segunda análise, foram observados os comportamentos destes mesmos

perfis indicados, considerando que a abertura numérica das fibras são equivalentes, ou seja, com áreas de núcleo diferentes.

### III. RESULTADOS

Foram considerados nas simulações valores comuns para cada um dos parâmetros da fibra, abaixo indicados:

- raio do núcleo: 2.6  $\mu\text{m}$ ;
- comprimento de onda de bombeio: 980 nm;
- comprimento de onda de sinal: 1535nm;
- total de íons de Érbio no núcleo:  $1.8 \cdot 10^{18}$ ;
- tempo de decaimento do nível superior para o inferior, dos íons excitados: 10.6 ms;
- banda de frequência do ruído do amplificador: 7 THz;
- potência de bomba co-propagante: 120 mW;
- potência de bomba contra-propagante: 0 mW;
- potência de sinal de entrada: 0.01mW;
- comprimento da fibra dopada: 20m;
- índice de refração central do núcleo: 1.46;
- índice de refração da bainha: 1.45;
- abertura numérica para uma fibra tipo degrau: 0.17.

A figura 3 apresenta as curvas de evolução de potências de sinal e figura de ruído ao longo do comprimento da fibra dopada, para cada perfil de fibra, considerando-se como legenda indicativa do tipo de índice a figura 2, para uma potência de entrada de 1mW.

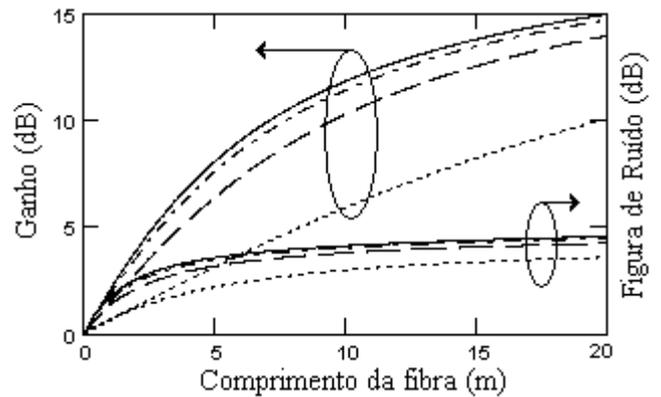


Fig.3 – Evolução das potências de ASE+, ASE-, sinal e NF ao longo do comprimento da fibra dopada, para os diferentes perfis de índice de refração considerados, com o mesmo raio de núcleo.

Da análise da Figura 3 percebe-se que quanto maior for a área efectiva da fibra maior será o ganho e a sua figura de ruído. Pode verificar-se ainda, que o comportamento do índice elíptico apresenta valores muito próximos do índice degrau. Isso é devido ao fato de, para esta análise, ser considerado perfis diferentes para uma área de núcleo igual, ou seja, análises para fibras com áreas efectivas diferentes.

Como o índice rectangular apresenta uma área efectiva muito menor, os resultados de ganho e de figura de ruído são bem inferiores aos outros perfis analisados.

A figura 4 apresenta a evolução das potências de ASE+ e ASE- em função do comprimento da fibra, na qual se verifica uma proximidade entre os resultados para os perfis de índice degrau e gradual elípticos e um distanciamento para o gradual triangular.

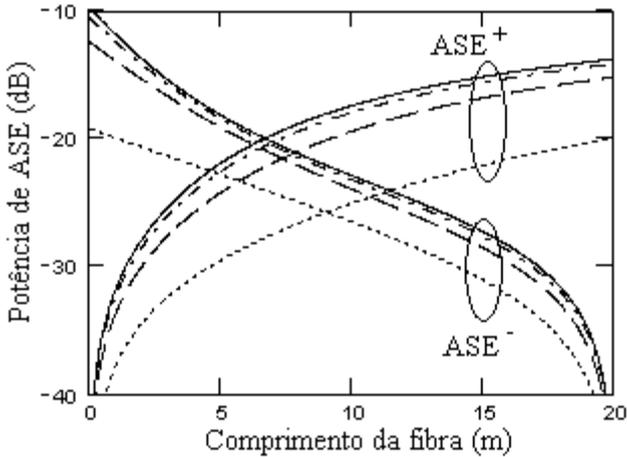


Fig. 4 – Relação entre Potências de ASE+ e ASE- e comprimento da fibra dopada, para os diferentes perfis de índice de refração considerados, com o mesmo raio de núcleo.

