

# DA IMPORTÂNCIA DO USO DE SIMULADORES EM PESQUISA E ENSINO UNIVERSITÁRIOS NA ÁREA DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

Tarcísio Cordaro<sup>1</sup> e Luiz Sergio Zasnico<sup>2</sup>

**Abstract** — O alto desempenho dos programas simuladores no setor de comunicações ópticas, e a grande capacidade de processamento dos computadores pessoais, têm viabilizado a reprodução de complexos sistemas ópticos com ótima fidelidade. Este fato tem permitido que os estudantes vivenciem situações virtuais muito próximas da realidade, contribuindo na sedimentação de conceitos recém adquiridos, bem como que pesquisadores realizem suas pesquisas com a precisão necessária. Tal fato era até então impraticável, quer pelos altíssimos custos da instrumentação necessária, quer pelas circunstâncias, como exemplo cito a reprodução de sistemas ópticos transoceânicos, ficando tais pesquisas restritas à poucas empresas ou laboratórios no mundo. Este artigo relata, de modo resumido, o trabalho que está sendo realizado na Universidade Presbiteriana Mackenzie na área de comunicações ópticas, mais especificamente na transmissão de solitons com taxa de transmissão de 40 Gbits/s e longa distância (10.000 Km). A Amplificação Raman Distribuída (DRA) é utilizada. Será dada ênfase na importância do uso de simuladores na condução de ensino e da pesquisa.

**Index Terms** — Fotônica, Fibras Ópticas, Amplificação Raman, Soliton.

## INTRODUÇÃO

O aplicativo utilizado como simulador é um PTDA, - *Photonic Transmission Design Suite* - que leva em consideração em seus cálculos:

- Não-Linearidades na Fibra
- Ruído
- Dispersão de segunda e terceira ordem
- Efeito Raman
- Polarização

A interface com o usuário reproduz um ambiente de laboratório de medidas. Alguns de seus instrumentos virtuais são mencionados a seguir:

- Osciloscópio
- Analisador de Espectro
- Freqüencímetros
- Medidor de Potência
- Fontes com diodos Laser
- Medidor de taxa de erro de bit

Internamente, a equação não-linear de Schroedinger generalizada é resolvida numericamente.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{\alpha}{2}A - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left[ |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right] \quad (1)$$

Eq. (1) rege a propagação dos sinais na fibra.[1], [2]

A figura 1 mostra a implementação do circuito básico utilizado no trabalho e consiste de um gerador de pulso soliton, um circuito em anel composto dos lasers de bombeamento Raman direto e reverso, uma fibra óptica e um filtro óptico ideal, e a cada volta percorrida pelo soliton neste circuito analisamos seu formato e sua potência através de um osciloscópio e um medidor de potência.

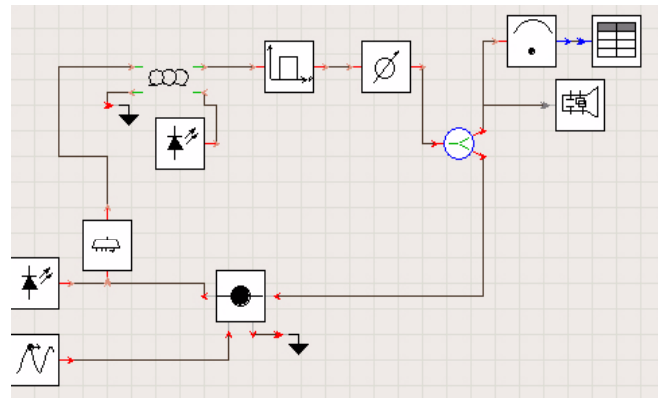


FIGURA 1  
EXEMPLO DE CIRCUITO DE SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ÓPTICO DE TRANSMISSÃO

## DESCRIÇÃO DE SOLITONS

Aproximadamente 170 anos atrás (1834), enquanto conduzindo experimentos para determinar o modo mais eficiente de projetar canais para barcos, um jovem engenheiro escocês de nome John Scott Russel (1808-1882) fez uma impressionante descoberta científica. Como ele mesmo as chamou *Report on Waves* (relata do 14º Encontro da Associação Britânica para o Avanço da Ciência, N. York, setembro de 1844, pp 311-390, plates XLII-LVII).

