



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE MICROONDAS E ÓPTICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Análise da Redução da Latência em Redes Ópticas de Pacotes pela Diminuição no Tempo de Chaveamento de SOAs

Autor: Raniere Noronha de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Aldário C. Bordonalli

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aldário C. Bordonalli – (Presidente)
Prof. Dr. Hélio Waldman – (FEEC/Unicamp)
Prof. Dr. Marcelo L. F. Abbade – (PUC-Campinas)
Prof. Dr. Rui Fragassi – (FEEC/Unicamp)
Prof. Dr. Cristiano de Mello Gallep – (CESET/Unicamp)

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações/Telemática.

Campinas, junho 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C253a Carvalho, Noronha de Raniere
 Análise da redução da latência em redes ópticas de
 pacotes pela diminuição no tempo de chaveamento de SOAs
 / Raniere Noronha de Carvalho. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

 Orientador: Aldário Chrestani Bordonalli
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

 1. Amplificadores óticos. 2. Comutação de pacotes
(Transmissão de dados). 3. Sistemas de transmissão de
dados. I. Bordonalli, Aldário Chrestani. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e
de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Latency reduction in optical packet networks due to SOA
switching time improvements.

Palavras-chave em Inglês: Optical amplifiers, Packet switching, Data
transmission systems.

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática.

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca examinadora: Hélio Waldman, Marcelo Abbade, Rui Fragassi e Cristiano
de M. Gallep.

Data da defesa: 20/6/2008.

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica.

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Raniere Noronha de Carvalho

Data da Defesa: 20 de junho de 2008

Título da Tese: "Análise da Redução da Latência em Redes Ópticas de Pacotes pela Diminuição no Tempo de Chaveamento de SOAs"

Prof. Dr. Aldário Chrestani Bordonalli (Presidente):



Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade:



Prof. Dr. Hélio Waldman:



Resumo

Atualmente, têm-se observado tentativas de se transferir o processamento da informação em redes de tráfego de pacotes cada vez mais para o domínio óptico. Isto acarretaria um aumento da quantidade de informações trocadas entre os nós da rede e promoveria a diminuição da latência do fluxo de pacotes. Com este intuito, procurou-se analisar os efeitos da redução do tempo de acionamento de uma chave óptica simples baseada em um amplificador óptico a semiconductor (SOAs) comum e disponível comercialmente no desempenho de um arranjo experimental que simulava uma rede de tráfego de pacotes. Posteriormente, de posse dos resultados obtidos, que assumiram a manutenção da integridade dos bits do pacote dentro de um fator de 10% durante os transientes de chaveamento, a latência da rede foi teoricamente avaliada. Para a melhoria do tempo de chaveamento do SOA, utilizou-se uma técnica de pré-injeção de pulso de corrente de portadores. Como esperado, houve uma redução acentuada dos tempos de acionamento de início e fim do processo de chaveamento óptico em relação ao obtido com pulsos quadrados simples, da ordem de 10 vezes. Verificou-se, também, que, acima de um determinado número de chaveamentos ocorrendo dentro de uma mesma rede óptica de pacotes, a latência da rede poderia ser diminuída de acordo com o tráfego da rede com a aplicação da técnica de redução do tempo de chaveamento do SOA.

Palavras-chave: Pacotes ópticos, chaveamento fotônico, redes ópticas, amplificador óptico a semiconductor.

Abstract

Currently, more and more attempts are being made to move network processing of information packets to the optical domain. This can potentially lead to an increase of the amount of information that is exchanged among nodes of the network and promote the reduction of latency of packet flow. In this sense, this work examines the effects of reducing the switching time of semiconductor optical amplifier (SOA) based switches in the performance of an experimental arrangement that simulates a network with optical packet traffic. By assuming per-bit packet integrity within a factor of 10% over the switching period of transients, the latency of the network was then theoretically evaluated.

To improve the SOA switching time, a pre-impulse step injected current technique was used to provide excess carriers during transients. As result, a reduction of the order of ten times in the optical switching interval was observed in relation to that provided by ordinary square pulses. In terms of packet traffic flow, the latency resulting from the improved SOA switching time could considerably be reduced based on the number of switching events occurring within the network.

Keywords : Optical packets, optical switching, optical networks and semiconductor optical amplifier

“Por maior que seja o talento ou o esforço, algumas coisas exigem tempo: não dá para produzir um bebê em um mês engravidando nove mulheres.”

AGRADECIMENTOS

São tantos agradecimentos que é difícil até saber por onde começar, mas como tudo tem um começo, meio e fim...

Agradeço a toda a minha família, principalmente aos meus pais (Joaquim e Fátima) e irmãos (Rafaela e Ranério) que sempre confiaram e acreditaram que eu poderia chegar até aqui e, principalmente, por todo apoio psicológico, sentimental e financeiro durante essa época tão enriquecedora na minha vida.

Agradeço a toda confiança da minha namorada, Nayara, nessas minhas novas conquistas e, sobretudo, pelo seu companheirismo nas horas boas e ruins desse trajeto que passamos nesses dois anos.

É com grande afeto que agradeço ao meu orientador, professor Aldário, que desde o começo acreditou na minha capacidade e potencialidade para esse projeto. E desde o princípio estive ao meu lado como um amigo possibilitando uma completa harmonia.

Agradeço, também, com muita ênfase a ajuda do professor Evandro Conforti, que sempre esteve presente ao longo dessa minha trajetória e sua enorme presteza comigo, atuando como um segundo orientador nessa caminhada.

E para finalizar, quero agradecer infinitamente aos meus colegas e amigos de laboratório que sempre estiveram dispostos a me ajudar no que fosse possível (Adriano, Napoleão, Reginaldo, Cláudio, André, Cristiano, Henrique, Arismar e, principalmente, ao Marcelo) e a todos os outros colegas da FEEC e da república onde morei esses anos.

Enfim, agradeço a Deus por estar me dando saúde, perseverança e confiança para alcançar os meus objetivos profissionais e pessoais.

GLOSSÁRIO

Acrônimos

ATM: Asynchronous Transfer Mode

ASE: Amplified of Spontaneous Emission

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing

FDM: Frequency Division Multiplexing

FPP: Fração de Perda de Pacotes

ISO: International Standard Organization

IP: Internet Protocol

KEOPS: Keys to Optical Packet Switching

LAN: Local Area Network

MAN: Metropolitan Area Network

MPLS: Multiprotocol Label Switching

NGN: Next Generation Networks

NS: Network Simulator

OCDM: Optical Code Division Multiplexing

OPS: Optical packet Switching

OBS: Optical Burst Switching

OPSN: Optical Packet Switching Network

OSI: Open System Interconnection

OTDM: Optical Time Division Multiplexing

PCIC: Pacote de tamanho Constante e Intervalo entre pacotes Constante

PCIV: Pacote de tamanho Constante e Intervalo entre pacotes Variável

PISIC: Pre-Impulsed Step Injection Current

QoS: Quality of Service

RF: Radio Frequency

RV: Random Variable

SCM: Subcarrier Multiplexing

SDH: Synchronous Digital Hierarchy

SOA: Semiconductor Optical Amplifier

SONET: Synchronous Optical Network

TDM: Time Division Multiplexing

TTL: Time to live (tempo de vida)

UDP: User Datagram Protocol

WAN: Wide Area Network

WDM: Wavelength Division Multiplexing

Símbolos

A_{nr}	taxa de recombinação não-radiativa
a	ganho diferencial
A	envoltória do sinal óptico modulado em intensidade
A_{eff}	área efetiva da região ativa
B	coeficiente de recombinação radiativa
c	velocidade da luz no vácuo
C	coeficiente de recombinação de Auger
d	espessura da cavidade ativa
E	campo elétrico total
E_{sat}	energia de saturação do dispositivo
f	frequência
g_0	valor de pico do ganho, determinado pelo nível de bombeio do amplificador

g	ganho por unidade de comprimento
G_0	valor não-saturado do fator de amplificação
G	ganho saturado do amplificador
G_{sig}	ganho de uma única seção
G_s	fator de amplificação
hf	energia do fóton
h	constante de Planck
I	corrente injetada na cavidade
L	comprimento da cavidade do SOA
n	índice de refração do meio
n_0	índice de refração na ausência de luz
N	densidade de portadores por unidade espacial de volume
N_0	densidade de portadores na transparência
N_{est}	densidade de portadores no estado estático
N_p	densidade de portadores devido à perturbação
P_{out}	potência de saída
P_{in}	potência de entrada
P_{sat}	potência de saturação
$P(z,\tau)$	potência do pulso
P_k	potência instantânea do k-ésimo sinal (caso estático)
p_k	potência do sinal de perturbação do k-ésimo sinal
P_T	potência total do caso estático
p_T	potência total devido à perturbação
q	carga do elétron
R'	taxa total de recombinação
R	taxa de recombinação espontânea
S_{in}	densidade média de fótons
V	volume da região ativa
w	largura da cavidade ativa
z	posição ao longo da cavidade

Símbolos Gregos

α_{int}	coeficiente de perdas internas
α_{H}	fator de alargamento de linha
χ	suscetibilidade do meio
$\Delta\lambda$	intervalo espectral medido entre picos
ϵ_0	permissividade
Γ	fator de confinamento
η_{ins}	perda concentrada entre dois amplificadores
λ	comprimento de onda
μ_0	permeabilidade magnética no vácuo
$\theta(z, \tau)$	fase do pulso
τ_c	tempo de vida dos portadores elétricos
τ_{eff}	tempo efetivo de vida dos portadores
$\tau_{s,k}$	contribuição da emissão estimulada de cada feixe no tempo de vida
v_g	velocidade de grupo
ω	freqüência angular do sinal óptico
ω_0	freqüência de transição atômica
ξ	perda interna normalizada do guia de onda

Índice

Capítulo 1 - Introdução.....	1
Capítulo 2 – Redes Ópticas.....	4
2.1 Arquitetura de Redes Ópticas.....	5
2.2 Pacotes Ópticos.....	9
2.2.1 OCDM.....	9
2.2.2 SCM.....	10
2.2.3 OTDM.....	10
2.2.4 FDM/TDM.....	11
2.3 MPLS em Redes Ópticas.....	12
2.3.1 Multiprotocol Label Switching.....	13
2.4 Chaveamento Óptico (OPS x OBS).....	15
2.5 Tráfego de Pacotes Ópticos	17
2.5.1 Tráfego com intervalo constante (PCIC).....	18
2.5.2 Tráfego com intervalo variável (PCIV).....	18
2.5.3 Modelagem de Poisson do tráfego de chegada.....	19
2.5.4 Distribuição do Tráfego.....	20
2.6 Armazenamento Óptico e Eletrônico em Redes de Dados.....	21
Capítulo 3 – Amplificador Óptico a Semicondutor.....	23
3.1 Análise do Ganho no SOA.....	26
3.1.1 Análise Estática do Ganho.....	27
3.1.2 Análise Dinâmica do Ganho.....	30
3.2 Efeitos não-lineares.....	35
3.2.1 Efeitos Interbandas.....	36
3.2.2 Efeitos Intrabanda.....	38
3.3 Chaveamento Óptico.....	38

Capítulo 4 – Estrutura Experimental.....	41
4.1 Projeto Opto-Eletrônico.....	41
4.1.1 Descrição dos equipamentos.....	41
4.1.1.1 Laser Santec.....	42
4.1.1.2 Modulador Óptico.....	43
4.1.1.3 Geradores de padrão de pulso.....	44
4.1.1.4 Amplificador Óptico.....	45
4.1.2 Montagem Experimental.....	54
 Capítulo 5 – Resultados Gerais Obtidos.....	 59
5.1 Técnica de chaveamento.....	59
5.2 Pacotes de Informações.....	60
5.3 Chaveamento.....	61
5.3.1 Simples.....	61
5.3.2 Duplo (1 Step).....	62
5.3.3 Triplo (2 Steps).....	63
5.4 Resultados Obtidos.....	63
5.4.1 Chaveamento por pulso simples.....	64
5.4.2 Chaveamento por pulso duplo (Pisic 1 step).....	64
5.4.3 Chaveamento por pulso triplo (Pisic 2 steps).....	66
5.4.4 Chaveamento por pulso PISIC idealizado.....	68
5.5 Testes na rede KyaTera.....	70
5.6 Melhor latência ou aumento de tráfego.....	71
5.7 Conclusões.....	73
 Capítulo 6 - Considerações Finais.....	 75
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	76
 Referências Bibliográficas.....	 77