A figura 5 apresenta a relação entre o ganho e a potência de sinal de entrada em dBm, do qual se pode verificar a tendência de saturação para sinais de entrada superiores a -15 dBm. Para o perfil de índice degrau. Para os índices elípticos as potências de saturação são de aproximadamente de -11 dBm. Já para o índice gradual triangular verificamos uma potência de saturação de 0 dBm, valor bem mais alto que os anteriores devido ao baixo ganho saturado causado pela área efectiva inferior.

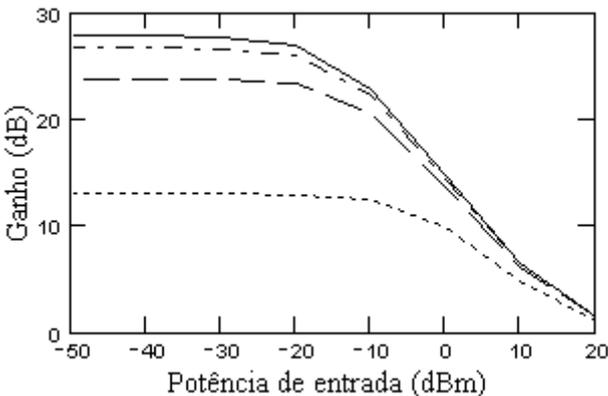


Fig. 5 – Relação entre ganho e potência de sinal de entrada, para os diferentes perfis de índice de refração considerados, com raios de núcleo iguais.

Após uma análise dos resultados acima, poderemos observar que um decréscimo da área efectiva do núcleo da fibra causa uma degradação do ganho do amplificador.

Para se obter uma visão mais clara do comportamento, uma segunda análise foi realizada, na qual se considera a abertura numérica da fibra sempre constante, ou seja, o raio do núcleo é alterado de forma a manter constante a área efectiva do núcleo para todos os perfis considerados.

Os raios utilizados para simulação do amplificador para os quais são consideradas áreas efectivas iguais são: 2.6  $\mu\text{m}$  para a fibra de índice degrau, 2.84531  $\mu\text{m}$  para a de índice gradual elíptico A, 3.35322  $\mu\text{m}$  para a de elíptico B e 4.49881  $\mu\text{m}$  para a de gradual triangular.

A figura 6 apresenta a evolução do ganho e da figura de ruído para os quatro perfis de fibra já discutidos. Verifica-se que há uma grande semelhança dos resultados para as fibras com graduação abrupta e uma pequena variação para a graduação triangular. A diferença do valor do ganho entre as fibras de índice degrau e de gradual triangular com área efectiva equivalente é de aproximadamente 1.3 dB, enquanto a figura de ruído para a fibra de perfil gradual triangular é um pouco maior que as outras, uma vez que apresenta o ganho menor para a mesma área efectiva.

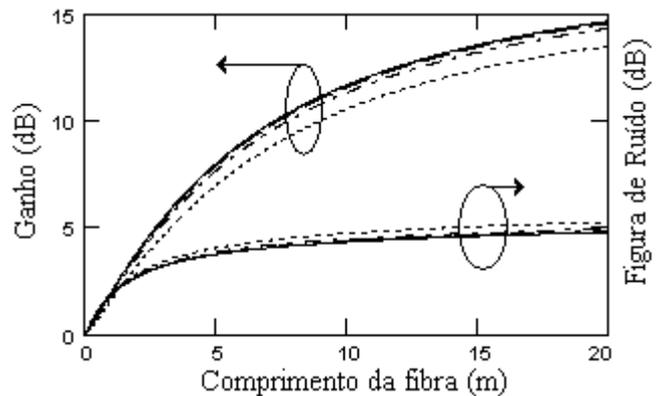


Fig. 6 – Relação entre ganho e figura de ruído em função da potência de sinal de entrada, utilizando fibras com área efectiva iguais

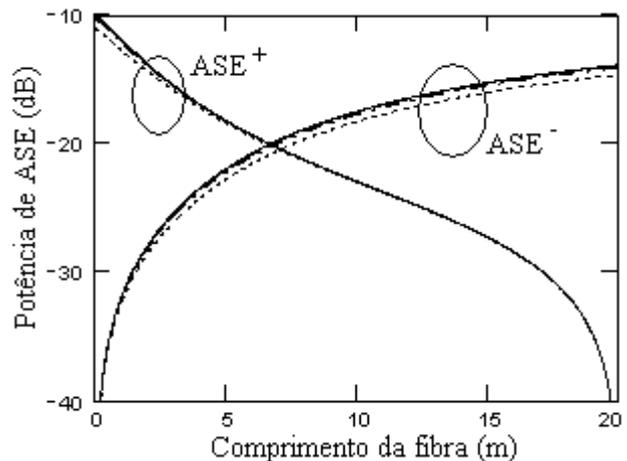


Fig. 7– Relação entre Potências de ASE+ e ASE- e comprimento da fibra dopada, para os diferentes perfis de índice de refração considerados, com áreas efectivas equivalentes.

