

Capítulo 1

Introdução

O crescente número de serviços de telecomunicações disponíveis e a sua massificação têm exercido, nas últimas décadas, uma enorme pressão no sentido de aumentar a capacidade das redes de telecomunicações. Os sistemas de comunicação ópticos têm, neste contexto, desempenhado um papel essencial, constituindo actualmente o núcleo central das redes dos grandes operadores mundiais de telecomunicações.

Os primeiros sistemas de comunicação ópticos remontam à década de 70. Desde então surgiram cinco gerações diferentes de sistemas, tendo cada geração originado um aumento considerável nos ritmos de transmissão e nas distâncias alcançadas. Neste capítulo identificaremos cada uma das gerações, salientando a inovação tecnológica e o conceito que a tornou possível.

A evolução dos sistemas de comunicação ópticos tem sido caracterizada pela procura do aumento da capacidade dos sistemas. Neste contexto, identificaremos os objectivos deste trabalho e faremos uma breve apresentação da estrutura da tese.

Finalizaremos este capítulo, identificando quais os principais resultados obtidos durante o decorrer deste trabalho.

1.1 Evolução dos sistemas de comunicação ópticos

Na última metade deste século uma quantidade considerável de recursos, quer humanos quer materiais, têm sido despendidos no sentido de procurar aumentar a capacidade dos sistemas de comunicação. Este esforço é algo de novo na história da humanidade e faz com que esta época fique, provavelmente, registada na história como a era da informação. Uma era em que o mundo deixa de ser um conjunto de continentes distantes, para passar a ser uma "aldeia global", com impactos sociais, económicos e políticos ainda não totalmente compreendidos.

Os sistemas de comunicação ópticos emergiram na década de 70 como mais um contributo à criação de uma grande "aldeia global". Apresentando inegáveis vantagens para ligações de elevado débito, têm visto desde então a sua capacidade aumentar extraordinariamente. Nesta tese usaremos o produto entre o ritmo de transmissão, em bits por segundo, e a distância do sistema como medida da capacidade dos sistemas ópticos. Mostraremos como a capacidade dos sistemas ópticos tem evoluído nos últimos 25 anos no sentido de aproveitar as várias dezenas de terahertz de largura de banda potencial disponível numa fibra óptica.

1.1.1- Primeira geração - o díodo emissor de luz

A primeira geração de sistemas de comunicação ópticos, é caracterizada pela utilização de emissores do tipo díodos emissores de luz, que produziam aproximadamente 1 mW de radiação electromagnética com uma largura espectral de alguns nanómetros na janela dos 800 nm. A intensidade da luz era controlada pela modulação da corrente de

injecção do díodo emissor de luz e ritmos de transmissão da ordem dos milhões de bits por segundo foram atingidos.

A transmissão do sinal ópticos desde o emissor até ao receptor, constituído por um fotodíodo de silício, era efectuada através de fibra multimodo. Devido às perdas nas fibras da ordem dos 2.5 dB/km, a distância estava limitada a uma dezena de quilómetros, conseguindo-se atingir capacidades da ordem dos 10 Mbit/s·km [1].

Posteriormente e devido a melhorias na qualidade das fibras e componentes usados foi possível aumentar a capacidade e a distância dos sistemas, respectivamente, para 500 Mbit/s·km e 20 km. A capacidade dos sistemas ópticos tinha ultrapassado a capacidade dos sistemas baseados em cabos coaxiais. No entanto, a dispersão intermodal assumia-se como uma barreira difícil de ultrapassar.

1.1.2- Segunda geração - a fibra monomodo

Sistemas com capacidades próximas dos 100 Gbit/s·km foram obtidos na segunda geração, finais da década de 70. Os avanços foram conseguidos com o surgimento de lasers semicondutores e fotodetectores na janela dos 1300 nm, onde as perdas da fibra eram da ordem de 1 dB/km. Na janela dos 1300 nm o ritmo de transmissão dos sistemas estava limitado a 100 Mbit/s devido a dispersão modal. Este problema foi resolvido no início da década de 80 com o aparecimento de fibras monomodo [2]. As fibras monomodo apresentam um núcleo estreito permitindo apenas a propagação de um único modo, reduzindo o efeito da dispersão pela eliminação da dispersão intermodal. Nesta altura as fibras monomodo apresentavam perdas da ordem dos 0.6 dB/km na janela dos 1300 nm. Nos finais da década de 80, sistemas a operarem a 1.7 Gbit/s com um espaçamento entre repetidores de 50 km estavam disponíveis comercialmente. O espaçamento entre repetidores era limitado pela atenuação da fibra, estando a capacidade dos sistemas limitada a 100 Gbit/s·km devido à dispersão.