<sup>1</sup> Tarcísio Cordaro, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação, 930, São Paulo, SP, Brasil, cordaro@ig.com.br

<sup>2</sup> Luiz Sergio Zasnico, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação, 930, São Paulo, SP, Brasil, lszasnicoff@mackenzie.com.br

Durante toda sua vida Russel permaneceu convencido de que sua descoberta, denominada Onda Solitária ou *Wave of Translation* era de importância fundamental. Entretanto, até o começo do século 20, poucos cientistas concordaram com ele. Sua fama originou-se de outras realizações.

Nos anos 60, quando os cientistas iniciaram o uso de computadores digitais para estudar fenômenos não-lineares, tais como a propagação de ondas, que as idéias de Russel começaram a ser apreciadas. Ele entendia sua onda solitária como uma entidade dinâmica auto-suficiente, algo com propriedades típicas de partículas. Do ponto de vista moderno, ela tem sido usada como um elemento construtivo na formulação de complexos comportamentos de sistemas ondulatórios através da ciência, indo da hidrodinâmica à óptica não-linear, dos plasmas às ondas de Shock, dos tornados à grande mancha vermelha em Júpiter e, sobretudo, nas partículas elementares da matéria.

### BREVE HISTÓRICO DE SOLITONS EM ÓPTICA

Alguns aspectos sobre solitons e algumas curiosidades históricas são mencionadas:

- Em 1964, dois pesquisadores da universidade de Princeton, Zabuski e Kruskal, observaram ondas cujo comportamento era similar a de partículas (Russel, *Soliton Propagation in Optical Fibers*). Também notaram que uma solução numérica das equações Kdv satisfazia tal fenômeno.
- Em 1969, San MacCall e Erwin Hahn descobriram um importante caso na propagação de solitons em óptica.
- Em 1973, A. Hasegawa e F. Tappert propuseram a aplicação de solitons em fibras ópticas. Neste artigo, cálculos teóricos e simulações numéricas foram apresentados mostrando que, utilizando a dependência não-linear do índice de refração com a intensidade do campo aplicado, era possível transmitir pulsos da ordem de picosegundos de duração em fibras, sem que ocorressem distorções. Mostrou ainda que, acima de certo limiar de potência, tais pulsos tornavam-se estáveis, mesmo sob a influência de perturbações do meio. [3].
- Em 1980, Linn F. Mollenauer, R. H. Stolen e J. P. Gordon fizeram a primeira demonstração da propagação de solitons em fibras ópticas com comprimento de 700 m. [4].

Desde então, diversos trabalhos têm sido apresentados sobre a propagação de solitons em fibra óptica, sempre se procurando aumentar as taxas de transmissão e as distâncias percorridas. [5]-[13].

### UTILIZAÇÃO DE SOLITONS EM TRANSMISSÃO POR FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas atingiram um nível baixo de perdas, entretanto os pulsos tendem a se espalhar ou alongar-se devido à dispersão das fibras prejudicando a performance do sistema. Tal fenômeno é mais intenso para pulsos estreitos. Ora, à medida que as taxas de transmissão se elevam, impulsionadas pela crescente demanda de serviços de transmissão de dados, os pulsos tendem a se estreitar. Por outro lado os sistemas de transmissão de longa distância necessitam de regeneradores elétricos periodicamente ao longo do percurso da fibra. Estes Regeneradores são mais tanto mais complexos e caros quanto maiores são as taxas de transmissão.

Os solitons lidam bem com a dispersão, mantendo o formato do pulso ao longo a fibra, permitindo eliminar tais regeneradores elétricos. Contudo é necessário compensar a atenuação da fibra, pois à medida que evoluem na fibra vão tendo sua amplitude atenuada, até um ponto onde entram em colapso, por deixam de atender o requisito fundamental para sua existência, ou seja, o equilíbrio entre a dispersão e as não-linearidades.

Neste caso citado, a dispersão prevalece sobre a não-linearidade, fazendo o pulso se alargar mais rapidamente.