Uma vez considerada a área efectiva equivalente das fibras analisadas, são verificados resultados sem diferença expressiva para as potências de ASE<sup>+</sup> e de ASE<sup>-</sup>, como apresentado na figura 7.

A figura 8 apresenta as curvas de ganho em função da potência de entrada em dBm para os perfis com mesma área efectiva.

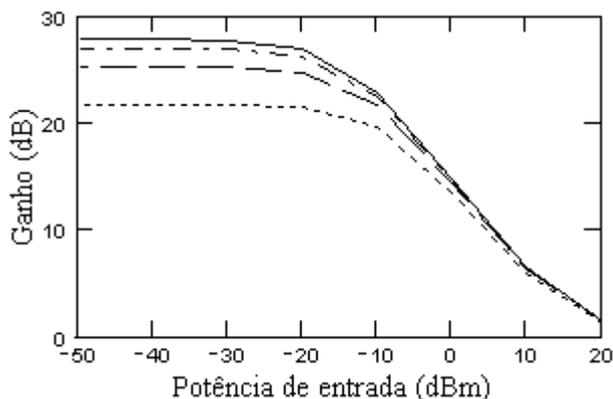


Fig. 8 – Relação entre ganho e potência de sinal de entrada, para os diferentes perfis de índice de refração considerados, com áreas efectivas equivalentes (abertura numérica iguais).

Comparando-se a figura 5 com a figura 8 é possível se verificar que a diferença entre o ganho para a fibra de índice degrau e a de índice gradual triangular é menor nesta última, o que se justifica pela área efectiva de propagação utilizada ser maior para as fibras com perfis gradual nos resultados da figura 8.

#### V. CONCLUSÃO

Foram estudadas as equações teóricas para desenvolvimento de um simulador com o qual se comparou o comportamento de fibras dopadas com Érbio com diferentes perfis de índice de refração.

Numa primeira análise foram estudadas as fibras apenas variando o tipo do perfil do índice de refração, e numa segunda análise foram variados os perfis e consideradas áreas efectivas equivalentes.

Verificou-se que de acordo com a diminuição da área efectiva de propagação da luz há depreciação dos sinais analisados, ou seja, quanto mais abrupta a variação do índice de refração do núcleo para a bainha da fibra, maior a área efectiva de propagação da luz e melhor são os resultados de ganho da fibra dopada. Entretanto, se mantendo a área efectiva das fibras constantes para os vários perfis de índice de refração, verifica-se que há uma menor variação entre os desempenhos apresentados nesta condição.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio referente à bolsa de estudos concedida pelo Programa Alban, Programa de bolsas de alto

nível da União Europeia para América Latina, nº de identificação E03D03894BR.

#### REFERÊNCIAS

- [1] C. R. Giles, E. Desurvire, “Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers”, *J. Lightwave Technol.*, vol. IX, pp. 271-283, February 1991.
- [2] E. Desurvire, D. Bayart, B. Desthieux, S. Bigo, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, New York: John Wiley and Sons, pp. 3-169, 2002
- [3] M. Bottoli, A. Alberti, F. Sakuray, M. Proença, L. Mendes, "Modelagem de Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio para uso em Simuladores de Sistemas Ópticos", *Revista Científica Periódica – Telecomunicações*, Vol 05 - Num 02, Dez, 2002.
- [4] X. Zhang, A. Mitchell, “A Simple Black Box Model for Erbium-Doped Fiber Amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. XII, pp. 28-30, Jul 1998
- [5] D.B. M. Pereira, A. L. J. Teixeira, M. J. N. Lima, P. S. B. André, J. R. Ferreira da Rocha, “Black Box Modeling of Gain in Erbium-doped Fiber Amplifiers for L –Band”,
- [6] S. Milo, “Análise de Desempenho de Topologias de Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio”, Tese de mestrado apresentado à Universidade de Campinas – Brasil, Fev, 2003.
- [7] P.C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology”, Academic Press, 1997.