Lista de Figuras

<i>Fig. 2.1 – Rede Metropolitana.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig. 2.2 – Redes de Pacotes IP/MPLS.....</i>	<i>15</i>
<i>Fig. 2.3 – Redes OBS e OPS.....</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 2.4 – Caracterização do tipo de tráfego.....</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 2.5 – Pacotes com intervalos de tempos constantes.....</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 2.6 – Perfil Pacotes com intervalos de tempos variáveis.....</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 2.7 – Buffer óptico por circulação.....</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 3.1 – Emissão estimulada dentro de um SOA.....</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 3.2 – Ganho versus densidade de portadores na banda de condução.....</i>	<i>37</i>
<i>Fig. 3.3 – Comutador com conversão óptica-eleto-óptica.....</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 3.4 – Esquema básico de chaveamento óptico da informação.....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 4.1 – Laser Santec TSL-210V.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 4.2 – Resposta eletro-óptica do modulador externo fornecida pelo fabricante.....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 4.3 – Gerador Agilent 81141A.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 4.4 – Gerador Agilent 81134A.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 4.5 – SOA utilizado na montagem.....</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 4.6 – Estrutura interna de um SOA encapsulado.....</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 4.7 – Espectro de ASE com sinal ajustado no comprimento de onda 1530 nm (a) 0 dBm de potência óptica de entrada (b) -10 dBm de potência óptica de entrada.....</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 4.8 – Espectro de ASE com sinal ajustado no comprimento de onda 1550 nm (a) 0 dBm de potência óptica de entrada (b) -10 dBm de potência óptica de entrada.....</i>	<i>49</i>
<i>Fig. 4.9 – Espectro de ASE com sinal ajustado no comprimento de onda 1570 nm (a) 0 dBm de potência óptica de entrada (b) -10 dBm de potência óptica de entrada.....</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 4.10 – Variação da potência óptica de entrada (0 dBm) com uma injeção fixa de corrente um pouco acima do limiar de amplificação (a) 1530 nm (b) 1550 nm (c) 1570 nm.....</i>	<i>52</i>
<i>Fig. 4.11 – Ganho óptico do dispositivo de acordo com a variação de injeção de corrente</i>	

(a) 1525 nm (b) 1550 nm (c) 1575 nm.....	53
Fig. 4.12 – Esquemático de estrutura experimental para chaveamento óptico de pacotes utilizando SOAs.....	54
Fig. 4.13 – Esquemático da montagem experimental proposta.....	55
Fig. 4.14 – Disposição dos equipamentos utilizados na montagem.....	56
Fig. 4.15 – Acoplamento de sinais de microondas a partir de combinadores de RF para obtenção da forma de onda adequada para injeção no dispositivo.....	57
Fig. 4.16 – Bastidor óptico da rede KyaTera.....	58
Fig. 5.1 – Pacotes no nível elétrico obtido na saída do gerador de pacotes com taxa de 10 Gb/s.....	61
Fig. 5.2 – Modelo para injeção de portadores por pulso simples (a) antes de chegar ao dispositivo e (b) a resposta óptica após o processo de chaveamento sofrido no SOA.....	62
Fig. 5.3 – Modelo para injeção de portadores por pulso duplo (a) antes de chegar ao dispositivo e (b) a resposta óptica do SOA após o processo de chaveamento sofrido.....	62
Fig. 5.4 – Modelo para injeção de portadores por pulso triplo (a) antes de chegar ao dispositivo e (b) a resposta óptica do dispositivo após o chaveamento no SOA.....	63
Fig. 5.5 – Resposta óptica após o chaveamento da informação ao utilizar pulso simples para acionamento do circuito eletrônico.....	65
Fig. 5.6 – Resposta óptica do SOA após processo de chaveamento da informação por pulso duplo.....	66
Fig. 5.7 – Resposta óptica do SOA após sofrer chaveamento óptico com níveis de deterioração no bit inicial compreendido na relação 90/10.....	67
Fig. 5.8 – Tempo de subida do bit inicial da informação ou chaveamento considerando-se uma deterioração de 10% do bit.....	67
Fig. 5.9 – Modelo simulado de PISIC idealizado antes de chegar ao dispositivo SOA.....	68
Fig. 5.10 – Interface gráfica do software de simulação Z-SOA.....	69
Fig. 5.11 – Resposta óptica simulada após o chaveamento com PISIC idealizado.....	70

<i>Fig. 5.12 – Chaveamento após tráfego na rede KyaTera.....</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 5.13. Relação entre a latência e o chaveamento óptico com e sem aplicação da técnica PISIC.....</i>	<i>73</i>

1. Introdução

Os sistemas de telecomunicações vêm apresentando um intenso e rápido processo de transformação. Novos serviços, tais como educação a distância, vídeo sob demanda, serviços de multimídia, televisão digital e Internet, estão cada vez mais sendo utilizados, necessitando-se, para o bom funcionamento de tais serviços, de taxas de transmissão de informações cada vez maiores. De fato, o rápido crescimento no tráfego de comunicações gera a necessidade de uma rede que suporte todo o tráfego de um modo eficaz [1-3].

A fibra óptica, com largura de banda de 25 THz, apresenta-se como uma solução para atender às necessidades presentes e futuras de largura de banda. Para um melhor aproveitamento da capacidade da fibra óptica, utiliza-se o sistema de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*wavelength division multiplexing* - WDM), que atinge taxas totais de transmissão da ordem de terabits por segundo, com canais ópticos de 20 a 40 Gb/s [2]. Nesse sistema, cada usuário ou grupo utilizam uma frequência (ou um comprimento de onda) onde, logo após, ocorre a transmissão da informações em uma única fibra.

Na utilização da tecnologia WDM, é interessante que se trabalhe com uma rede totalmente óptica, uma vez que, em redes eletro-ópticas, o desempenho poderia ficar afetado pela transição do domínio elétrico para o óptico e vice-versa, e pela limitação na velocidade devido aos componentes eletrônicos, dificultando o atendimento das necessidades do tráfego de informações [3].

Em particular, em redes ópticas de pacotes, isto é, em redes que possuem processamento da informação à nível de cada pacote trafegado, nota-se ainda a falta desses

elementos de rede capazes de efetuar tais procedimentos a nível óptico, existindo dessa forma apenas protótipos experimentais.

Portanto, a partir dessa deficiência apresenta-se neste trabalho um elemento chaveador de pacotes para redes ópticas, que funciona no domínio óptico e traga melhorias em relação aos experimentos já existentes nesse mesmo âmbito de pesquisa.

A partir de um elemento importante nas redes ópticas atuais, como o amplificador de potência óptica, o amplificador óptico a semicondutor (*semiconductor optical amplifier - SOA*), utiliza-se aqui do processo de amplificação ou atenuação do sinal óptico incidente na sua cavidade, brevemente controlado por um circuito de injeção de portadores, para atuar como um elemento de chaveamento da informação óptica [4].

Bons resultados foram obtidos em ambientes experimentais e algumas boas perspectivas têm-se em função da técnica utilizada para o procedimento de chaveamento óptico de pacotes utilizando SOAs do tipo simples e comerciais. Além disto, muitas são as possibilidades de melhorias e adaptações para uma possível implementação em um projeto de redes ópticas de comutação de pacotes comercialmente viável.

Este trabalho tem como objetivo apresentar, de forma experimental e sistêmica, a aplicabilidade da técnica de pré-injeção de portadores no SOA com a finalidade de melhorias nos tempos de chaveamento obtidos e, conseqüentemente, trazerem ganhos em termos de tempos de processamento e retardo nas redes os quais poderiam ser inseridos.

A partir disto propõem-se novas aplicações em redes de chaveamento fotônico e mostram-se alguns tipos de utilização. Testes são feitos em ambientes experimentais e validados através de simulações computacionais em laboratório.

Para tanto, no Capítulo 2, apresenta-se o estudo teórico das redes ópticas de tráfego de dados, embasando, desta forma, o motivo e as aplicações dos resultados do projeto desenvolvido. São mostrados, também, alguns tipos de flexibilidades das propostas de redes ópticas atuais e protocolos implementados.

A modelagem matemática e uma breve apresentação do funcionamento intrínseco do dispositivo SOA é apresentado no Capítulo 3. Para tanto, esse estudo foi baseado em levantamentos bibliográficos na literatura.

No Capítulo 4 é apresentado todo o processo de montagem experimental e descrição dos equipamentos envolvidos para elaboração do projeto, mostrando suas principais características físicas e funcionais.

O Capítulo 5 traz os resultados obtidos nos experimentos efetuados e confronto com os resultados teóricos esperados através de simulações computacionais. Ainda neste capítulo é mostrado, também, a validação da técnica usada quando comparada as existentes para o processo de chaveamento óptico utilizando SOAs.

As considerações finais sobre este trabalho e os resultados obtidos são comentados no Capítulo 6. Além disto, são apresentadas propostas para trabalhos futuros.

2. Redes Ópticas

As redes de comunicação estão em constante evolução tecnológica, visando sempre à melhoria dos serviços por elas transportados. As redes ópticas, em particular, associada a sua altíssima capacidade, configuram-se em anel ou malha, sendo que, no acesso, elas podem ainda serem configuradas em anel ou estrela. Entretanto, atualmente a topologia em malha tem sido apresentada como a melhor solução para o acesso, pois se caracteriza por ser uma rede mais robusta e resistente à ocorrência de falhas de enlaces, devido ao maior número de caminhos redundantes [2].

Quanto ao seu aspecto tecnológico, os sistemas ópticos são divididos em cinco gerações, sendo que a primeira é a mais simples no nível de avanço tecnológico, e a última engloba toda a pesquisa desenvolvida até o momento. Na primeira geração podem-se destacar os sistemas que trabalhavam na janela de 800 nm com taxas máximas de 45 Mb/s. Já na segunda geração surgem os primeiros sistemas comerciais na janela de 1300 nm com perdas bem menores, na faixa de 0,5 dB/km. Porém, o grande impacto tecnológico veio com a terceira geração, com perdas em torno de 0,2 dB/km, com operação na janela óptica de 1550 nm, possibilidades de transmissão da ordem de 2,5 Gb/s e capacidade a atingir distâncias de 60 a 70 km sem o uso de repetidores [2].

A quarta geração tecnológica nas comunicações ópticas veio com o advento, no ano de 1989, da possibilidade da amplificação óptica do sinal, pois, com a grande diminuição das perdas num enlace, possibilitou o uso dos amplificadores à fibra que antes eram inviáveis sem antes passar por regeneradores eletrônicos. Foi também, nessa geração, o surgimento de sistemas utilizando a técnica de recepções coerentes e a multiplexação por

divisão em comprimento de onda, gerando, assim, os primeiros enlaces intercontinentais com altas taxas de transmissão.

A quinta geração tem como seu grande marco a solução de problemas de dispersão na fibra. Muitas propostas e estudos foram e estão sendo submetidos, como equipamentos compensadores de dispersão e fibras dopadas com elementos de terras raras (érbio, telúrio) como forma de compensadores de dispersão no enlace. Foi, também, nessa geração o surgimento de pesquisas envolvendo a utilização de sistemas de sólitons para transmissões ópticas, pulsos ópticos estreitos que preservam sua integridade ao longo de grandes enlaces [1].

Muitas pesquisas vêm sendo exploradas e estudadas com maiores investimentos por parte de empresas privadas e governos em direção a sistemas totalmente ópticos, desde a sua transmissão, processamento, roteamento, chaveamento e até o recebimento da informação no nó final da rede.

Neste capítulo, apresentam-se os itens mais relevantes da estrutura física e lógica das redes ópticas em malha, em particular, com ênfase no processo de chaveamento óptico de pacotes, com o objetivo de preparar e embasar a proposta do experimento apresentado posteriormente.

2.1. Arquitetura de Redes Ópticas

Muitos modelos de arquiteturas para redes ópticas são propostos, onde se variam os graus de complexidade e necessidade para cada aplicação. Porém, existem elementos indispensáveis em qualquer sistema óptico, como é o caso do dispositivo transmissor, do receptor, do meio pelo qual se trafega a informação e, em casos particulares, dos pontos inteligentes de passagem de dados, os quais podem ser um roteador, uma chave (*switch*) óptica ou um elemento de processamento qualquer, implementado na configuração daquele sistema [5].

Os transmissores ópticos são responsáveis por converter sinais elétricos em sinais ópticos que irão trafegar na fibra. Os transmissores ópticos convencionais modulam a fonte óptica pela sua intensidade. A fonte óptica é um semicondutor, e pode ser de dois tipos:

- LED (*Light-Emitting Diode*) - Realiza a conversão de sinais elétricos em sinais ópticos através do processo de fotogeração por recombinação espontânea. LEDs são utilizados em sistemas de comunicação que exijam taxas de transferência menores do que aproximadamente 100 a 200 Mbit/s [6].
- Diodo LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) - Realiza a conversão de sinais elétricos em sinais ópticos através do processo de geração estimulada de luz [6].