Os amplificadores ópticos têm sido estudados exaustivamente nos últimos anos e demonstraram ser viáveis tecnicamente e bem mais baratos que os sistemas com regeneradores.

Este conjunto Soliton mais amplificador óptico torna-se uma alternativa bastante atraente para sistemas de transmissão de longa distância, pois teria em tese seus preços bem mais baixos que os atuais sistemas com uma performance bastante boa.

Um recente estudo mostra a viabilidade de se transmitir Solitons em taxas de 40 Gbits/seg e longas distâncias, utilizando-se uma fibra levemente dopada com érbio, de modo a conseguir uma amplificação distribuída [11].

Este trabalho mostrará a possibilidade de se transmitir solitons em distâncias superiores a 10.000 km, utilizando-se de Amplificação Ramam Distribuída, com bombeamento a cada 50 Km para minimizar a variação da potência do soliton ao longo da fibra. Posteriormente será demonstrada a possibilidade de aumentar esta distância para 75 Km, utilizando duas fibras diferentes.

### CONCEITO DO SOLITON

Em sua forma ideal, (2) representa o comportamento do soliton, e é definida por uma função do tipo secante hiperbólica, segundo mostra a figura 2. [1],[2].

$$\Phi(z, t) = \Phi_0 \operatorname{sech} \left( \frac{t - v_g z}{\tau_0} \right) e^{-i \frac{z}{2z_0}} \quad (2)$$

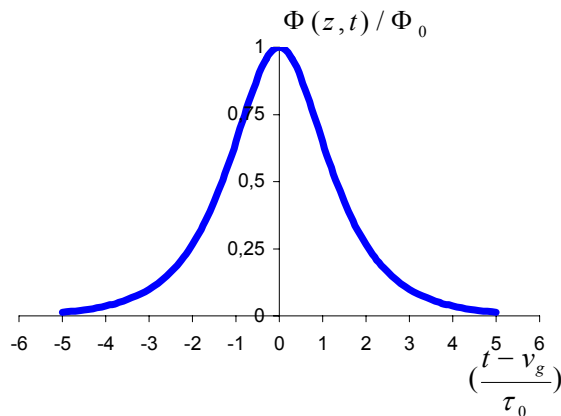


FIGURA 2

SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE SCHROEDINGER SIMPLIFICADA

Usualmente, (2) é a solução da equação não-linear de Schrodinger para o caso onde  $N=1$ , sendo  $N$  definido como:

$$N^2 = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{\beta_2} = \left( \frac{4\pi^2 c}{\lambda^3} \right) \left( \frac{n_2}{A_{\text{eff}} |D|} \right) (P_0 T_0^2) = \frac{L_D}{L_{NL}} \quad (3)$$

Onde:

$$D = - \frac{\beta_2 \pi c}{\lambda^2} \quad (4)$$

é a Dispersão Cromática;

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (5)$$

é o Comprimento de Dispersão, e indica a partir de que distância de propagação na fibra, a dispersão é relevante,

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (6)$$

é o Comprimento Não-Linear, e indica a partir de que distância de propagação na fibra as não-linearidades são relevantes, e

$$T_0 = \frac{1}{q_0 B} \quad (7)$$

é a Largura do Pulso, conforme mostrado na fig.2,  $B$  é a Taxa de Transmissão e  $q_0$  é um fator de ocupação.

Se  $N=1$ , vem:

$$P_0 = \frac{\beta_2}{\gamma T_0^2} = \left( \frac{\lambda^3}{4\pi^2 c} \right) \left( \frac{A_{\text{eff}} |D|}{n_2} \right) \left( \frac{1}{T_0^2} \right) \quad (8)$$

De um modo simplificado a pesquisa consiste em encontrar os parâmetros do soliton, ou seja, conseguir um equilíbrio entre dois fenômenos que isoladamente são grandes ofensores na propagação em fibra óptica, mas que para este caso particular eles se compensam. A Dispersão e as Não-Linearidades.

Entretanto, conseguir com que este balanceamento permaneça ao longo da fibra, para longas distâncias é o maior desafio, pois como sabemos toda fibra tem atenuação.

