

# Análise e Optimização de Sistemas de Comunicação Ópticos Baseados em Solitões

Armando Nolasco Pinto

Tese realizada sob a orientação do Professor Doutor José Rodrigues Ferreira da Rocha, com vista à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica pela Universidade de Aveiro.

Aveiro, Portugal, 1999



Aos meus pais,  
à Luisa.



## **Agradecimentos**

Muitas pessoas contribuíram de forma valiosa para o trabalho apresentado nesta tese. Sem menosprezar todas as contribuições, vou referir apenas aquelas cujas contribuições foram mais substanciais.

Desde logo o Prof. Dr. Ferreira da Rocha, pelo seu saber, pela sua experiência e por todos os conselhos e sugestões que me deu. Sem a sua ajuda e orientação nunca aqui teria chegado. A sua contribuição, no âmbito da revisão desta tese, foi não só essencial como incansável.

O Prof. Dr. Govind Agrawal, pela sua ajuda e orientação, durante todo o tempo em que estive na Universidade de Rochester, e porque será para mim sempre um exemplo de inteligência e eficiência.

O meu colega e amigo Prof. Dr. Rui Ribeiro, pelas inúmeras discussões científicas que mantivemos e que invariavelmente se revelaram de extrema utilidade.

Outros dois amigos e colegas, o Dr. René-Jean Essiambre e o Eng. Paulo André, o primeiro por todas as sugestões e apoio que me deu durante a minha permanência nos EUA, o Eng. Paulo André pela preciosa ajuda na realização do trabalho laboratorial.

Gostaria ainda de agradecer às seguintes instituições: à Universidade de Aveiro, à Universidade de Rochester e ao Instituto de Telecomunicações que foram as instituições que me acolheram e onde realizei todo o trabalho científico. À Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica que me apoiou financeiramente através de uma bolsa de doutoramento do programa PRAXIS XXI. À Comissão Europeia que contribuiu de forma indirecta para este trabalho através dos projectos TRAVEL, ESTHER e UPGRADE. À Portugal Telecom que contribuiu também indirectamente através do projecto EMITON.

A todos os que contribuíram para este trabalho, o meu muito obrigado.

Armando Pinto



## Resumo

Nesta tese são abordados diversos tópicos relativos à implementação, análise e optimização de sistemas de comunicação ópticos baseados em solitões.

São analisados os aspectos mais relevantes da teoria dos solitões para a sua utilização em sistemas de comunicação ópticos, colocando ênfase na análise da dinâmica dos solitões em sistemas com amplificação concentrada.

O problema da geração de impulsos do tipo solitão é tratado ao nível teórico e experimental. São apresentados diversos resultados laboratoriais, relativos à implementação de um emissor de solitões, capaz de gerar impulsos susceptíveis de serem usados em sistemas a operarem até aos 10 Gbit/s.

É feita uma análise rigorosa do tempo de chegada em sistemas baseados em solitões. São observados desvios em relação ao modelo de Gordon-Haus, para a distribuição do *jitter* temporal, em sistemas a operarem a elevados ritmos de transmissão. Desenvolve-se um novo modelo capaz de caracterizar estatisticamente o *jitter* temporal, tendo em consideração a interacção entre solitões, numa sequência aleatória de impulsos, e o ruído de emissão espontânea, adicionado ao sinal em cada andar de amplificação óptica. Verifica-se uma boa concordância, entre os resultados previsto pelo novo modelo e os resultados da simulação numérica, quando aplicado a sistemas práticos.

Apresenta-se um modelo analítico capaz de descrever o processamento efectuado pelo receptor óptico pré-amplificado, na detecção de impulsos do tipo solitão, e analisa-se em detalhe o efeito do ruído, do *jitter* e da interferência entre símbolos no desempenho do receptor. É dedicada particular atenção à análise da degradação do desempenho devido à distribuição não gaussiana do *jitter*, usando-se para tal, o novo modelo para o *jitter* previamente derivado.

É derivado o desempenho do receptor óptico, para sistemas baseados em solitões, e é feita uma análise comparativa dos desempenhos conseguidos com alguns receptores práticos. Mostra-se ainda como é possível obter ganhos consideráveis optimizando o processo da detecção em sistemas práticos.

## Summary

This thesis deals with several topics related to the set up, analysis and optimisation of optical communication systems based on solitons.

The analysis focuses on the most relevant aspects of the theory of solitons in connection to the implementation of optical communication systems, emphasising the dynamics of solitons in lumped amplifiers systems.