Já os receptores ópticos (ou fotodetectores) são responsáveis pela conversão dos sinais ópticos recebidos da fibra em sinais elétricos. Os fotodetectores devem operar com sucesso nos menores níveis de potência ópticas possíveis, convertendo o sinal com um mínimo de distorção e ruído, a fim de garantir o maior alcance possível. Devido a essas características, os receptores possuem um projeto mais complicado do que o dos transmissores, uma vez que devem fazer decisões sobre quais tipos de dados foram enviados, baseados em uma versão amplificada de um sinal distorcido; posteriormente, nesse estudo, mostra-se o equacionamento que modela esse dispositivo. Os fotodetectores mais utilizados são os fotodiodos, os quais se utilizam de um mecanismo denominado fotoionização. Os dois principais fotodiodos utilizados como fotodetectores são os fotodiodos PIN e APD (*Avalanche PhotoDiode*), que possuem características funcionais diversas, conforme Tab. 2.1 [6].

Outros dispositivos também são utilizados em redes ópticas, como os amplificadores de linha, responsáveis pela amplificação do sinal óptico e o multiplexador óptico (*optical add-drop multiplexer* - OADM). Este último por sua vez, tem dupla função. A primeira é a de permitir a inserção ou retirada de um determinado número de comprimentos de onda, os quais serão regenerados no domínio eletrônico, permitindo assim a comercialização de serviços de telecomunicações nesse ponto da rede. A segunda é a de amplificar o sinal total, ou seja, os comprimentos de onda regenerados, que terão sua relação sinal/ruído corrigida, e os comprimentos de onda passantes, que sofrerão a amplificação tanto do sinal quanto do ruído [4].

Tabela 2.1 Diferenças Funcionais Entre Fotodiodos PIN e APD.

CARACTERÍSTICAS	PIN	APD
Sensibilidade	menor	muito maior
Linearidade	maior	menor
Relação sinal/ruído	pior	melhor
Custo	baixo	alto
Vida Útil	maior	menor
Tempo de resposta	maior	menor
Circuitos de polarização	simples	complexo
Variação de características conforme variação de Temperatura	menor	maior

Além dos amplificadores e dos OADMs pode-se destacar também os equipamentos ópticos de conexão cruzada (*optical cross-connect* - OXC) responsáveis pelo roteamento de comprimentos de onda a nível óptico que permitem a minimização do número de equipamentos nas redes e a diminuição dos pontos de possíveis defeitos, além da otimização do espaço ocupado nas estações.

Por fim, não se pode esquecer de mencionar os transponders e os compensadores de dispersão. O primeiro tem a função de realizar a adequação da frequência do sinal de entrada para um sinal de saída compatível com o plano de frequências padronizado pelas normas G.694.1 e G.694.2 do ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) [3]. O segundo é responsável pela compensação da dispersão cromática de um trecho da rede de fibra óptica do sistema. Mostra-se, na Fig. 2.1, um diagrama esquemático de uma rede óptica interagindo com redes metropolitanas, no domínio eletrônico, com função de interligação de diversos outros serviços de usuários.

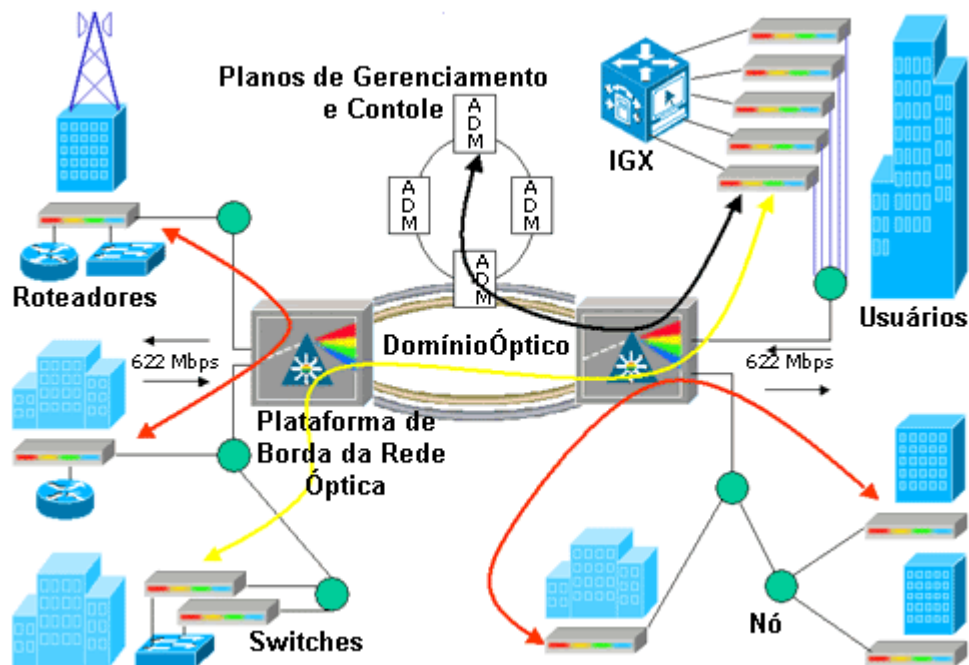


Fig. 2.1. Rede Metropolitana.

Levando em consideração o avanço tecnológico a nível de processamento do sinal, pode-se dividir as redes de transporte digital óptico em três gerações distintas. Na primeira destaca-se o uso da tecnologia T1/E1, utilizando intervalos no tempo (*time slots*) para transmissão, com taxas na ordem de dezenas de Mbit/s e processamento eletrônico (elétrico/elétrico/elétrico) com comprimentos de onda fixo, ainda grande parte da rede de acesso em fios de cobre. Na segunda geração, principalmente, nota-se o advento de redes em malha em sua grande maioria com fibras, processamento ainda eletrônico (óptico/elétrico/óptico). Ainda nessa fase destaca-se o uso de tecnologias como o SONET/SDH, porém ainda com multiplexação por divisão no tempo e comprimentos de onda fixos.

A terceira geração vem caracterizada pela utilização de comprimentos de onda variáveis, com o advento da tecnologia de WDM. É nessa geração que se observa a agregação de tecnologias para transmissão de dados, caracterizando-a com as redes de transporte óptico (*Optical Transport Networks* - OTN). Destaca-se, principalmente nessa geração, a utilização de processamento a níveis ópticos (O/O/O), taxas de transmissão na ordem de Tbit/s e, sobretudo, o melhor tratamento da informação óptica, com a aplicação de níveis de qualidade de serviço (*quality of service* - QoS) e serviços diferenciados (*diff-serv*) nos pacotes trafegados na rede [5].

Atualmente, destaca-se o desenvolvimento de redes que vem atender opticamente o usuário final, utilizando de tecnologias do tipo FTTx (*fiber to the something*), o qual pode ser

chamada de quarta geração, porém, bem mais conhecida como geração de redes de última milha. Essa geração se caracteriza, também, pelo processamento totalmente óptico do sinal e a utilização de grandes quantidades de comprimentos de ondas disponíveis na rede, com o advento da tecnologia UDWDM (*ultra-dense wavelength division multiplexer*) [5].

2.2. Pacotes Ópticos

Pacotes ópticos são conjuntos de dados de informação agrupados em intervalos de tempo distintos que são transmitidos de um nó a outro de uma rede óptica, levando a informação requisitada. É composto pela carga útil, isto é, a informação a ser transmitida (*payload*) e o cabeçalho (*header*), onde este último contém, basicamente, o endereçamento e/ou informações de sinalização e correção de erro [2].

No *payload* não é feito nenhum tipo de processamento, além da codificação exigida devido a níveis de segurança na rede. O processamento é feito apenas a nível de cabeçalho, o que permite uma maior agilidade em todo o processo de transmissão/recepção [3]. Estudos foram feitos utilizando diversas técnicas e protocolos para o processamento do endereçamento, sendo que os mais utilizados nos sistemas ópticos são:

- Multiplexação óptica por divisão de código (OCDM);
- Multiplexação por sub-portadora (SCM);
- Multiplexação óptica por divisão de tempo (OTDM);
- Multiplexação por divisão no tempo e multiplexação por divisão de frequência (TDM/FDM)

2.2.1. OCDM

Trata-se de uma técnica de multiplexação óptica que usa divisão por códigos (OCDM). Nela, a codificação do endereçamento dos pacotes ocorre no nível de bit, onde o endereço de destino do pacote é representado por uma série de bits (*chips*) contidos no cabeçalho do pacote. O código óptico de bit é usualmente gerado com fibras ópticas atuando como linhas de retardo, que determinam o endereço de destino do pacote contendo os bits [7].

2.2.2. SCM

Esta é uma técnica de sinalização fora da banda de informação do *payload*, que envolve a transmissão de um sinal ou canal de controle em uma frequência separada do canal de dados. Toma-se, como exemplos, dois tipos de sinalização fora da banda, com a carga de informação e o cabeçalho do pacote sendo transmitidos em paralelo. No primeiro, o método SCM é usado para codificar a informação e o cabeçalho de endereçamento como bandas laterais de rádio-frequência (RF) da portadora óptica, cada uma com uma banda diferente. A separação das bandas é determinada pelas taxas de dados da informação e do cabeçalho do pacote óptico. No segundo caso, a informação e o cabeçalho dos pacotes são codificados com dois comprimentos de onda distintos [7].

Na transmissão da informação e do cabeçalho em paralelo, a vazão é acrescida desde que o cabeçalho tenha a mesma duração que a informação, o que implica, nestes casos, que a sincronização entre informação e cabeçalho é importante durante o processo de roteamento. Quando a distância entre os nós roteadores é conhecida, uma compensação de atraso pode ser implementada utilizando dois comprimentos de onda para o realinhamento do cabeçalho e da informação. Contudo, a degradação do sinal devido a não-linearidades pode ocorrer, especialmente com o efeito de intermodulação (*crosstalk*), que pode limitar esses sistemas quando o espaçamento entre canais SCM é muito pequeno [7]. Em um sistema com dois comprimentos de onda, o cabeçalho pode ser extraído utilizando-se filtros ópticos passivos; no entanto, duas fontes ópticas sintonizadas devem ser usadas em cada transmissor, sendo que a estabilidade da fonte e do filtro óptico, bem como da dispersão das fibras, são também parâmetros críticos.

2.2.3. OTDM

No método OTDM, como nos outros métodos, os pacotes ópticos são chaveados em cada nó de acordo com o endereço de encaminhamento carregado por cada pacote. Os pacotes ópticos são separados por pulsos que delimitam as fronteiras entre cada pacote. Espera-se que, nas redes OTDM, sejam agregadas vazões da ordem de Tbit/s em um canal com um único comprimento de onda, pelo compartilhamento e processamento de uma grande quantidade de dados simultaneamente [5][7]. A maioria das pesquisas em OTDM

foi voltada para o desenvolvimento de dispositivos ultra-rápidos para a demultiplexação e sincronização do fluxo multiplexado no tempo, assim como de pulsos ultracurtos em altas velocidades. Espera-se, com isso, que o chaveamento óptico de pacotes possa permitir funções de roteamento, como a adição e a remoção de pacotes em uma rede de múltiplos nós. Assim, a função de adicionar é feita pela checagem de um espaço vazio e, a partir daí, insere-se um pacote. A função de remoção de pacotes acontece quando estes chegam ao nó de destino e, como outras funções de roteamento, requerem a demultiplexação da informação contida no cabeçalho dos pacotes.

O processamento óptico pode acontecer muito rapidamente, mas a limitação está nos algoritmos disponíveis que ainda não são muito robustos, envolvendo, em alguns casos, não mais que um bit para a tomada de decisões. Por outro lado, tem havido propostas onde o processamento do cabeçalho dos pacotes pode ser feito no domínio eletrônico. No entanto, nesses casos, o controle de roteamento torna-se muito mais lento em altas taxas de pacotes [8].

2.2.4. FDM/TDM

A multiplexação por divisão de frequência (FDM) é uma técnica que permite o chaveamento óptico de pacotes, além de apresentar uma baixa complexidade de sistema. Isto ocorre pois tanto o cabeçalho de informação como a informação útil do pacote podem ser multiplexados no mesmo comprimento de onda. Neste esquema, a informação é codificada com uma alta taxa de bits na banda-base, enquanto o cabeçalho, numa taxa de bits muito menor, é codificado utilizando um tom com uma baixa frequência de RF. A informação do cabeçalho é extraída pela detecção de uma fração do sinal do pacote e filtrando a frequência RF da subportadora [9-10].