Aqui, os simuladores são fundamentais, pois permitiram:

- Verificar a teoria ideal de solitons,
- Dimensionar a melhor condição da DRA,
- Verificar, em condições com perdas e amplificação, a propagação do soliton.

## RESULTADOS PRELIMINARES

Os valores utilizados na simulação são:

$$D = 0.5 \text{ ps}/(\text{nm.km}), \quad T_0 = 3 \text{ ps} \text{ e } P_0 = 31 \text{ mW}.$$

Assim, obtemos  $L_D = L_{NL} = 15 \text{ km}$ , ou seja, caso as não-linearidades não compensem a dispersão, a partir de 15 km o pulso sofrerá distorções.

Na fig.3, verificamos a propagação do soliton em 10.000 km de fibras, sem perdas. Entretanto, todos os fenômenos não-lineares e a dispersão estão presentes. Verifica-se o perfeito casamento entre estes dois mecanismos, de modo a se compensarem.

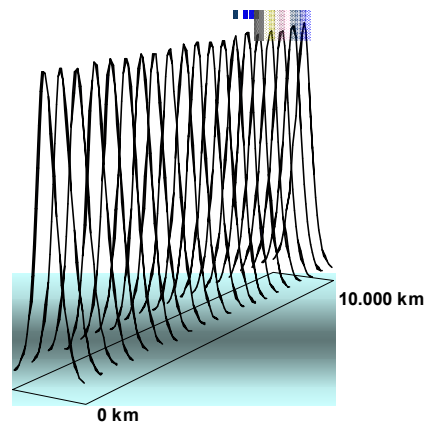


FIGURA 3

PROPAGAÇÃO DE SOLITON EM FIBRA SEM PERDAS

A fig.4 representa a simulação da propagação em fibra com dispersão nula ( $D=0$ ). Verificamos, então, que as não-linearidades deformam o pulso antes de alcançar 30 km. Neste caso, também a atenuação é nula.

Na fig.5, a simulação considera ativos todos os fenômenos na fibra. Para compensar a atenuação, é utilizada a Amplificação Raman Distribuída (DRA), com bombeamento direto e reverso a cada 50 km.

A fig.6 mostra a propagação quando aumentamos a distância de bombeamento para 75 km. Para conseguir a equalização necessária e suficiente para a propagação, e manutenção do soliton, utilizamos dois trechos de fibras dimensionados para dois regimes de transmissão.

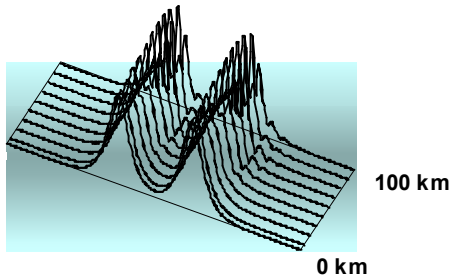


FIGURA 4  
SOLITON EM FIBRA SEM PERDAS E DISPERSÃO NULA

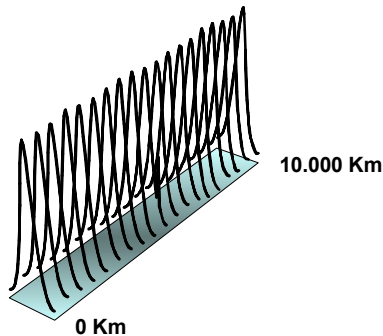


FIGURA 5  
PROPAGAÇÃO DE SOLITON COM DRA.

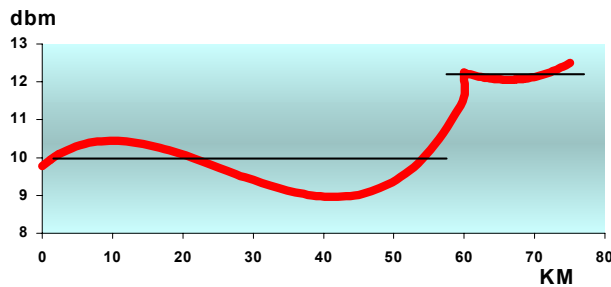
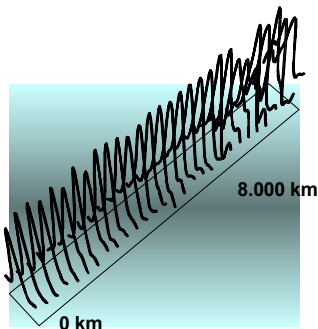


FIGURA 6  
ATENUAÇÃO X COMPRIMENTO PARA DUAS FIBRAS E DRA.