The question on generating optical solitons is treated both theoretically and experimentally. Several laboratory results are presented, gathered from a source of solitons, capable of generating solitons suitable for systems operating at transmission rates up to 10 Gbit/s.

An accurate timing jitter analysis is carried out for solitons based systems and deviations from the Gordon-Haus jitter model are observed for high data rate systems. A new analytical model for the timing jitter is proposed. The model presented comprises the interactions, in a random sequence of solitons, and the effect of the amplified spontaneous emission noise, added at each amplification stage. The agreement between the expected results, from the new analytical model, and the results from the numerical simulation, of practical communication systems, is good.

We also present an analytical model capable of describing the signal processing in optically pre-amplified receivers, when applied to the detection of solitons. A detailed analysis was performed on the effects of the noise, inter symbol interference and timing jitter on the receiver performance. Special emphasis is given to the degradation due to non-gaussian timing jitter, by using the new timing jitter model previously derived.

The optimum receiver performance, for soliton systems, is derived. This result is compared with the one obtained by practical soliton receivers. Additionally it is demonstrated that is possible to obtain considerable gains by optimising the detection process in practical communication systems.



## Adopções Lexicais

Uma das primeiras dificuldades que se colocam a quem pretende escrever uma tese de carácter científico em língua portuguesa é como tratar o vasto conjunto de expressões e nomes usados em língua inglesa pela comunidade científica.

Sem querer ofender os estudiosos da língua portuguesa, como João de Araújo Correia que diz em *Horas Mortas* "olhos postos em língua estrangeira sem discernimento são origem de corrupção da língua ...". Mas também sem querer cair no exagero de traduzir todas os nomes e expressões sacrificando a compreensão, tentarei usar expressões portuguesas quando existentes ou quando não forem origem de confusão. Mantendo a notação em língua inglesa sempre que daí advenha um considerável ganho de clareza. Estes são os casos das seguintes expressões, que aparecem na tese em itálico:

*jitter* - variação aleatória de um dado acontecimento, no caso do *jitter* temporal refere-se à variação aleatória do instante de recepção dos impulsos ópticos, relativamente aos instantes ideias regularmente espaçados no tempo;

*chirp* - variação da frequência instantânea da portadora óptica ao longo de um impulso óptico;

*integrate and dump* - refere-se a um tipo de receptor, onde a potência média de cada impulso é calculada antes do processo de decisão;

*pre-chirp* - técnica de compensação da dispersão, usada do lado do emissor, em que é provocada uma variação da frequência instantânea da portadora óptica ao longo do impulso;

*split - step Fourier method* - método numérico aplicável à resolução de equações diferenciais não lineares;

*fast saturable absorbers* - dispositivos que têm a particularidade de absorver o sinal para valores da intensidade do campo óptico inferiores a um dado limiar e de serem transparentes para valores superiores a esse limiar;

*optical loop* - sistema óptico, com uma configuração em círculo, usado em experiências laboratoriais, que permite estudar a propagação de um sinal óptico durante uma distância elevada;

*duty cycle* - razão entre a duração do nível superior e o período numa onda quadrada;

*gain switching* - técnica usada para gerar impulsos ópticos estreitos tendo por base a comutação do ganho óptico da cavidade ressonante dum laser semiconductor;

*turn-on jitter* - incerteza no instante de comutação de um laser semiconductor originada pelo ruído do laser;

Procurou-se usar neste trabalho uma notação e simbologia própria, uniforme e coerente ao longo da tese, e o mais largamente aceite e usado, dentro desta área específica do conhecimento. No entanto, para permitir uma leitura mais fácil e agradável, o conjunto de notações e símbolos usados foram condensados, respectivamente, na lista de notações e símbolos.

Durante a tese são ainda usados um vasto conjunto de acrónimos, ver glossário de acrónimos no final da tese, normalmente usados na literatura científica sobre este tema. Por questões de clareza os acrónimos usados são usualmente os oriundos da língua inglesa. De igual modo é apresentada no final da tese uma lista de figuras e tabelas para facilitar a localização dos diferentes assuntos aqui tratados.