1.1.3- Terceira geração - o laser monomodo

A atenuação das fibras ópticas é mínima na janela dos 1550 nm apresentando valores da ordem dos 0.2 dB/km. No entanto o aparecimento da terceira geração de sistemas a operarem nesta janela foi retardada devido à maior dispersão que as fibras apresentam nos 1550 nm. O problema da dispersão foi parcialmente resolvido com o surgimento de lasers monomodo. Em 1985 foram realizadas experiências laboratoriais com ritmos de transmissão de 2.5 Gbit/s, que se tornaram disponíveis comercialmente em 1990, e 4 Gbit/s foram obtidos para distâncias superiores 100 km [1]. Experiências a 10 Gbit/s foram tentadas sendo a dispersão e a sensibilidade do receptor os maiores obstáculos a ultrapassar.

Nesta altura assistiu-se ao desenvolvimento de fibras com menores níveis de dispersão, de modo a aumentar a capacidade dos sistemas. Apareceram igualmente um conjunto alargado de fibras especiais das quais se destacam as fibras com dispersão desviada, que apresentam valores de dispersão reduzidos na janela dos 1550 nm. No entanto a utilização de fibras com características especiais está limitada, pois existem milhares de quilómetros de fibra normal instalada, sobre as quais os operadores de telecomunicações pretendem operar as suas redes, não sendo economicamente viável proceder à substituição total das fibras existentes. Contudo, em sistemas a instalar de raiz a escolha do tipo e qualidade das fibras ópticas é cada vez mais uma questão a considerar.

1.1.4- Quarta geração - sistemas coerentes

Sistemas coerentes são usados em comunicações rádios desde 1930. O surgimento de lasers monomodo com larguras espectrais muito estreitas e ruído de fase reduzido permitiu que técnicas coerentes pudessem ser usadas também em sistemas ópticos. Técnicas de modulação como a modulação digital de fase (PSK - **Phase Shift Keying**), modulação digital de frequência (FSK - **Frequency Shift Keying**) e a modulação digital de amplitude (ASK - **Amplitude Shift Keying**) são técnicas usadas em sistemas coerentes [3].

Embora a utilização de sistemas coerentes permita aumentar consideravelmente a sensibilidade dos receptores ópticos, comparativamente aos sistemas de intensidade modulada com detecção directa (IM/DD - **I**ntensity **M**odulation with **D**irect **D**etection), os sistemas coerentes apresentam uma complexidade acrescida, devido ao necessário controlo dos osciladores locais usados na modulação e desmodulação. O aparecimento dos amplificadores ópticos, no início da década de 90, desvalorizou os ganhos conseguidos ao nível da sensibilidade dos receptores, colocando novamente a atenção nos sistemas IM/DD. No entanto, foram realizados ensaios laboratoriais no final da década de 80, com sistemas coerentes a operarem a 10 Gbit/s e com espaçamento entre amplificadores de 100 km, elevando a capacidade dos sistemas para os 1 000 Gbit/s.km.

1.1.5- Quinta geração - o amplificador óptico

Até ao final dos anos 80, a única forma de aumentar a distância de transmissão dos sistemas ópticos era através da regeneração eléctrica. Em sistemas com regeneradores eléctricos o sinal óptico é detectado no regenerador e convertido num sinal eléctrico, amplificado e regenerado electricamente e posteriormente convertido para o domínio óptico. Esta era uma grande limitação ao desenvolvimento dos sistemas ópticos, pois tornava-os bastante onerosos e complexos. O aparecimento dos amplificadores ópticos veio alterar radicalmente a situação [4].

O aparecimento dos amplificadores ópticos, nomeadamente o surgimento dos amplificadores de fibra dopada de Érbio (EDFA - **E**rbium **D**oped **F**iber **A**mplifier), permitiu amplificar o sinal óptico sem a necessidade de conversão para o domínio eléctrico e posterior conversão para o domínio óptico. Surgiram assim os sistemas de longa distância totalmente ópticos, desde o emissor ao receptor. Este foi um grande avanço, pois em sistemas com regeneradores estes funcionam como autênticos funis, dado que a largura de banda dos regeneradores é diversas ordens de grandeza inferior à largura de banda das fibras ópticas.