Na fig.7 são apresentados os resultados nesse regime misto de transmissão.

FIGURA 7  
SOLITON COM DRA E 75 KM DE BOMBEAMENTO

Percebe-se que o sinal sofre degeneração somente a partir dos 8.000 km. Tal pesquisa ainda está em curso, de modo que acreditamos ser perfeitamente possível atingir uma distância maior que 10.000 km de propagação, sem deformações substanciais no soliton, mantidos os 75 km de distância de bombeamento.

## CONCLUSÕES

Foram mostrados alguns resultados que validam a Tese proposta. Acreditamos que as distâncias de bombeamento podem ser aumentadas para 100 km ou mais, caso utilizemos três regimes de transmissão solitônico.

Este e outros trabalhos que vêm sendo elaborados em ambientes virtuais evidenciam o quão importante é a utilização de simuladores em Pesquisa e Ensino.

Mais que apenas importante, acredita-se que, sem tais ferramentas, o ensino e pesquisas estariam incompletos, pois permitem uma vivência, que de outro modo seria muito difícil ao aluno ou pesquisador aprimorar-se.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. P. Agrawal, "Non Linear Fiber Optics", 2ª Ed., 1989.
- [2] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 2ª Ed. New York: Wiley, 1997.
- [3] Hasegawa, F. Tappert, "Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectrical \_beers", Apple. Phys. Lett., v. 23, pp. 142-144, 1973.
- [4] L.F. Mollenauer, R.G. Stolen, J.P.Gordon, "Experimental observation of picosecond pulse narrowing e solitons in optical beers", Phys. Rev. Lett., v. 45, pp. 1095-1098, 1980.
- [5] L. F. Mollenauer, J. P. Gordon, e M. N. Islam, "Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss," *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. QE-22, pp. 157-173, 1986.
- [6] B. Altuncu, L. Noel, W. A. Pender, A. S. Siddiqui, T. Widdowson, A. D. Ellis, M. A. Newhouse, A. J. Antos, G. Kar, e P. W. Chu, "40 Gbit/s error free transmission over 68 km distributed-erbium doped fiber amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 233-234, 1996.
- [7] G. H. van Tartwijk, R. J. Essiambre, e G. P. Agrawal, "Dispersion-tailored active-fiber solitons," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 1978-1980, 1996.
- [8] G. M. Carter, J. M. Jacob, C. R. Menyuk, E. A. Golovchenko, e A. N. Pilipetskii, "Experimental evidence for timing jitter reduction for a dispersion-managed soliton system," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 513-516, 1997.
- [9] Hasegawa, Y. Kodama, e A. Maruta, "Recent progress in dispersion-managed soliton transmission technologies," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 3, pp. 197-213, 1997.
- [10] Morita, K. Tanaka, N. Edagawa, S. Yamamoto, e M. Suzuki, "40 Gbit/s single-channel soliton transmission over 8600 km periodic dispersion compensation," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1863-1865, 1998.
- [11] G. P. Agrawal, Zhi M. Liao "High-bit Rate Soliton Transmission Using Distributed Amplification and Dispersion Management", *IEEE Photonic Tech. Lett.*, vol. 11, no 7, 1999
- [12] L. F. Mollenauer, P. V. Mamyshev, J. Gripp, N. J. Neubelt, N. Mamyshev, "Demonstration of massive wavelength-division multiplexing over transoceanic distances by use of dispersion-managed solitons", *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 704-706, 2000.
- [13] Zhi M. Liao, G.P. Agrawal, "Role of distributed Amplification in designing high-capacity soliton systems", *Opt. Express*, vol. 9, pp. 66-71, 2001.