## Lista de Notações

<b>Notação</b>	<b>Significado</b>
<b>Negrito</b>	A escrita a negrito é usada para grandezas vectoriais
$\int_a^b f(\cdot)dx$	integral de $f(\cdot)$ entre a e b relativamente a x
$\int f(x)dx$	primitiva de $f(x)$ relativamente a x
$\frac{df(x)}{dx}$	derivada de $f(x)$ relativamente a x
$\frac{\partial f(x)}{\partial x}$	derivada parcial de $f(\cdot)$ relativamente a x
$x^*$	complexo conjugado de x
$x!$	factorial de x
$E(X)$	esperança matemática da variável aleatória X
$\langle X(\xi) \rangle$	valor médio de $X(\xi)$ em ordem a $\xi$
$H(f)$	transformada de Fourier de $h(t)$ , onde o argumento é a frequência linear
$H(\omega)$	transformada de Fourier de $h(t)$ , onde o argumento é a frequência angular
$\cos(\cdot)$	função coseno
$\delta(\cdot)$	função delta de Dirac
$\operatorname{erfc}(\cdot)$	função de erro complementar
$\exp(\cdot)$	função exponencial
$\Gamma(\alpha)$	função gama com parâmetro $\alpha$
$\Gamma(\alpha, x)$	função gama incompleta com parâmetro $\alpha$ e x
$I_{M-1}(\cdot)$	função de Bessel modificada de ordem M-1
$\ln(\cdot)$	função logaritmo natural
$\log(\cdot)$	função logaritmo de base 10
$Q(\cdot)$	função Q
$\operatorname{rect}(\cdot)$	função impulso rectangular
$\operatorname{sech}(\cdot)$	função secante hiperbólica
$\sin(\cdot)$	função seno
$U(\cdot)$	função degrau



## Lista de Símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$A(z,t)$	envolvente normalizada do campo eléctrico em função da distância e do tempo
$A_{\text{eff}}$	área efectiva da fibra óptica
$a(\xi)$	amplitude normalizada instantânea do solitão em função da distância normalizada
$\alpha$	constante de atenuação
$\alpha_{\text{ch}}$	factor de alargamento da largura de linha
$\alpha_{\text{eff}}$	constante de atenuação efectiva
$\alpha_2$	constante de atenuação não linear
$B$	birrefringência
$B_{\text{opt}}$	largura de banda óptica
$B_r$	ritmo de transmissão
$\beta$	constante de propagação
$\beta_d$	derivada de ordem $d$ de $\beta(\omega)$ relativamente a $\omega$ calculada em $\omega_0$
$\beta_{\text{eff}}$	constante de propagação efectiva
$\beta_s$	factor de emissão espontânea
$\beta_x$	constante de propagação no eixo de polarização dos $x$
$\beta_y$	constante de propagação no eixo de polarização dos $y$
$\beta_0$	constante de propagação calculada à frequência da portadora
$\beta_{0,d}$	constante de propagação calculada à frequência da portadora do canal $d$
$\beta_+$	constante de propagação calculada em $\omega_+$
$\beta_-$	constante de propagação calculada em $\omega_-$
$C$	capacidade
$c$	velocidade de propagação da luz no vácuo
$c_n$	coeficiente da série de Karhunen-Loève
$D$	dispersão
$\hat{D}$	operador diferencial
$D_{\text{PMD}}$	dispersão devida à polarização dos modos de propagação
$\Delta B$	largura espectral do processo de Brillouin
$\Delta S$	largura espectral da fonte
$\Delta f_B$	desvio da frequência do campo de Stokes resultante do efeito de Brillouin
$\Delta n$	variação não linear do índice de refração
$\Delta\beta$	variação não linear da constante de propagação
$\Delta\tau$	intervalo de tempo infinitesimal
$\Delta\omega_B$	desvio da frequência angular do campo de Stokes resultante do efeito de Brillouin
$\delta\tau_d$	somatório dos desvios temporais parciais $\delta\tau_{d,j}$