Os EDFA possibilitam elevados ganhos ópticos, possuem uma largura de banda da ordem dos 4 THz, podem ser usados em sistemas coerentes e IM/DD, e possibilitam a utilização de diversos comprimentos de onda (WDM - **W**avelength **D**ivision **M**ultiplexing).

A construção de sistemas usando EDFA em cascata veio aumentar extraordinariamente a capacidade dos sistemas ópticos. A barreira dos 10 Gbit/s estava finalmente batida e capacidades acima dos 10 000 Gbit/s·km foram alcançadas. A dispersão e as não linearidades da fibra óptica assumem-se, agora, como os maiores obstáculos ao aumento da capacidade dos sistemas.

1.1.6- Sexta geração - os solitões ópticos ?

Nos últimos 5 anos várias experiências foram realizadas, usando diversas técnicas, com o objectivo de aumentar a capacidade dos actuais sistemas. A grande questão que se coloca é como compensar a dispersão e as não linearidades em sistemas transoceânicos, sistemas com distâncias da ordem das dezenas de milhares de quilómetros, ou em sistemas terrestres de muito alto débito.

Diversas técnicas têm sido propostas para condicionar a dispersão. Destas têm assumido particular relevo as baseadas no controlo da frequência instantânea da portadora óptica [5], na inclusão de troços de fibra com dispersão negativa (DCF - **D**ispersion **C**ompensation **F**ibre) [5] e a transmissão suportada pela dispersão (DST - **D**ispersion **S**upported **T**ransmission) [6]. Embora permitindo compensar a dispersão estas técnicas não compensam os efeitos não lineares, que em sistemas de longa distância e elevados ritmos de transmissão podem assumir um papel dominante na degradação do desempenho dos sistemas de comunicação ópticos.

Uma técnica que permite compensar simultaneamente os efeitos não lineares e a dispersão, tinha já sido proposta em 1973 [7], no entanto só após o surgimento do amplificador óptico esta técnica foi aplicada a sistemas práticos. Esta técnica baseia-se na utilização de impulsos ópticos em que a envolvente do campo eléctrico tem a forma secante hiperbólica, com alguns miliwatt de potência de pico, e na compensação da dispersão pelas

não linearidades da fibra óptica. Nesta situação os impulsos chamados solitões, são capazes de se propagarem, mantendo inalterada a sua forma, num meio dispersivo e não linear, como é o caso da fibra óptica [8].

Querendo fugir à polémica de qual será a sexta geração o autor acredita, que a menos que aconteça um desenvolvimento tecnológico capaz de alterar completamente as regras do jogo e de colocar a fasquia a um nível muito mais alto, como por exemplo o desenvolvimento de fibras com qualidades muito superiores a custos relativamente baixos, a próxima geração de sistemas será conseguida com um misto de diferentes técnicas.

A utilização de técnicas conjuntas de solitões e WDM apresentam um potencial considerável e são os principais candidatos para o desenvolvimento e aparecimento comercial de sistemas a operarem a 10 e 40 Gbit/s, por comprimento de onda, permitindo atingir ritmos de transmissão globais da ordem dos terabits por segundo. Neste âmbito diversos trabalhos têm sido apresentados e diversas técnicas têm sido propostas, no sentido de condicionar as distorções induzidas, quer pelo meio de comunicação quer pelos canais adjacentes, nos vários canais do sistema [9-11].

Simultaneamente, ao esforço realizado no sentido de aumentar a capacidade dos sistemas de comunicação ópticos, tem-se assistido, nos últimos dois anos, ao surgimento de diversos dispositivos capazes de realizarem operações de sincronização, extracção e adição de canais, conversão de comprimento de onda e encaminhamento de canais a operarem no domínio óptico. Estes dispositivos vieram dar origem ao surgimento de uma verdadeira camada óptica, com capacidades de processamento inimagináveis há uma década atrás. Neste contexto, os solitões ópticos podem também desempenhar um papel central, pois devido à sua robustez são bons candidatos para muitas técnicas de processamento ao nível óptico.

1.2 Objectivos e estrutura da tese

O trabalho realizado nesta tese centra-se sobre o estudo de sistemas ópticos baseados em impulsos do tipo solitão para elevados ritmos de transmissão. Iremos fazer uma abordagem ao problema do ponto de vista da engenharia das telecomunicações. Ou

seja, iremos concentrar-nos em aspectos de implementação prática, identificando dificuldades e possíveis soluções. O nosso estudo irá incidir, essencialmente, sobre ligações ponto a ponto com amplificação concentrada, até aos 40 Gbit/s, usando um único comprimento de onda.