Uma grande vantagem da técnica FDM é a transparência da taxa em que a informação do pacote está comprimida. Além disso, a possibilidade de utilização de tons em baixa frequência permite a identificação do cabeçalho do pacote, podendo cada tom ser entendido como um bit de endereçamento. A possibilidade de uma maior simplicidade de implementação também chama a atenção, pois, desde que o cabeçalho FDM tenha uma baixa taxa de bits (poucos tons), o processamento da informação contida no cabeçalho pode ser feito com circuitos eletrônicos de baixo custo.

Aliada à técnica FDM, pode-se optar por uma multiplexação por divisão no tempo (TDM), em que além da informação de endereçamento, poderiam ser colocados outros bits de informação, como prioridade de tráfego e sinalização para qualidade de serviço (QoS). Neste caso, também se usa um tom de RF a baixa frequência, mas em intervalos (*slots*) de tempo diferentes, inclusive daquele adotado para a informação útil dos pacotes. O união das duas tecnologias TDM/FDM torna o sistema de detecção um pouco mais complexo que aquele onde se utiliza apenas FDM. No entanto, experiências mostraram que o sistema utilizando TDM/FDM mostrou-se mais robusto para detecção do endereço e, desta forma, para o roteamento correto do pacote [9].

2.3. MPLS em Redes Ópticas

Apesar do protocolo IP (*internet protocol*) ter se tornado um padrão a nível de usuário, os *switches* levam grandes vantagens em relação aos roteadores, com isso faz-se necessário na maior parte dos *backbones* IP, inclusive os direcionados a tráfegos de Internet, a implementação de uma rede ATM no seu núcleo [3].

Porém algumas desvantagens foram notadas, por exemplo o mapeamento de pacotes IP num sistema ATM é uma tarefa bastante complexa, por isso esse tópico ainda é material de estudos até os dias atuais. Outra desvantagem é a sobrecarga de tráfego no *backbone*, devido justamente aos roteadores de bordas estarem trabalhando na camada IP, onde esses estão interligados, por circuitos virtuais, a todos *switches* ATM's, assim, gerando um enorme tráfego de informações relacionadas ao roteamento [5].

Para solucionar estes problemas, a empresa Ipsilon apresentou, em 1996, uma arquitetura de rede em que os protocolos de controle do IP se aplicam diretamente no *hardware* do *switch* ATM. Apesar dos pacotes ainda serem encaminhados através da troca de rótulos (*label swapping*), os mecanismos pelos quais se estabeleciam tabelas de encaminhamento e se alocavam recursos passaram a ser todos determinados por protocolos de roteamento do IP. Esta solução ficou conhecida como *IP Switching*.

Logo em seguida, surgiram outros protocolos dentro desta linha de tecnologia, como o *Tag Switching* (Cisco) e o *ARIS* (IBM). O IETF criou então um grupo de trabalho

para padronizar uma solução baseada nestes protocolos e que deu origem ao multiprotocolo de chaveamento por rótulos (*Multiprotocol Label Switching* - MPLS) [1-5].

2.3.1. Multiprotocol Label Switching

O MPLS foi concebido para resolver uma série de problemas das redes IP, entre eles:

- possibilitar a utilização de *switches*, principalmente em backbones de redes IP, sem que se tenha que lidar com a complexidade do mapeamento do IP no ATM. *Switches* são, em geral, mais baratos e apresentam melhor desempenho que roteadores [3].
- escalabilidade.
- adicionar novas funcionalidades ao roteamento.

O MPLS fornece meios para mapear endereços IP em rótulos simples e de comprimento fixo, que podem ser utilizados por diferentes tecnologias de encaminhamento e chaveamento de pacotes. Este mapeamento é feito apenas uma vez no nó na borda da rede MPLS. A partir daí, o encaminhamento dos pacotes é feito utilizando-se a informação contida em um rótulo (*label*) inserido no cabeçalho do pacote. Este rótulo traz a informação de endereçamento que é trocada em cada *switch* ou nó por onde o pacote irá passar.

Destaca-se o chaveamento de dados a altas velocidades utilizando esse tipo de protocolo, que só é possível por que os rótulos são de comprimento fixo e são inseridos no início do pacote. Com isso, a partir de uma tabela pré-conhecida pelo hardware, o roteamento do *payload* se dá de uma forma mais rápida, resultando em um chaveamento bem mais rápido após toda a passagem na rede.

A pesar de ter sido desenvolvido visando redes com camada de rede IP e de enlace ATM, o mecanismo de encaminhamento dos pacotes no MPLS pode ser utilizado para quaisquer outras combinações de protocolos de rede e de enlace, o que explica o nome de multiprotocolo dado pelo grupo de trabalho do IETF.

Uma rede baseada em MPLS possui algumas nomenclaturas para elementos chaves:

- *Label* - é o rótulo identificador do tipo de pacote que está trafegando ou da informação de endereçamento do mesmo, por exemplo, em aplicações ópticas.
- Classe equivalente de encaminhamento (*Forward Equivalence Class* - FEC) - é a representação de um mesmo grupo de pacotes, ao qual se disponibiliza um mesmo tratamento de transporte, facilitando e agilizando o seu encaminhamento.
- Roteador de borda (*Label Edge Router* - LER) - é o roteador que conecta um nó da rede MPLS a um nó fora da rede.
- Roteador de leitura/troca de rótulo (*Label Switching Router* - LSR) - é um roteador de um nó da rede, que tem a função de extração do rótulo e verificação da rota que o pacote deve seguir.
- Protocolo de distribuição de rótulo (*Label Distribution Protocol* - LDP) - é o conjunto de procedimentos seguidos por um LSR para que o mesmo informe à rede a associação de um novo rótulo a um pacote, enquadrando-o em outra FEC.
- Caminho do rótulo (*Label Switching Path* - LSP) - é o caminho pré-estabelecido que o pacote vai percorrer até o próximo nó na rede.

A tecnologia mostrada na Fig. 2.2 vem suprir várias necessidades das redes ópticas, inclusive daquelas de próxima geração, as quais se baseiam em comutação de pacotes. Esta funcionalidade possibilita, assim, a utilização da tecnologia de protocolos IP/MPLS diretamente sobre redes WDM, desprezando a utilização da pilha de protocolos que se tinha anteriormente [11].

A partir daí surgiram outras propostas para a utilização desse protocolo em redes ópticas de pacotes, gerando, assim, uma generalização do MPLS. Neste contexto, surgiu o multiprotocolo de chaveamento por rótulo generalizado (*Generalized Multiprotocol Label Switching* - GMPLS), que, agora, leva em consideração certas tecnologias que o MPLS não provia suporte, como as comutações por comprimento de onda, por divisão no tempo e por divisão no espaço [11].

Estudos ainda são conduzidos com o objetivo de se melhorar o nível e agilidade do processamento nos nós ópticos, a fim de descobrir formas totalmente ópticas para tal. Esta proposta é diferente daquelas das redes atuais, onde, por exemplo, o endereçamento do pacote ou rótulo é levado para nível elétrico, para reconhecimento e processamento, e, depois, retornado ao nível óptico antes de prosseguir na rede com a carga útil.

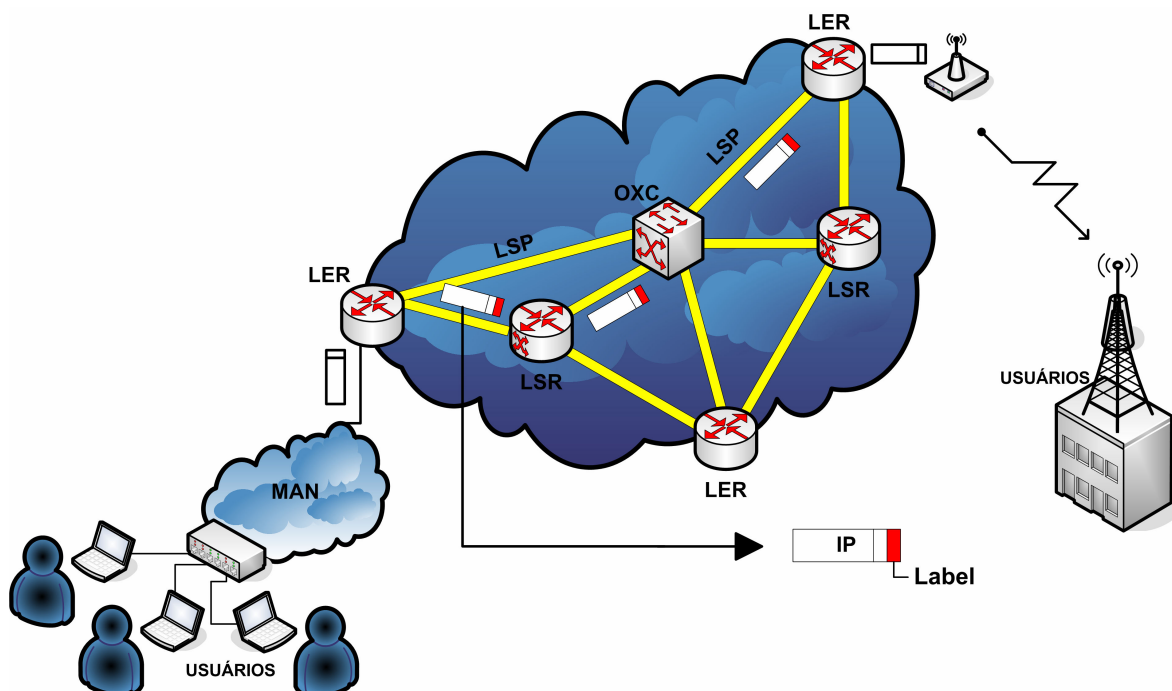


Fig. 2.2. Redes de Pacotes IP/MPLS.

Surgem, então, novas propostas na criação dos cabeçalhos de endereços da informação para possibilitar que os elementos da rede óptica consigam detectar a rota daquele pacote e encaminhá-los a seus destinos, sem retorno a níveis elétricos, diminuindo assim drasticamente a latência da rede em todos os seus parâmetros. Com isto, aparece o multiprotocolo de chaveamento de comprimento de onda generalizado (*Generalized Multiprotocol Lambda Switching* - GMP λ S), uma proposta de detecção da informação de roteamento baseada no comprimento de onda daquele rótulo, associado previamente a uma tabela de rotas conhecidas naquele nó [11].

2.4. Chaveamento Óptico (OPS x OBS)

Em particular, as tecnologias de chaveamento de pacotes ópticos (*optical packet switching* – OPS) e de rajadas de pacotes (*optical burst switching* - OBS) podem oferecer uma maior flexibilidade, funcionalidade e granularidade às redes ópticas. Os estudos e pesquisas envolvendo essas tecnologias têm ganhado importância para as redes ópticas atuais e futuras, tendo em vista que o tráfego nas diversas redes impõe demandas cada vez

maiores, pelo aumento de usuários e/ou pelos serviços da Internet, que necessitam de maior disponibilidade de banda e agilidade de provimento [7][8].

O grande impacto provocado por essas novas tecnologias é a falta da necessidade de alocação de recursos exclusivos, pré-estabelecidos, como comprimento de onda e caminho óptico, para cada uma das conexões entre nós ou fim-a-fim, como acontecia nas redes de chaveamento por circuito (*optcal circuit switching* – OCS). Isto também implica numa melhoria no nível de segurança da rede, já que se pode responder muito mais rápido a uma queda num nó ou enlace óptico, pois a reserva de recursos é dinâmica, acontecendo em cada nó [11].

O OPS e o OBS diferem, basicamente, pelos seus respectivos planos de controle e tamanho de pacote (no caso OPS) e das rajadas (no caso OBS). No caso OPS, cada pacote carrega as informações de endereçamento num cabeçalho que é multiplexado juntamente com o *payload* dentro da banda. Assim, cada pacote tem seu endereço resolvido em cada nó e se comporta de maneira independente, em termos de escolhas de caminhos na rede, mesmo pertencendo à mesma aplicação. Devido ao fato do cabeçalho de roteamento sempre estar presente e multiplexado junto à informação útil, os nós de rede devem ser providos de recursos de retardo (*bufferização*) óptico para permitir o processamento eletrônico do cabeçalho sem a perda de informações. Os pacotes podem ter tamanho fixo ou variável, sendo que no caso variável cada um dos pacotes tem um tamanho entre 100 e 1500 *bytes*, seguindo uma distribuição de *Poisson* com média de 500 *bytes*. Muitas pesquisas são feitas nessa área de processamento óptico em redes de pacotes, tanto envolvendo chaveamento, como conversões, regenerações. Neste trabalho propõe-se uma técnica para redução no tempo de chaveamento em redes de pacotes ópticos, apresentada nos capítulos posteriores.