$\delta\tau_{dj}$	desvio temporal normalizada à entrada do receptor induzido por $\delta\omega_j$
$\delta\omega_j$	desvio da frequência central normalizada induzido pelo amplificador j
$\delta\omega_s$	desvio da frequência central normalizada do solitão relativamente a $\omega_0$
<b>E</b>	vector campo eléctrico
$E(z, t)$	campo eléctrico em função da distância e do tempo
$E_0$	amplitude do campo eléctrico
$\epsilon_{NL}$	permitividade relativa não linear
$\epsilon_p$	valor normalizado do factor de compressão do ganho
$\epsilon_r$	permitividade relativa
$\epsilon_0$	permitividade no vácuo
$F(x, y)$	distribuição transversal do campo eléctrico na fibra óptica em função de x e y
$f_{np}(t)$	força de Langevin para a população de portadores
$f_{sp}(t)$	força de Langevin para a população de fotões
$f_{\phi}(t)$	força de Langevin para a fase do campo eléctrico
$f_0$	frequência da portadora óptica
$\phi$	fase do campo eléctrico
$\phi_{NL}$	variação de fase não linear do campo eléctrico
$\phi_{NL,d}$	variação de fase não linear do campo eléctrico correspondente ao canal d
$\phi_s$	desvio de fase do solitão
<b>G</b>	ganho de um amplificador óptico em potência
$g_B$	ganho de Brillouin
$g_{p0}$	valor normalizado da constante de declive do ganho
$\Gamma$	atenuação óptica num comprimento de dispersão
$\gamma$	coeficiente não linear da fibra óptica
$h_r(t)$	resposta impulsional do filtro eléctrico do receptor
$\eta$	eficiência quântica
$I(t)$	corrente de injeção
$I_d$	nível de decisão óptimo
$I_m(t)$	corrente de modulação
$I_{th}$	valor limiar da corrente de injeção
$I_0$	valor médio da corrente de injeção
$i$	unidade imaginária
$i_{\omega_m}$	amplitude da corrente eléctrica com frequência angular $\omega_m$
$i_0$	amplitude da corrente eléctrica
$\varphi_n(t)$	função ortonormal da expansão em série de Karhunen-Loève
$k_B$	constante de Boltzman
$k_T$	taxa de decaimento do tempo de vida dos portadores com a corrente média
$k_0$	constante de propagação no vazio

$L_D$	comprimento de dispersão
$L_T$	comprimento total de um sistema óptico
$L_a$	separação entre amplificadores ópticos
$L_{eff}$	comprimento não linear efectivo
$\lambda$	comprimento de onda no vazio
$\lambda_D$	comprimento de onda no vazio com dispersão nula
$m$	índice de modulação
$\mu_0$	permeabilidade magnética do vazio
$N$	ordem do solitão
$\hat{N}$	operador não linear
$N(t)$	ruído branco gaussiano
$N'(t)$	ruído branco gaussiano filtrado
$N'(f)$	ruído branco gaussiano filtrado no domínio da frequência
$N_a$	número total de amplificadores
$N_i$	número médio de fotoelectrões libertados durante um intervalo de tempo $\Delta\tau$
$N_p$	número de portadores na região activa de um laser semiconductor
$N_{pt}$	número de portadores na região activa na transparência
$N_{p0}$	valor médio do número de portadores para uma dada corrente de injeção
$N_s$	número de fotões num solitão
$N_0$	densidade espectral de potência unilateral do ruído de emissão espontânea amplificado
$n$	índice de refração linear
$n_{eff}$	índice de refração efectivo
$n_n$	índice de refração do núcleo
$n_b$	índice de refração da bainha
$n_{sp}$	factor de emissão espontânea
$n_x$	índice de refração no eixo de polarização dos x
$n_y$	índice de refração no eixo de polarização dos y
$n_2$	índice de refração não linear expresso em $m^2/V^2$
$n_2^I$	índice de refração não linear expresso em $m^2/W^2$
$\mathbf{P}$	vector polarização induzida
$\mathbf{P}_L$	componente linear do vector polarização induzida
$\mathbf{P}_{NL}$	componente não linear do vector polarização induzida
$P_{in}$	potência óptica à entrada de um dispositivo
$P_{out}$	potência óptica à saída de um dispositivo
$P_s$	potência de pico à saída do emissor
$P_p$	potência de pico de um impulso
$P_B^{th}$	limiar de potência necessário para iniciar o processo de Brillouin
$P_0$	potência de pico do solitão
$p_0$	probabilidade de erro do símbolo lógico "0"