Começaremos por estudar e caracterizar o canal de comunicação óptico, e analisaremos em que condições é possível usar impulsos do tipo solitão, em sistemas de comunicação ópticos de longa distância a operarem a elevadas ritmos de transmissão. Analisaremos ainda em que medida tais sistemas permitem obter ganhos em termos de capacidade relativamente aos sistemas lineares.

Posteriormente iremos abordar o problema da geração de impulsos do tipo solitão. Este é um problema fundamental, na medida em que só é possível projectar sistemas baseados em solitões se estiverem disponíveis fontes fiáveis, capazes de gerarem impulsos a elevados ritmos de transmissão e que possam ser facilmente moduladas.

Atendendo ao carácter preponderante que o *jitter* temporal assume no desempenho dos sistemas de comunicação baseados em solitões, iremos realizar uma caracterização rigorosa do *jitter*, devido à transmissão não linear, e analisar o seu impacto no desempenho dos sistemas.

Realizaremos uma análise detalhada do receptor óptico pré-amplificado para sistemas baseados em solitões. Tendo por base essa análise desenvolveremos uma descrição analítica do receptor que tenha em conta as principais fontes de degradação do desempenho, ou seja, o ruído de emissão espontânea amplificado, introduzido pelo processo de amplificação óptico, o *jitter* temporal, devido essencialmente à transmissão não linear, e a interferência entre símbolos (ISI - **I**ntersymbol **I**nterference), resultante do processamento efectuado ao nível do receptor.

O conjunto de resultados e ferramentas analíticas desenvolvidas, será utilizado para proceder à análise e optimização de sistemas de comunicação ópticos práticos baseados em solitões.

Com vista a atingir os objectivos anteriormente enumerados, estruturámos este trabalho da seguinte forma:

Capítulo 1 - Neste capítulo é feita uma apresentação sucinta dos desenvolvimentos verificados nos sistemas de comunicação ópticos, desde a sua introdução na década de 70 até aos nossos dias, salientando o esforço realizado no sentido de aumentar a sua capacidade. São ainda identificados os avanços tecnológicos que originaram novas gerações de sistemas, salientando em que medida tais descobertas alteraram a forma de conceber os sistemas e permitiram obter ganhos em termos de capacidade de transmissão. Enquadrado neste esforço de desenvolvimento tecnológico são referidos os objectivos deste trabalho e enumerados os principais resultados obtidos.

Capítulo 2 - Em sistemas baseados em solitões a fibra óptica assume-se como o elemento central do sistema, na medida em que a manutenção dos impulsos é baseada nas propriedades lineares e não lineares da fibra óptica. Neste capítulo para além de ser feita uma breve resenha dos progressos tecnológicos realizados no domínio das fibras ópticas, são analisadas em detalhe as suas propriedades lineares e não lineares, sendo dado especial ênfase à análise da dispersão e efeito de Kerr. São ainda apresentados resultados de ensaios laboratoriais que permitem estimar alguns dos parâmetros da fibra óptica.

Capítulo 3 - Os solitões ópticos começaram por ser uma curiosidade científica, estudados por matemáticos e físicos, antes de se transformarem num problema de engenharia. Neste capítulo são abordadas as principais propriedades dos solitões ópticos, colocando especial ênfase no estudo da sua manutenção em sistemas com amplificação concentrada.

Capítulo 4 - Este capítulo é dedicado ao estudo do emissor de solitões. São discutidos os aspectos mais relevantes a ter em conta no projecto de um emissor de solitões e são apresentados diversos resultados laboratoriais, relativos à implementação de um emissor de solitões, susceptível de ser usado em sistemas a operarem até aos 10 Gbit/s. Neste capítulo analisa-se em detalhe o problema da geração de impulsos curtos, usando um laser semiconductor, a modulação da sequência de impulsos, usando um modulador externo, e a melhoria das características espectrais dos impulsos usando um filtro óptico.

Capítulo 5 - O *jitter* temporal apresenta-se como um dos aspectos mais críticos em sistemas baseados em solitões. Neste capítulo é feita uma caracterização rigorosa do *jitter* devido à transmissão não linear, e são observados desvios substanciais relativamente ao modelo de Gordon-Haus. É comprovado que a interacção entre solitões está na origem dos desvios observados relativamente ao modelo de Gordon-Haus. É derivado um novo modelo, para o *jitter* devido à transmissão não linear, que inclui o efeito simultâneo da interacção entre solitões e do ruído de emissão espontânea. O novo modelo proposto é validado através da comparação com resultados obtidos simulando diversos sistemas práticos.