Já para o OBS, os pacotes são agregados em grandes rajadas (*bursts*), que podem chegar a algumas dezenas de *kilo bytes*, antes que sejam transmitidos pela rede, como é mostrado na Fig. 2.3. Cada rajada é precedida por um pacote de controle, o qual é transmitido antes para requisitar recursos e definir a rota da rajada.

Assim, dois tipos de OBS são definidos quanto à resposta da rede a este pacote de controle. O primeiro não necessita da resposta da rede e a rajada é transmitida logo após o envio do pacote de controle, com um tempo de guarda suficiente para a definição das rotas. No outro caso, a rajada só é transmitida a partir do momento que houver uma resposta do

nó de destino de que todos os recursos estão alocados. Esse último caso é um pouco mais complexo, mas garante o sucesso da transmissão da rajada, pois caso não seja possível a transmissão desta pela falta de recursos de rede, não terá início o processo de transmissão. Isso poderia gerar inconvenientes em redes com enlaces unidirecionais, como é o caso daquelas com topologias em malha otimizada, se os pacotes de controle utilizassem os mesmos recursos da rede [12].

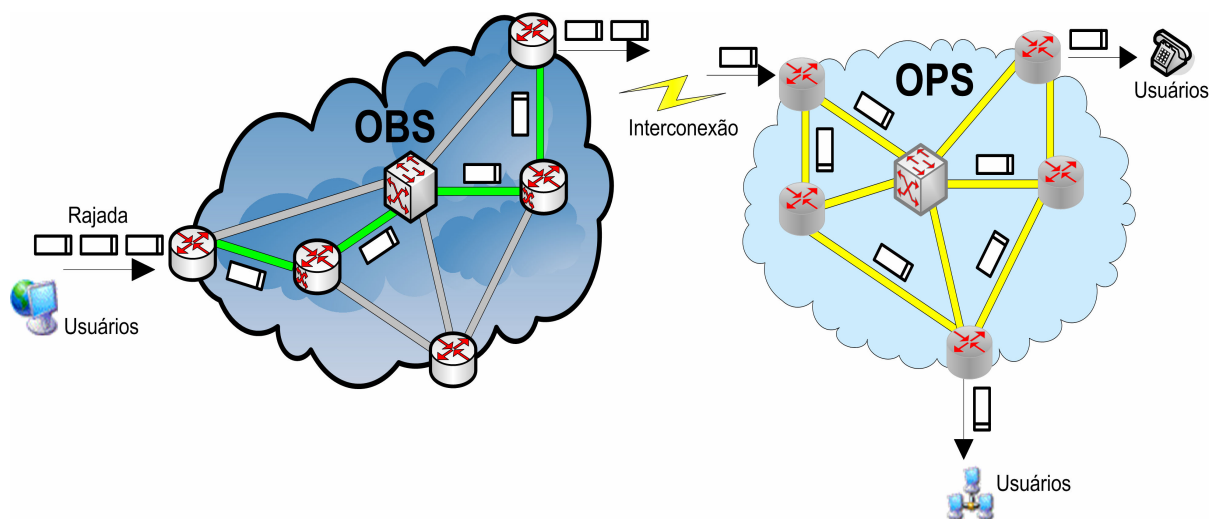


Fig. 2.3. Exemplo de redes OBS e OPS.

No entanto, este problema é contornado a partir da adoção de um canal de controle exclusivo para a alocação de recursos, que é utilizado, na prática, para este tipo de situação. Como a rajada só é enviada a partir do momento que todos os recursos estão alocados, não há a necessidade de *bufferização* ao longo do caminho e sim uma necessidade maior de um menor tempo entre as rajadas, gerando uma maior vazão da rede e possibilitando a diminuição da latência das redes atuais [12].

2.5. Tráfego de Pacotes Ópticos

A condição para análise do tráfego de pacotes ópticos no estudo foi baseada de acordo com os tamanhos de pacotes idênticos, porém, com dois tipos de intervalos de tempo entre eles, constantes e variáveis. Mostra-se, na Fig. 2.4, o diagrama dos tempos e

tamanho dos pacotes, que caracterizam assim os tipos de tráfegos, baseados na duração do pacote, T_p , no intervalo de tempo entre eles, t_i e no tempo de duração do bit t_b .

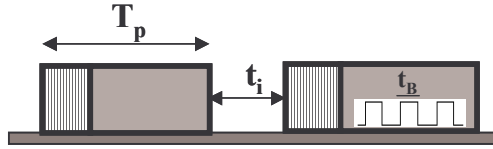


Fig. 2.4. Caracterização do tipo de tráfego.

2.5.1. Tráfego com intervalo constante (PCIC)

Nesse tipo de tráfego, os intervalos entre pacotes consecutivos são constantes, caracterizados pelos tempos de transmissão e o tamanhos fixos. Como comentado anteriormente, os tempos T_p , t_b e t_i irão caracterizar os tipos de tráfegos, representando assim, o tempo de duração do pacote, o tempo de duração de cada bit que constitui a carga útil do pacote, e o intervalo entre os pacotes transmitidos sucessivamente, respectivamente. A Fig. 2.5 mostra o comportamento do tráfego PCIC.

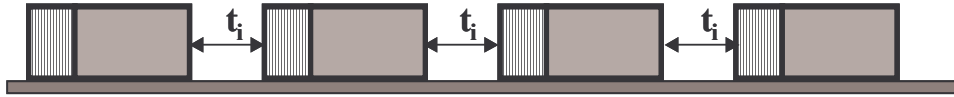


Fig. 2.5. Pacotes com intervalos de tempos constantes.

2.5.2. Tráfego com intervalo variável (PCIV)

No tráfego PCIV, os pacotes gerados possuem tamanhos constantes, mas o intervalo de transmissão entre cada pacote consecutivo é variável. O intervalo foi tratado como uma variável aleatória, distribuída uniformemente no intervalo de $(0, t_{\max})$. A distribuição é calculada em função do máximo intervalo entre os pacotes ($t_{\max}$) que, por sua vez, é calculado a partir da taxa de bits da fonte de tráfego R (bits/s), do tamanho do pacote P (bits) e da largura de banda do enlace S (bits/s), por meio da Eq. 2.1 [2].

$$t_{\max} = \frac{P}{R} - \frac{P}{S} \quad (2.1)$$

O intervalo efetivo entre cada pacote gerado, segundo a natureza de tráfego PCIV, é então dado por:

$$t = t_{\max} \cdot \text{Uniform}[0,1] \quad (2.2)$$

na qual $\text{Uniform}[0,1]$ é um valor entre 0 e 1 obtido através de uma distribuição uniforme.

A Fig. 2.6 mostra como se comporta o tráfego PCIV levando em consideração os intervalos de tempos entre os pacotes transmitidos.

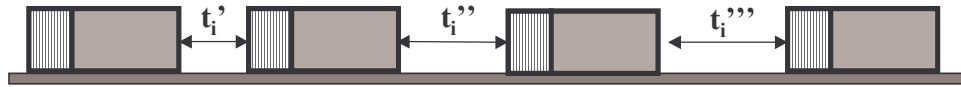


Fig. 2.6. Pacotes com intervalos de tempos variáveis.

2.5.3. Modelagem de Poisson do tráfego de chegada

O modelo de tráfego tratado pela distribuição Poissoniana tem sido exhaustivamente utilizado em transmissões de dados em telecomunicações, sendo também o mais aplicável no caso analisado [4].

O processo de Poisson de chegada de dados pode ser definido por dois sub-processos; o processo de contagem e um processo de tempo entre as chegadas de dados [4]. No caso do processo de contagem, a distribuição discreta da probabilidade para k mensagens (pacotes) chegando num período de tempo Δt é dada por:

$$P_{\text{poisson}} \{N = k\} = P_{\text{poisson}}(\theta, \Delta t, k) = \frac{(\theta \Delta t)^k}{k!} e^{-\theta \Delta t} \quad (2.3)$$

na qual θ representa a taxa média de chegada de pacotes.

Considerando-se o processo entre as chegadas de pacotes com o tráfego PCIV, a função de distribuição da probabilidade contínua com seus respectivos n intervalos de tempo de chegada $T_{A, n}$ será uma distribuição exponencial negativa, que pode ser escrita como:

$$P_{poisson}\{T_{A,n} \leq \tau\} = P_{poisson}(\theta, \tau) = 1 - e^{-\theta\tau} \quad (2.4)$$

Naturalmente, ambos os processos de modelagem de tráfego de Poisson não são, por sua vez, relacionados a propriedades de memória. Por isso, nota-se que o parâmetro principal de Poisson é a taxa média de chegada θ .

2.5.4. Distribuição do Tráfego

Em adição ao modelo de processo de Poisson de tráfego de chegada, tem-se, também, que a distribuição de tráfego (fluxo de tráfego) é importante para a caracterização global do tráfego da rede. Somente em casos ideais, é que temos o tráfego total da rede igual (correlacionado) ao tráfego de um nó. Nesses casos, chama-se de tráfego uniforme ou balanceado. Isso mostra que todos os nós devem atuar como um nó de transmissão e/ou como um nó de destino (recepção), com probabilidades iguais para tal, excluindo-se o caso de envio para si mesmo. Desta forma, tem-se que:

$$P_{T,n} = P_{R,n} = \frac{1}{M-1} \quad (2.5)$$

sendo que $P_{T,n}$ e $P_{R,n}$ representam a probabilidade de um nó transmitir ou receber a informação, respectivamente, e M é a média de atuação do nó (transmissor / receptor).

Em casos mais realísticos, nota-se, com maior frequência, a probabilidade de certos nós das redes apresentarem características mais acentuadas de transmissão ou recepção que outros, gerando, assim, uma distribuição de tráfego assimétrica, comumente chamada de tráfego não-uniforme ou desbalanceado [13].

Com isso tornam-se relevante, também, os instantes de chegada de tráfego, o parâmetro que relaciona o tráfego gerado em cada nó de transmissão e recepção e, por fim, o tamanho da informação ou pacote que está sendo transmitido e analisado.

A partir daí faz-se um estudo no processo de armazenamento ou bufferização em redes ópticas, pois através da implementação desse processo se chega a tempos ideais entre pacotes e/ou os intervalos necessários para o tráfego que será exigido na rede.

2.6. Tráfego de Pacotes Ópticos

Os armazenadores (*buffers*) ópticos são também utilizados para sincronização e controle de fluxo e podem ser colocados em diversas partes do nó de roteamento, como nas portas de entrada, nas portas de saída ou compartilhados entre as portas de entrada e as portas de saída. A Fig. 2.7 e a Tabela 2.2, a seguir, mostram um esboço de um armazenamento de pacotes ópticos em uma chave por meio de linhas de retardo feitas de fibras ópticas. O emprego de pacotes de mesma duração pode significar uma simplificação considerável no processo de armazenamento, assim como no processo de sincronização e roteamento.

Tabela 2.2. Estimativa do tempo de duração dos pacotes relacionados à taxa [6].

Tipo de Pacote	Tamanho dos Pacotes (bytes)	Tamanho dos Pacotes (bits)	Taxa de Compressão 2,5 Gb/s		Taxa de Compressão 40 Gb/s	
			Tempo (ns)	Tamanho da Linha (m)	Tempo (ns)	Tamanho da Linha (m)
Datagrama IP	< 65535	< 524280	209712	41942,40	13107	2621,40
Quadro Ethernet	< 1526	< 12208	4883,2	976,64	305,2	61,04
Célula ATM	53	424	169,6	33,92	10,6	2,12

O tempo de armazenamento de um pacote é dado pela duração de um pacote se propagando através do comprimento de uma fibra óptica. A Tabela 2.2 mostra, para fins de exemplificação, o comprimento da fibra óptica de retardo necessária para armazenar alguns tipos de pacotes em determinadas taxas de compressão de *bits*.

A Fig. 2.7 mostra, esquematicamente, um armazenador com circulação de informação. Esse armazenador consiste em múltiplas fibras de retardo, de comprimentos distintos, podendo suportar pacotes de tamanhos distintos. O tempo de armazenamento, neste caso, é dado pelo número de sucessivas circulações vezes a duração do pacote. A maioria dos armazenadores ópticos pode guardar múltiplos pacotes, com a limitação de que, em cada momento, apenas um pacote pode entrar ou sair do armazenador.

O armazenador de circulação apresenta uma maior flexibilidade, fazendo com que o tempo de retenção do pacote possa ser ajustado pela mudança do número de circulações, oferecendo, adicionalmente, a capacidade de acesso aleatório com um tempo de

armazenamento que depende do número de circulações [4]. Em geral, para o armazenamento óptico, o sinal deve ser amplificado durante cada circulação, de forma a compensar a perda de potência nas fibras, o que resulta em acúmulo de ruído de emissão espontânea amplificada (ASE) e limita, deste modo, o máximo tempo de armazenamento.