$p_1$	probabilidade de erro do símbolo lógico "1"
$Q$	factor de incremento da potência óptica de pico do solitão
$q$	carga do electrão
$q_0$	metade da separação temporal normalizada entre solitões
$R$	resistência
$R(t_1, t_2)$	função auto correlação
$r_n$	raio do núcleo da fibra óptica
$\rho$	quociente entre a responsividade do fotodetector e a carga do electrão
$S_p$	número de fótons na cavidade de um laser semiconductor
$S_{p0}$	valor médio do número de fótons para uma dada corrente de injeção
$t$	variável temporal
$t_g$	variável temporal num referencial que se desloca à velocidade de grupo
$\tau$	variável temporal normalizada num referencial que se desloca à velocidade de grupo
$\tau_R$	coeficiente relativo ao efeito de Raman normalizado
$\tau_n$	tempo médio de vida dos portadores
$\tau_{n0}$	tempo de vida dos portadores a uma temperatura de referência
$\tau_p$	tempo médio de vida dos fótons
$\tau_s$	posição temporal normalizada do solitão num referencial que se desloca à velocidade de grupo
$T_R$	coeficiente relativo ao efeito de Raman
$T_{bit}$	período do bit
$T_{fwhm}$	largura temporal a meia altura do solitão em potência
$T_w$	janela de integração do receptor <i>integrate and dump</i>
$T_0$	largura temporal do solitão
$\omega$	frequência angular
$\omega_d$	frequência angular da portadora do canal d
$\omega_m$	frequência angular do sinal de modulação
$\omega_{m,j}$	frequência angular de modulação correspondente ao mínimo de ordem j
$\omega_0$	frequência angular da portadora
$\omega_+$	frequência angular maior do que a frequência angular da portadora óptica
$\omega_-$	frequência angular menor do que a frequência angular da portadora óptica
$U$	envolvente complexa normalizada do solitão
$u(\xi, \tau)$	amplitude normalizada do solitão médio
$u_s$	amplitude de pico normalizada do solitão
$v_A$	velocidade de propagação de um campo acústico na sílica
$v_{gx}$	velocidade de grupo no eixo de polarização dos x
$v_{gy}$	velocidade de grupo no eixo de polarização dos y
$W_{x_0}(x)$	função densidade de probabilidade associada à recepção do símbolo lógico "0"
$W_{x_1}(x)$	função densidade de probabilidade associada à recepção do símbolo lógico "1"



$\mathbf{x}$	vector unitário orientado segundo o eixo dos x
$\chi^{(d)}$	susceptibilidade eléctrica de ordem d
$\mathbf{y}$	vector unitário orientado segundo o eixo dos y
$z$	variável espacial
$z_0$	período do solitão
$\xi$	variável espacial normalizada
$\xi_a$	separação normalizada entre amplificadores



# Índice

Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Evolução dos sistemas de comunicação ópticos.....	2
1.1.1 Primeira geração - o díodo emissor de luz.....	2
1.1.2 Segunda geração - a fibra monomodo.....	3
1.1.3 Terceira geração - o laser monomodo.....	4
1.1.4 Quarta geração - sistemas coerentes.....	4
1.1.5 Quinta geração - o amplificador óptico.....	5
1.1.6 Sexta geração - os solitões ópticos ?.....	6
1.2 Objectivos e estrutura da tese.....	7
1.3 Principais contribuições.....	10
Capítulo 2: Modelização da Fibra Óptica.....	15
2.1 Introdução.....	15
2.2 Perspectiva histórica.....	16
2.3 Propriedades lineares.....	18
2.3.1 Atenuação.....	19
2.3.1.1 Medição da atenuação.....	20
2.3.2 Dispersão.....	21
2.3.2.1 Medição da dispersão.....	24
2.3.3 Birrefringência.....	32
2.4 Propriedades não lineares.....	34
2.4.1 Índice de refração não linear.....	35
2.4.1.1 Auto modulação de fase - SPM.....	36
2.4.1.2 Modulação cruzada de fase - CPM.....	44
2.4.1.2.1 Entre canais com diferentes comprimentos de onda..	44
2.4.1.2.2 Entre canais ortogonalmente polarizados.....	46
2.4.1.3 Mistura de quatro ondas - FWM.....	47
2.4.2 Difusão não elástica estimulada.....	48
2.4.2.1 Difusão estimulada de Brillouin - SBS.....	49
2.4.2.1.1 Montagem experimental.....	51
2.4.2.2 Difusão estimulada de Raman - SRS.....	53

2.5 Modelo matemático.....	54
2.5.1 Equação da fibra.....	55
2.5.2 Parâmetros da equação da fibra.....	57
2.5.3 Resolução numérica da equação da fibra.....	57
2.6 Conclusões.....	58
 Capítulo 3: Solitões Ópticos.....	 61
3.1 Introdução.....	61
3.2 Solitões em fibras ópticas.....	62
3.2.1 Equação não linear de Schrödinger.....	62
3.2.2 Solitões de 1ª ordem e de ordem superior.....	63
3.3 Sistemas de comunicação ópticos baseados em solitões.....	69
3.3.1 Transmissão de informação em sistemas baseados em solitões....	70
3.3.2 Amplificação óptica.....	71
3.3.3 Regime de propagação.....	73
3.2.3.1 Regime do solitão médio - ASR.....	74
3.2.3.2 Regime quase adiabático.....	77
3.3.4 Controlo durante a propagação.....	79
3.2.4.1 Filtragem óptica.....	79
3.2.4.2 Moduladores síncronos.....	80
3.2.4.3 Outras técnicas de controlo.....	81
3.3.5 Alguns resultados experimentais relevantes.....	82
3.4 Conclusões.....	86
 Capítulo 4: Emissor de Solitões.....	 89
4.1 Introdução.....	89
4.2 Características do emissor de solitões.....	91
4.3 Técnicas de implementação.....	93
4.4 Laser semiconductor.....	95
4.4.1 Caracterização.....	96
4.4.1.1 Equações de taxas.....	96
4.4.1.2 Extracção dos parâmetros.....	98
4.4.1.3 Efeitos parasitas.....	103