Capítulo 6 - Neste capítulo é apresentada uma descrição analítica do receptor de solitões e é derivado o desempenho óptimo do receptor. É analisado o problema do processamento óptimo e feita uma análise comparativa de diversos receptores práticos. São ainda identificados os aspectos mais relevantes na optimização do desempenho de sistemas baseados em solitões relativamente ao ruído.

Capítulo 7 - Neste capítulo são derivadas um conjunto de técnicas capazes de procederem à análise e optimização de sistemas baseados em solitões, considerando simultaneamente o efeito do ruído, do *jitter* e da ISI. É analisada em detalhe a degradação originada pelo *jitter* devido à transmissão não linear, e verifica-se como é possível, actuando ao nível da detecção, reduzir as perdas de desempenho devidas ao *jitter* temporal, sem introduzir uma penalização excessiva ao nível da ISI.

Capítulo 8 - Neste último capítulo são feitas algumas considerações finais sobre o trabalho descrito nesta tese e são identificados um conjunto de caminhos possíveis para investigação futura nesta área do conhecimento.

1.3 Principais contribuições

Na opinião do autor, as principais contribuições do trabalho descrito nesta tese, para o conhecimento na área da implementação de sistemas de comunicação baseados em solitões, são:

- 1) Contributo para a rigorosa caracterização do canal óptico, ver capítulo 2 e trabalhos [12-13];
- 2) Identificação dos aspectos mais relevantes da teoria dos solitões, com vista à implementação de sistemas de comunicação práticos baseados em solitões ópticos, ver capítulo 3 e trabalhos [14-15];
- 3) Implementação de um emissor de solitões, para elevados ritmos de transmissão, com base num laser semiconductor, para gerar impulsos curtos, num modulador externo, para modular a sequência de impulsos, e num filtro óptica para melhorar as características espectrais dos impulsos, ver capítulo 4 e trabalhos [16-19];
- 4) Caracterização rigorosa do *jitter* devido à transmissão não linear. Verificação de desvios relativos ao modelo de Gordon-Haus, na caracterização do *jitter* temporal, e desenvolvimento de um novo modelo capaz de descrever a incerteza temporal do tempo de chegada, de impulsos do tipo solitão, na presença de interações múltiplas e de ruído de emissão espontânea amplificado, ver capítulo 5 e trabalhos [20-22];
- 5) Descrição rigorosa do receptor óptico para sistemas baseados em solitões. Determinação do desempenho e processamento óptimo do receptor de solitões, a operar quer no domínio óptico quer no domínio eléctrico. Análise comparativa do desempenho de diversos receptores práticos, ver capítulo 6 e trabalhos [23-24];
- 6) Desenvolvimento de diversas técnicas analíticas capazes de procederem à análise e optimização de sistemas baseados em solitões tendo em consideração o efeito simultâneo do ruído, do *jitter* e da ISI. Aplicação destas técnicas à análise de desempenho e optimização de sistemas práticos, ver capítulo 7 e trabalhos [25-27];