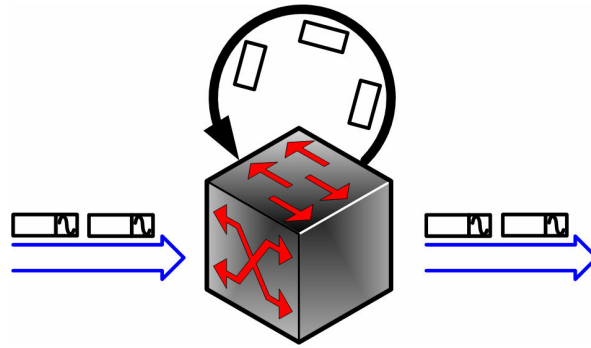


Fig. 2.7. *Buffer* óptico por circulação.

Recentemente surgiram propostas de diferentes arquiteturas para o chaveamento óptico de pacotes, sendo algumas demonstradas experimentalmente [14]. As funções de roteamento, tais como endereçamento, chaveamento e armazenamento, são, em sua grande maioria, executadas no domínio eletrônico. Porém, estudos e pesquisas estão sendo feitos visando uma melhoria nesse processo, bem como a utilização do domínio totalmente óptico.

3. Amplificador Óptico a Semicondutor

Apresenta-se, neste capítulo, um estudo sobre amplificadores ópticos a semicondutor, mostrando os processos de ganho, análises estática e dinâmica, efeitos não-lineares e, principalmente, a aplicabilidade deste como dispositivo para chaveamento fotônico em redes de próxima geração (*next generation networks* - NGN).

Os amplificadores ópticos subdividem-se em dois grandes grupos; os amplificadores ópticos a semicondutor e os amplificadores à fibra. Historicamente, os SOAs advêm dos lasers a semicondutor, que funcionam como amplificadores antes de chegar ao seu limiar de operação. Com isso, os primeiros amplificadores ópticos a semicondutor foram, justamente, lasers polarizados logo abaixo do limiar de operação, do mesmo modo do funcionamento do LED [14].

Em sistemas de comunicações ópticas, os sinais ópticos são atenuados ao longo de sua transmissão pelas fibras e pelos dispositivos da rede óptica. Após certa distância ou certo nível de perda, a atenuação começa a ser prejudicial ao sistema, pois leva à perda de informação devido à má detecção nos dispositivos que irão processar as informações. Antes do advento dos amplificadores ópticos, sistemas com regeneradores eram implementados para solucionar tais problemas.

Contudo, os amplificadores ópticos oferecem vantagens em relação aos regeneradores, que são limitados, por exemplo, em relação a determinadas taxas de bits e formatos de modulação. Isto acontece, pois a atuação dos regeneradores exigia a conversão do sinal para o domínio elétrico. Em outras palavras tinha-se que converter o sinal óptico para elétrico, fazer todo o seu processamento de recuperação de amplitude e formato dos

bits de informação, reconverter o sinal resultante para domínio óptico e, só assim, retransmiti-lo ao próximo nó da rede. Já os amplificadores ópticos trabalham no próprio domínio óptico, sendo insensíveis às taxas de transmissão e ao formato do sinal. Além disto, apresentam uma ampla largura de banda para o ganho, permitindo que um único amplificador amplifique vários sinais de comprimento de onda diferentes, indispensáveis em redes WDM, desde que o espaçamento espectral entre os canais esteja dentro do limite para que não ocorram interferências. Por outro lado, com os regeneradores, seria necessário um dispositivo para cada canal óptico da rede.

Em particular, os SOAs são construídos a partir de uma cavidade laser de duas maneiras distintas. A primeira é através da operação dessa cavidade abaixo do limiar de oscilação, formando uma cavidade ressonante do tipo Fabry-Perot (FP-SOA). Isto acontece, pois as facetas laterais que agem como espelhos reflexivos paralelos, semelhante as que acontecem num interferômetro de Fabry-Perot. Como resultado, há a amplificação do sinal devido às diversas passagens pela cavidade do SOA. Já a segunda forma é justamente obtida através do recobrimento das facetas com um material anti-reflexivo, reduzindo drasticamente a realimentação da cavidade e formando, com isso, o chamado TW-SOA (*traveling-wave* – SOA) [15-20].

Um SOA obtém ganho através de transições entre suas bandas de energia, denominadas banda de condução e valência. A diferença de energias entre estas duas bandas é denominada de energia de *bandgap*. Em um semiconductor, três processos de transição entre bandas podem ocorrer, assumindo-se um sistema simples de dois níveis de energia: absorção, emissão espontânea e emissão estimulada. A absorção ocorre quando o fóton incidente na região ativa é absorvido por um elétron da banda de valência, passando para a banda de condução. Esse processo somente é observado se o fóton incidente possuir energia igual ou superior à energia de *bandgap* [18].

Já no processo de emissão espontânea, elétrons da banda de condução se recombinam com lacunas da banda de valência, dando origem a fótons de direção, e fase aleatórias. Esses fótons percorrem a cavidade e geram um tipo de ruído, chamado de ruído de emissão espontânea amplificada (ASE), o qual é adicionado ao sinal na passagem pelo amplificador.

Na emissão estimulada, conforme ilustrado na Fig. 3.1, a presença de fótons próximos a elétrons excitados da banda de condução estimulam a recombinação destes com

lacunas da banda de valência. Nesse processo, os novos fótons são gerados com a mesma energia, fase, direção e polarização dos fótons que provocaram o processo. A ocorrência da emissão estimulada em SOAs está vinculada a um bombeio elétrico de portadores através da corrente de polarização do dispositivo. À medida que a corrente injetada vai aumentando, o fenômeno de emissão estimulada cresce. Com isto, a potência óptica do sinal sob amplificação aumenta de forma a compensar, na saída do SOA, a soma da absorção e perdas. Neste caso o SOA se comporta como um amplificador de ganho unitário (condição de transparência) [17-19]. O aumento da corrente injetada faz com que a emissão estimulada sobreponha os efeitos de absorção, emissão espontânea e perdas intrínsecas, levando à condição de inversão de população e, portanto, possibilitando ganho ao dispositivo. A amplificação óptica é alcançada neste processo onde há, predominantemente, a emissão estimulada entre dois níveis de energia em que se mantêm a inversão de população.

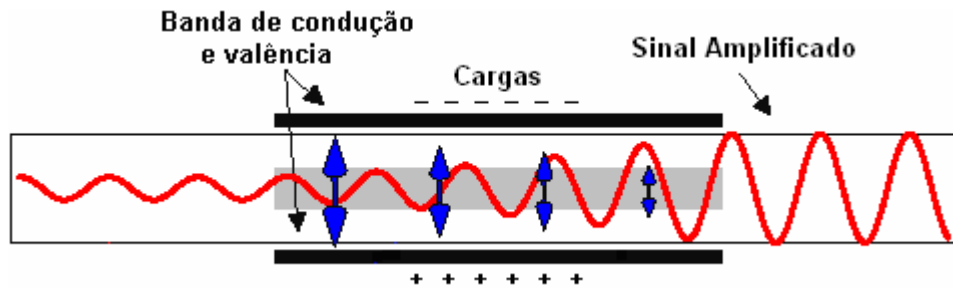


Fig. 3.1. Emissão estimulada dentro de um SOA.

A estrutura dos amplificadores ópticos a semicondutor, como o seu próprio nome diz, é composta por elementos semicondutores formando hetero-estruturas, tais como o GaAs/AlGaAs, o InP/InGaAs, o InP/InGaAsP e o InP/InAlGaAs. Seu tamanho é pequeno se comparado ao de outros amplificadores, ficando em torno de 1 mm, porém é capaz de gerar ganhos acima de 30 dB. Os SOAs apresentam, também, a partir de certos valores de corrente de polarização alguns efeitos não-lineares. De fato, estes efeitos têm estimulado a pesquisa deste dispositivo devido à possibilidade de sua aplicação no processamento de sinais ópticos [21]. Dentre eles destacam-se o chaveamento totalmente óptico e a conversão óptica de comprimentos de onda, os quais são analisados posteriormente neste capítulo.

3.1. Análise do Ganho no SOA

Nesta sessão apresenta-se o equacionamento que modela o funcionamento do SOA. Para efeito de análise inicial, começa-se o estudo a partir de como é gerado o ganho no dispositivo, mostrado em (3.1) [15-16]:

$$g(N) = a(N - N_0) \quad (3.1)$$

na qual g é o ganho por unidade de comprimento do material utilizado na cavidade do amplificador, N é a densidade de portadores por unidade de volume, o N_0 é a densidade de portadores na transparência (ganho igual às perdas) e $a = dg / dN$ é o ganho diferencial. É importante salientar que g é também uma função da frequência óptica e, geralmente, não depende apenas da frequência, mas também da densidade de portadores N , a qual depende da intensidade de luz e de z , que é a posição ao longo da cavidade. Se α_{int} é a perda interna por unidade de comprimento, então a diferença entre o ganho por unidade de comprimento e a perda é dada por [15-20]:

$$\Gamma g - \alpha_{int} \quad (3.2)$$

sendo que o fator de confinamento Γ representa a fração transversal da concentração de luz fluindo pela região ativa da cavidade. Com um incremento no comprimento igual a dz , pode-se representar o aumento da potência da luz como:

$$dP(z) = (\Gamma g - \alpha_{int})P(z)dz \quad (3.3)$$

Desta forma, pode-se representar o crescimento da intensidade de luz dentro da região ativa a partir de:

$$\int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dP(z)}{P(z)} = \int_0^L (\Gamma g - \alpha_{int}) dz = (\Gamma g - \alpha_{int})L \quad (3.4)$$

E o ganho é obtido por:

$$G_S = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp[(\Gamma g - \alpha_{int})L] \quad (3.5)$$

É importante notar que o ganho obtido em (3.5) considera que g não varia com z . Nas seções seguintes, apresenta-se um modelo matemático um pouco mais detalhado para caracterização do ganho no dispositivo.

3.1.1. Análise Estática do Ganho

Assumindo-se um meio semiconductor com níveis de energia de bandas simplificado para dois níveis homogeneamente distribuídos, o coeficiente de ganho longitudinal deste meio é definido como [15-17]:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T^2 + \frac{P}{P_{Sat}}} \quad (3.6)$$

o qual g é o coeficiente de ganho longitudinal, no sentido da propagação, g_0 é o ganho de pico do amplificador, determinado pela corrente, ω_0 é a frequência angular de transição atômica do material da região ativa, ω é a frequência angular óptica do sinal incidente, P é a potência óptica do sinal incidente, P_{Sat} é a potência óptica de saturação, T é o tempo de relaxação do dipolo.

A partir da Eq. (3.6) podem-se analisar importantes características dos amplificadores ópticos, como largura de banda, fator de amplificação e potência de saturação de saída. A princípio, considerar-se-á o amplificador óptico fora da região de saturação, isto é, $P/P_{sat} \ll 1$. Dessa forma o termo P/P_{sat} pode ser desprezado e o coeficiente de ganho pode ser reescrito como:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T^2} \quad (3.7)$$

Essa equação demonstra que quando a frequência incidente, ω , coincide com a frequência atômica de transição, ω_0 , ocorre o ganho máximo. Para um espectro lorentziano, a largura de banda do ganho é dada por $\Delta\omega_g = 2/T_2$ ou por:

$$\Delta f_s = \frac{\Delta\omega_g}{2\pi} = \frac{1}{\pi T_2} \quad (3.8)$$

Um conceito chamado de largura de banda de amplificação é geralmente utilizado no lugar de largura de banda do ganho. Neste novo conceito define-se o ganho de amplificação G_s , também conhecido como fator de amplificação, como:

$$G_s = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.9)$$

sendo que P_{out} é a potência de saída do amplificador e P_{in} é a potência de entrada do amplificador. Pode-se obter uma expressão para G_s admitindo-se que:

$$\frac{dP}{dz} = gP \quad (3.10)$$

onde $P(z)$ é a potência óptica na distância z da entrada. Integrando e utilizando a condição inicial que $P(0) = P_{in}$, observa-se que a potência cresce exponencialmente. Desta maneira:

$$P(z) = P_{in} \exp(gz) \quad (3.11)$$

Da mesma forma $P(L) = P_{out}$ e usando a Eq. (3.9), o fator de amplificação para um amplificador de comprimento L é dado por:

$$G_s(\omega) = \exp[g(\omega)L] \quad (3.12)$$

Esta equação já havia sido mencionada anteriormente (Eq. (3.5)), mas foi obtida a partir de equações diferentes. Desta equação percebe-se a dependência de G_s e g com a frequência. Tanto G_s como g apresentam seus máximos quando $\omega = \omega_0$ e decrescem com aumento da diferença $\omega - \omega_0$. Contudo $G_s(\omega)$, decresce mais rapidamente que $g(\omega)$ por causa da dependência exponencial de G_s com g [15-17].