4.4.2	Análise DC e AC.....	110
4.4.2.1	Análise DC.....	111
4.4.2.2	Análise AC.....	112
4.5	Modulação directa.....	115
4.6	Modulação directa com filtragem óptica.....	122
4.7	Modulação da sequência de impulsos.....	124
4.8	Medição do <i>jitter</i> à saída do emissor.....	125
4.9	Conclusões.....	130
Capítulo 5:	Incerteza do Tempo de Chegada - <i>Jitter</i> .....	133
5.1	Introdução.....	133
5.2	Problema do <i>jitter</i> em sistemas IM-DD ópticos.....	134
5.3	<i>Jitter</i> devido à transmissão não linear.....	135
5.3.1	Efeito de Gordon-Haus.....	136
5.3.2	Novo modelo para a interacção entre solitões.....	139
5.3.2.1	Caso de dois solitões.....	139
5.3.2.2	Caso de três solitões.....	142
5.3.2.3	Numa sequência aleatória.....	144
5.3.2.4	Validação do novo modelo para a interacção.....	148
5.3.3	Outros fontes de <i>jitter</i> .....	149
5.4	Novo modelo para o <i>jitter</i> .....	158
5.4.1	Desvios relativamente ao modelo de Gordon-Haus.....	159
5.4.2	Efeito de Gordon-Haus e a interacção entre solitões.....	161
5.4.3	Comparação entre o novo modelo e resultados da simulação.....	162
5.5	Conclusões.....	166
Capítulo 6:	Desempenho e Optimização de Receptores para Solitões.....	169
6.1	Introdução.....	169
6.2	Modelo analítico do receptor.....	170
6.3	Receptor <i>integrate and dump</i> .....	181
6.3.1	Determinação do BER.....	182
6.3.2	Análise de desempenho.....	190
6.4	Receptor <i>integrate and dump</i> com janela reduzida.....	196

6.5 Outro tipo de filtros.....	203
6.5.1 Desempenho óptimo.....	204
6.5.2 Comparação com receptores práticos.....	210
6.6 Ruído eléctrico e os campos dispersivos na detecção.....	220
6.7 Conclusões.....	224
Capítulo 7: Desempenho e Optimização na Presença de <i>Jitter</i> e ISI.....	227
7.1 Introdução.....	227
7.2 Impacto do <i>jitter</i> .....	228
7.2.1 Formulação analítica.....	229
7.2.2 Análise de desempenho.....	234
7.2.3 Efeito simultâneo do ruído e do <i>jitter</i> .....	240
7.3 Interferência entre símbolos.....	254
7.3.1 Formulação analítica.....	255
7.3.2 Efeito simultâneo do ruído, do <i>jitter</i> e da ISI.....	257
7.4 Conclusões.....	265
Capítulo 8: Considerações Finais.....	267
8.1 Principais conclusões.....	267
8.2 Sugestões para trabalho futuro.....	270
Apêndices.....	273
Apêndice A: Desvio Instantânea da Frequência da Portadora Óptica.....	275
Apêndice B: Densidade Espectral de Potência do Solitão.....	283
Apêndice C: Derivação das Expressões para a Interação entre Solitões.....	287
Apêndice D: Derivação da Variância do <i>Jitter</i> Devido ao Efeito de Raman.....	291
Apêndice E: Potência Média do Símbolo Lógico "1".....	295
Glossário de Acrónimos.....	297
Lista de Tabelas.....	299
Lista de Figuras.....	301

Não foi desde o início que os Deuses revelaram tudo aos mortais,  
mas com o correr do tempo, procurando, descobrimos o melhor.

Xenophanes, poeta e filósofo grego, 570 A.C. - 475 A.C.