Referências

- [1] Govind P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Nova Iorque, EUA, 1992.
- [2] Gerd Keiser, *Optical fiber communications*, 2ª edição, McGraw-Hill, Nova Iorque, EUA, 1991.
- [3] P. W. Hooijmans, *Coherent optical system design*, John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, 1994.
- [4] E. Desurvire, *Lightwave communications: the fifth generation*, *Scientific America*, pp. 96-103, Janeiro de 1992.
- [5] Ivan P. Kaminow e Thomas L. Koch (editores), *Optical fiber telecommunications III A*, Academic Press, San Diego, EUA, 1997, capítulo 7, escrito por A. H. Gnauck e R. M. Jopson.
- [6] Rui Ribeiro, *Simulação, análise e optimização de sistemas FSK ópticos*, Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 1996.
- [7] A. Hasegawa e F. Tappert, *Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 23, n. 3, pp 142-144, 1973.
- [8] L. F. Mollenauer, *Multigigabit soliton transmission traverse ultralong distances*, *Laser Focus World*, pp. 159 - 170, Novembro de 1991.
- [9] Itsuro Morita, Masatoshi Suzuki, Noboru Edagawa, Keiji Tanaka e Shu Yamamoto, *Long-haul soliton WDM transmission with periodic compensation and dispersion slope compensation*, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, n. 1, pp 80-85, 1999.
- [10] E. Pallise, O. Audouin, E. Desurvire, E. Maunand, *Wavelength-division multiplexed frequency-guided soliton systems with fast in-line saturable absorbers*, *OFC'98*, San Jose, EUA, pp 291-292, 1998.
- [11] B. Malomed, G. D. Peng e P. L. Chu, *Soliton wavelength-division multiplexing system with channel-isolating notch filters*, *Optics Letters*, vol. 24, n. 16, pp 1100-1102, 1999.
- [12] A. Nolasco Pinto, P. S. André, J. L. Pinto e J. Ferreira da Rocha, *Caracterização e Simulação do canal óptico para sistemas de comunicação baseados em solitões*, *Física'98*, Maia, Portugal, pp. 633, 1998.
- [13] P. S. André, A. Nolasco Pinto, J. L. Pinto e J. Ferreira da Rocha, *Determinação da dispersão cromática em fibras ópticas*, *Proto-Física'98*, Aveiro, Portugal, pp. 13, 1998.
- [14] A. Nolasco Pinto, L. Botelho Ribeiro, Mário Ferreira, Berthold Wedding, Bernhard Junginger, A. Matheus e R. Ries, *Experiments on nonlinear propagation*, relatório do projecto europeu TRAVEL, R2011, 1993.
- [15] L. F. Ribeiro, A. Nolasco Pinto, J. F. Rocha e J. L. Pinto, *Tecnologia fotónica para sistemas de comunicação de alto débito*, *Física'96*, Faro, Portugal, 1996.
- [16] A. Nolasco Pinto, P. S. André, J. L. Pinto e F. da Rocha, *Short optical pulses generation by gain switching of a DFB laser diode*, *Confetele'99*, Sesimbra, Portugal, pp. 182-184, 1999.
- [17] P. S. André, A. Nolasco Pinto, J. L. Pinto e J. Ferreira da Rocha, *Extraction of laser rate equations parameters*, *Proceedings of SPIE*, n. 3572, pp. 141-146, 1999.
- [18] P. S. André, A. Nolasco Pinto, J. L. Pinto e F. da Rocha, *Extraction of DFB laser rate equations parameters for optical simulation purposes*, *Confetele'99*, Sesimbra, Portugal, pp. 561-564, 1999.

- [19] J. L. Pinto , M. Pousa , P. S. André , A. Nolasco Pinto e M. R. Ferreira, Emissor para sistemas de transmissão baseado na tecnologia de solitões, A Engenharia Portuguesa no Mundo, Lisboa, Portugal, 1998.
- [20] A. Nolasco Pinto, Govind P. Agrawal e J. Ferreira da Rocha, Effect of soliton interaction on timing jitter in communication systems, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, n° 4, pp. 515-519, 1998.
- [21] A. Nolasco Pinto e J. Ferreira da Rocha, Timing jitter statistics due to soliton interaction and Gordon-Haus effect, NOC'96, Heidelberg, Alemanha, pp. 304-311, 1996.
- [22] A. Nolasco Pinto, Govind P. Agrawal e J. Ferreira da Rocha, Analytical and numerical study of timing jitter in soliton communication systems, OSA'96, Rochester, EUA, 1996.
- [23] J. R. F. da Rocha, L. B. Ribeiro e A. Nolasco Pinto, Semi-analytical method for performance analysis of soliton systems, CLEO/Pacific'95, Chiba, Japão, pp. 43-44, 1995.
- [24] A. Nolasco Pinto , P. S. André , J. L. Pinto e F. da Rocha, Bit-error rate evaluation in soliton systems, Confetele'99, Sesimbra, Portugal, pp. 177-181, 1999.
- [25] A. Nolasco Pinto e J. Ferreira da Rocha, Análise da influência do tempo de chegada no desempenho de sistemas ópticos baseados em solitões, I Conferência Nacional de Telecomunicações, Aveiro, Portugal, pp. 261-263, 1997.
- [26] A. Nolasco Pinto e J. Ferreira da Rocha, Bit error rate degradation due to timing jitter in soliton communication systems, OSA'97, Long-Beach, EUA, 1997.
- [27] A. Nolasco Pinto e J. Ferreira da Rocha, Bit-error rate (BER) estimation and optimization in soliton communication systems, in the presence of timing jitter, amplified spontaneous emission noise, dispersive waves and intersymbol interference, CLEO'2000, São Francisco, EUA, 2000 (submetido a publicação).