Agora, para o caso no qual o amplificador opera em saturação, ou seja, quando P é comparável à P_{sat} e, trabalhando-se com a frequência angular óptica bem próxima da frequência angular de transição atômica ($\omega = \omega_0$), obtém-se:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{g_0 P}{1 + \frac{P}{P_{sat}}} \quad (3.13)$$

Como a potência dentro da cavidade P varia ao longo de z , no sentido de propagação dentro da cavidade, e que o coeficiente de ganho g varia com a potência, conclui-se que g é também função de z . Neste caso, a variação da potência ao longo do amplificador pode ser escrita assim:

$$\frac{\partial P(z)}{\partial z} = [g(P, z) - \alpha_{int}]P(z) \quad (3.14)$$

onde α_{int} é o coeficiente de perdas internas devido às perdas por espalhamento, difração e absorção no interior do dispositivo. Assim, a Eq. (3.14) pode ser escrita na forma diferencial de potência, como segue:

$$\frac{dP(z)}{P(z)} = [g(z) - \alpha_{int}]dz \quad (3.15)$$

Integrando a Eq. (3.15) em todo o comprimento da região ativa L , a expressão para a potência fica:

$$P(L) = P(0) \exp \left[\int_0^L g(z) dz - L \alpha_{\text{int}} \right] \quad (3.16)$$

3.1.2. Análise Dinâmica do Ganho

A teoria de propagação de pulsos considera o amplificador óptico como um sistema de dois níveis, banda de valência e banda de condução, sem interação entre si e com energias de transição estendendo-se sobre todo o intervalo das duas bandas. Consideráveis simplificações podem ser feitas assumindo-se a largura dos pulsos como sendo muito maior que o tempo de relaxação intrabandas [15-17]. Nesta aproximação, a relação entre o vetor campo elétrico $\vec{E}$ e a densidade de portadores N pode ser descrita por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \nabla^2 N + \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_e} - \frac{a(N - N_0)}{h\omega_0} |\vec{E}| \quad (3.17)$$

onde N é a densidade de portadores elétricos, D é o coeficiente de difusão, I é a corrente de polarização, q é a carga do elétron, V é o volume da região ativa, τ_e é o tempo de vida dos portadores para transição espontânea entre os níveis, $h\omega_0$ é o energia do fóton, a é o coeficiente de ganho da seção transversal, N_0 é a densidade de portadores na transparência.

A propagação do campo eletromagnético no interior do amplificador é dada pela equação de onda:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\epsilon_r}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.18)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e ϵ_r é a permissividade relativa, onde ϵ é dada pela seguinte equação:

$$\epsilon_r = n_b^2 + \chi \quad (3.19)$$

sendo que n_b o índice de refração de fundo. A susceptibilidade, χ , é função da densidade de portadores e representa a contribuição da carga do portador dentro da região ativa. A relação entre χ e N (densidade de portadores) depende de detalhes da estrutura de banda. De uma forma simplificada, esta é assumida como uma função linear de N [17]:

$$\chi(N) = -\frac{\bar{n}c}{\omega}(\alpha_{lin} + j)a(N - N_0) \quad (3.20)$$

o qual α_{lin} é o fator de alargamento de linha, ω é a frequência angular do sinal óptico e $\bar{n}$ é o índice de refração efetivo.

Considerando um TW-SOA ideal e assumindo que as dimensões da região ativa são tais que apenas um modo de propagação é suportado pelo amplificador e que o sinal de entrada é linearmente polarizado durante a propagação, pode-se escrever o campo elétrico dentro do amplificador como:

$$E(x, y, z, t) = \hat{x} \frac{1}{2} \{ F(x, y) A(z, t) \exp[j(k_0 z - \omega_0 t)] + c.c \} \quad (3.21)$$

onde $\hat{x}$ é o vetor unitário de polarização, $F(x, y)$ é a distribuição modal no guia de onda, k_0 é o número de ondas do modo, $A(z, t)$ é a envoltória associada ao pulso (de variação temporal lenta). A expressão de k_0 é dada por:

$$k_0 = \frac{n_{ef}\omega_0}{c} \quad (3.22)$$

Substituindo-se (3.21) em (3.18), desprezando-se as derivadas segundas de $A(z, t)$ com relação a z e a t e integrando-se ao longo das dimensões transversais, tem-se:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + (n_b^2 - n_{ef}^2) \frac{\omega_0^2}{c^2} F = 0 \quad (3.23)$$

$$\frac{\delta A}{\delta z} + \frac{1}{v_g} \frac{\delta A}{\delta t} = \frac{j\omega_0 \Gamma}{2\bar{n}} \chi A - \frac{1}{2} \alpha_{\text{int}} A \quad (3.24)$$

seja v_g é a velocidade de grupo, n_g é o índice de refração de grupo α_{int} é o coeficiente de perdas internas e Γ é o fator de confinamento, dados por:

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad (3.25)$$

$$n_g = \bar{n} + \omega_0 \frac{\delta \bar{n}}{\delta \omega} \quad (3.26)$$

$$\Gamma = \frac{\int_0^w \int_0^d |F(x, y)|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int |F(x, y)|^2 dx dy} \quad (3.27)$$

sendo w a largura e d a espessura da região ativa. A solução de (3.23) fornece a distribuição transversal $F(x, y)$ e o índice de modo efetivo $\bar{n}$. Em (3.24) mostra-se o comportamento da amplitude do pulso ao longo do comprimento do amplificador. Os efeitos transversais são incluídos pelo fator de confinamento Γ .

A equação (3.17) pode ser simplificada pelo fato da largura w e da espessura d da região ativa serem, geralmente, menores que o comprimento de difusão, enquanto que o comprimento do amplificador é maior. Levando-se em consideração que a distribuição transversal da densidade de portadores N é aproximadamente uniforme, pode-se usar um valor médio como uma boa aproximação e desconsiderar a perda de portadores por difusão. Assim, tem-se que [15]:

$$\frac{\delta N}{\delta t} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{a(N - N_0)}{h\omega_0} |A|^2 \quad (3.28)$$

e o ganho é definido por:

$$g(N) = \Gamma a(N - N_0) \quad (3.29)$$

Na Eq. (3.29) não foi levado em em conta o consumo de portadores devido à amplificação dos fótons emitidos espontaneamente (ASE) e desprezou-se, também, o termo de difusão de portadores. Assumindo o ganho como uma função linear de N pode-se obter a equação de taxa para o ganho:

$$\frac{\delta g}{\delta t} = \frac{g_0 - g}{\tau_c} - \frac{g |\bar{A}|^2}{E_{sat}} \quad (3.30)$$

seja E_{sat} é a energia de saturação do amplificador, dada por:

$$E_{sat} = \frac{hf_0 wd}{a\Gamma} \quad (3.31)$$

onde f_0 é a frequência de transição atômica. O ganho para pequenos sinais g_0 é dado por:

$$g_0 = \Gamma a N_0 \left\{ \left(\frac{I \tau_c}{q N_0 V} \right) - 1 \right\} \quad (3.32)$$

A propagação do pulso no amplificador é representada por (3.24) e (3.30). Elas podem ser simplificadas utilizando um sistema de referência que se movimenta em relação ao amplificador com velocidade igual à velocidade do pulso. Deste modo pode-se escrever que:

$$\tau = t - \frac{z}{v_g} \quad (3.33)$$

Separando-se a amplitude da fase, obtém-se a seguinte equação:

$$A = \sqrt{P} \exp(j\theta) \quad (3.34)$$

em que $P(z,r)$ e $\theta(z,r)$ são, respectivamente, a potência e a fase do pulso. Relacionando-se (3.24) e (3.30) com as Eqs. (3.1) e (3.20), obtém-se, após a mudança do sistema de referência, que:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = (g - \alpha_{\text{int}})P \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha_{\text{lin}}g \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{g_0 - g}{\tau_c} - \frac{gP}{E_{\text{sat}}} \quad (3.37)$$

seja α_{int} é o coeficiente de perdas internas, sendo este o parâmetro que considera as perdas por espelhamento, difração e absorção no interior do dispositivo.

A automodulação de fase (*self-phase modulation* - SPM) é modelada por (3.36). O pulso modula sua própria fase como consequência da saturação do ganho. As equações (3.35) à (3.37) podem ser resolvidas para $\alpha_{\text{int}} \ll g$. Neste sentido, será assumido, por simplicidade, que, $\alpha_{\text{int}}=0$. Para esta condição, a integração das equações ao longo do comprimento do amplificador fornece:

$$P_{\text{out}}(\tau) = P_{\text{in}}(\tau) \exp(h(\tau)) \quad (3.38)$$

$$\theta_{\text{out}}(\tau) = \theta_{\text{in}}(\tau) - \frac{1}{2}\alpha_{\text{lin}}h(\tau) \quad (3.39)$$

A função $h(\tau)$ é definida como:

$$h(\tau) = \int_0^L g(z, \tau) dz \quad (3.40)$$

Fisicamente, (3.40) representa o ganho integrado em cada ponto do perfil do pulso. Integrando-se ao longo do comprimento do amplificador e utilizando-se (3.35) para eliminar o produto gP , tem-se na solução para $h(\tau)$ resolvendo-se:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{g_0 L - h}{\tau_c} - \frac{P_{in}(\tau)}{E_{sat}} [\exp(h) - 1] \quad (3.41)$$

O comportamento de $h(\tau)$ é modelado por (3.41) para sinais variantes no tempo, de onde se pode também determinar o ganho do amplificador.

O estudo do ganho do SOA, bem como todo o equacionamento de ganho, é importante tanto para o melhor entendimento do funcionamento do dispositivo, intrinsecamente, como para o conhecimento aprimorado do dispositivo, a fim de utilizar os seus efeitos não-lineares para diversas outras aplicações fotônicas.

3.2. Efeitos não-lineares

Ao se operar o SOA com um sinal de entrada alto o suficiente para atingir os níveis de saturação do dispositivo, a densidade de portadores se torna susceptível a variações, provocando a mudança no ganho e do índice de refração da cavidade. Tal comportamento é não-linear, causando efeitos indesejáveis em aplicações, como, por exemplo, em sistemas com multiplexação por divisão de frequência (FDM) e em sistemas com multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM) onde canais sofrem uma amplificação simultânea com mistura de seus conteúdos de informação.

Entre estes efeitos estão a saturação do ganho, a interferência induzida por saturação (*saturation-induced crosstalk* - SI) e a interferência induzida pela modulação da densidade de portadores (*carrier-modulation-induced crosstalk* - CMI). A saturação do ganho de um determinado canal, provocada pela presença de outros canais ocorre independente da separação entre eles e degrada a relação sinal-ruído do canal. Com isso procuram-se maneiras de operar o SOA longe da saturação e evitar tais problemas [16-18].

A operação linear do SOA pode ser conseguida através da adição de uma componente à corrente de polarização do amplificador. Esta componente será dependente

do sinal óptico de entrada. Com isso, mantém-se o ganho praticamente constante. De uma outra forma, consegue-se a operação linear do SOA em sistemas multicanais através da injeção na região ativa do dispositivo de um sinal óptico de bombeio com menor comprimento de onda (maior energia) que os das portadoras dos canais. A modulação da densidade de portadores é minimizada já que o sinal de bombeio fornece a inversão de população necessária para suprimir a queima excessiva de portadores, devido à amplificação de múltiplos canais, tornando o ganho praticamente constante. Este procedimento caracteriza o chamado SOA de ganho grampeado (*gain-clamped SOA*).

Apesar de apresentarem efeitos indesejáveis na amplificação multicanal, as não-linearidades têm sido identificadas como fontes potenciais para a obtenção de funções importantes do dispositivo, com aplicação, principalmente, no processamento de sinais no domínio óptico. Entre elas estão a conversão de comprimento de onda, a multiplexação e a demultiplexação óptica, a regeneração 2R (regeneração e reformatação), a regeneração 3R (regeneração, resincronização e reformatação), a recuperação de relógio (*clock*), o chaveamento espacial e temporal e a compensação da dispersão. Tais funções baseiam-se em efeitos não-lineares como a SPM, a modulação cruzada de ganho (*cross gain modulation* - XGM), a modulação cruzada de fase (*cross phase modulation* - XPM) e a mistura de quatro ondas (*four wave mixing* - FWM) [22-25].

As não-linearidades podem ser classificadas como provenientes de efeitos interbandas (associados às mudanças na concentração de elétrons nas bandas de valência e de condução) e efeitos intrabanda (efeitos associados às mudanças na distribuição de energia dos elétrons dentro da própria banda).

3.2.1. Efeitos Interbandas

Quando ocorre o acoplamento de um sinal com alta potência na cavidade do SOA, o ganho ou a absorção podem sofrer saturação. Isso ocorre pois há um número finito de estados possíveis na banda de condução do dispositivo. A saturação do ganho (ou da absorção) denota a ocupação (ou desocupação) destes estados. A Fig. 3.2 mostra o comportamento do ganho/atenuação da cavidade com a densidade de portadores. Tal característica pode ser utilizada na implementação de um mecanismo de chaveamento óptico [15-19-25], através da utilização de um dispositivo de duas seções, uma de ganho seguida por uma de absorção.

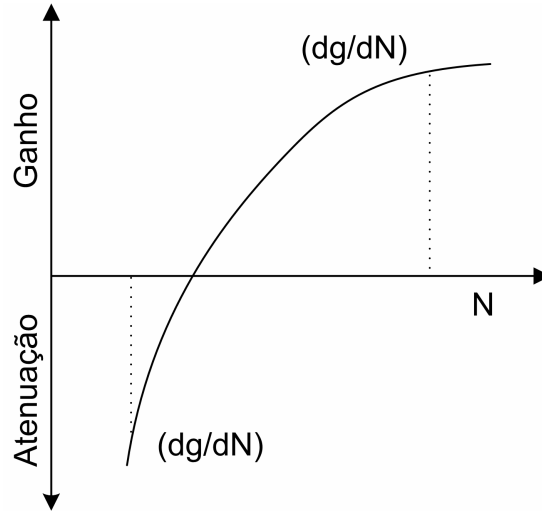


Fig. 3.2. Ganho versus densidade de portadores na banda de condução.

Associado à saturação do ganho, existe um processo de não-linearidade do índice de refração, que contém contribuições do efeito de plasma de portadores livres e do efeito de dispersão anômala na fronteira da banda. Uma aproximação linear da variação do índice de refração com a concentração de portadores pode ser representada por:

$$n = n_0 - g_0 \left(\frac{dn/dN}{dg/dN} \right) \frac{P/P_{sat}}{1 + P/P_{sat}} \quad (3.42)$$

onde n_0 é o índice de refração na ausência de luz.

A alteração do índice de refração com a potência do sinal óptico provoca uma diferença de fase no sinal amplificado, sendo que esta pode ser convenientemente utilizada em configurações interferométricas. Esta característica já foi utilizada na obtenção de um acoplador direcional não-linear ativo [23-24] e em auto-roteadores de pulsos óticos que utilizam SOAs na configuração laço-espelho [24]. Uma configuração semelhante, que se utiliza da mesma característica, é o SLALOM (*semiconductor laser amplifier in a loop mirror*). Tal configuração já foi utilizada para regeneração de pulsos, como porta de decisão para retemporização totalmente óptica e em decodificação e demultiplexação temporal [25]. Tal princípio é utilizado também na implementação de chaves ópticas ultrarrápidas, objeto de estudo deste trabalho. Altas taxas e tempos aceitáveis foram conseguidos e aspectos importantes desta funcionalidade serão comentados posteriormente.

3.2.2. Efeitos Intrabanda

Para pulsos cuja largura é muito menor que o tempo de vida dos portadores, a saturação do ganho é determinada pela energia de saturação E_{sat} , definida em (3.31), que possui valores típicos da ordem de picojoules. Nestas condições, o ganho do amplificador não depende da largura do pulso [17]. Entretanto, para larguras de pulsos da ordem de picosegundos, observa-se, experimentalmente, que a energia de saturação não mais é dada por (3.31) e se torna dependente da largura do pulso. Esse fato foi satisfatoriamente explicado através de um modelo teórico que inclui dois processos intrabanda: o aquecimento de portadores (*carrier heating*) e a queima espectral de lacunas (*spectral hole-burning*). Estes processos modificam a distribuição dos portadores nas bandas de energia, mas não alteram sua concentração.

Um caso interessante ocorre para amplificadores operando na corrente de transparência, já que, para esta condição, a não-linearidade interbandas desaparece em função do maior tempo de vida da densidade de portadores. Resultados experimentais indicam que um índice de refração dependente da intensidade do sinal, com um coeficiente de não-linearidade da ordem de $10^{-11} \text{ cm}^2\text{W}^{-1}$, pode ser obtido. Além disso, mudanças instantâneas no índice podem ser observadas para pulsos com larguras da ordem de 10 ps. Apesar não haver ainda explicações detalhadas para o mecanismo físico envolvido no processo, sabe-se que a dinâmica dos portadores dentro da banda está envolvida. Tais efeitos já foram explorados na obtenção de acopladores direcionais ativos [17].

3.3. Chaveamento Óptico

Como componentes promissores para as redes totalmente ópticas, chaves fotônicas fazem parte dos elementos das redes de última milha mais estudados e pesquisados.

Historicamente, as chaves ópticas, em grande maioria, são do tipo micro-sistema eletro-mecânico (MEMS), isto é, baseadas em conversões eletro-ópticas para o processamento da informação. Estas, por sua vez, compõem os comutadores inseridos na rede, como apresentado na Fig 3.3. Esses comutadores recebem os dados no domínio

óptico, convertem para o domínio eletrônico, fazem o chaveamento utilizando MEMS e retornam para o domínio óptico, para concluir o processo [9].

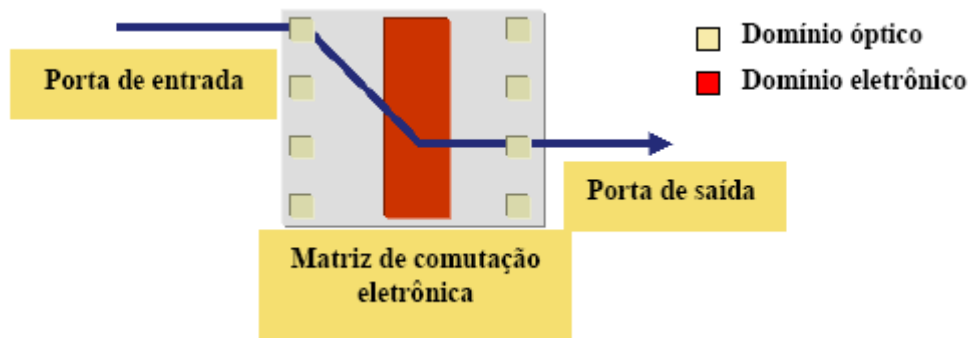


Fig. 3.3. Comutador com conversão óptica-eletró-óptica.

Esse tipo de processamento possui algumas desvantagens, pois não oferece transparência à taxa de bits e a serviços e protocolos de rede, implicando, assim, obrigatoriedade de uma pilha de protocolos para o completo funcionamento. Porém, o grande impacto desfavorável desse tipo de comutação é, com certeza, o grande gargalo gerado nas redes, ou seja, a limitação das taxas máximas de operação que dependem do processamento eletrônico das chaves, o que limita assim, a exploração das taxas reais de transmissão na fibra [8-9].

Assim sendo, partiu-se para a utilização de comutadores totalmente ópticos, compostos, por sua vez, de chaves ópticas baseadas, em sua grande maioria, por elementos semicondutores. Como elemento de estudo e pesquisa, ressaltar-se o uso de chaves baseadas em SOAs, compostos por InGAsP. Com isso, baseado numa técnica de injeção elétrica de portadores no dispositivo SOA, utiliza-se do mesmo para chaveamento de informações no domínio óptico. Para tanto, usa-se de um dispositivo eletrônico para acionamento da injeção, consequentemente acionamento do dispositivo para o processo de chaveamento. Vale se ressaltar que esse sincronismo da informação com o processo de acionamento é pré-estabelecido para efeito de facilitação nas medidas. Na Fig. 3.4 mostra-se, de forma bastante simples, o procedimento de acionamento, porém nesse caso o acionamento se dá a partir da informação vinda do cabeçalho do pacote que irá ser chaveado, onde $e1$ e $e2$ são as entradas ópticas e $s1$ e $s2$ as saídas.

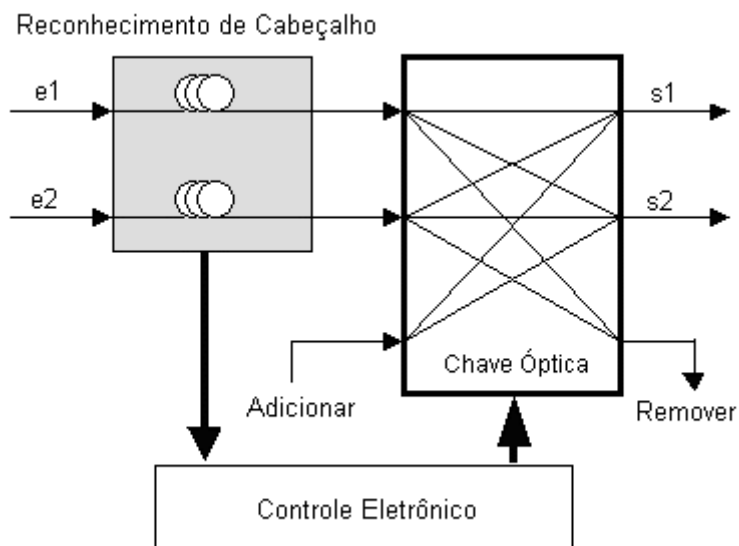


Fig. 3.4. Esquema básico de chaveamento óptico da informação.

Esse tipo de tecnologia promissora vem sendo continuamente estudado e empregado, pois tanto supre a necessidade de comutadores eletrônicos, como melhora consideravelmente os tempos do chaveamento, propiciando uma melhoria significativa na latência da rede [4-8].

Contudo, neste estudo é destacada também uma nova maneira de acionamento do dispositivo de chaveamento pelo circuito eletrônico, no caso o SOA. Com isso é mostrada e implementada a técnica desenvolvida em laboratório, pelo nosso grupo de pesquisa, de uma pré-injeção de um pulso de corrente no dispositivo (*Pré-Impulse Step Injection Current - PISIC*), apresentada posteriormente neste trabalho, levando a melhoria de tempos no liga/desliga da chave, da ordem de 4 ns para cerca de 350 ps.

Através de uma forma sistêmica, apresenta-se o estudo dessa nova técnica a partir de sua utilização nas redes de pacotes de dados de altas taxas de transmissão e com simulações feitas com todas as características das redes de dados de alta velocidade. Portanto apresenta-se, nos próximos capítulos, um estudo detalhado da implementação de tais chaves e suas características, ressaltando suas melhorias aplicadas ao tráfego de dados nas redes do tipo NGN.

4. Estrutura Experimental

Apresenta-se, neste capítulo, a montagem opto-eletrônica do experimento de chaveamento ultra-rápido de pacotes ópticos, ressaltando como é feito e suas principais características. Posteriormente, neste mesmo capítulo, mostram-se os processos de montagem e suas especificidades, como também as técnicas aplicadas e os tipos de montagem propostas para o projeto.

4.1. Projeto Opto-Eletrônico

A realização de medições experimentais é de fundamental importância para o desenvolvimento do projeto e obtenção dos resultados para possibilitar um conhecimento sobre toda a estrutura facilitando, desta forma, a montagem do experimento. Assim sendo, descrevem-se os equipamentos e *softwares* de medições utilizados no experimento, afim de permitir um entendimento de toda a montagem.

4.1.1. Descrição dos equipamentos

Primeiramente, apresenta-se, na Tabela 4.1 a listagem dos equipamentos e *softwares* utilizados, com um pequeno descritivo de cada um. Logo após, mostra-se a descrição detalhada de alguns equipamentos específicos, ressaltando-se as características do seu funcionamento.

Tabela 4.1. Equipamentos utilizados na montagem experimental.

Equipamentos	Marca/Modelo	Especificações
Laser	Santec TSL - 210V	Sintonizável
Modulador Óptico	Avanex AM - 40	4,9 V
Polarizador Óptico	Photonetics 3688 - PR15	-----
Gerador de Padrão de Pulso I	Agilent 81141A 1 canal	14 GHz Tempo sub./desc. 35 ps
Gerador de Padrão de Pulso II	Agilent 81134A 2 canais	7 GHz Tempo sub./desc. 70 ps
Gerador de Padrão de Pulso III	HP 8131A 1 canal	500 MHz Tempo sub./desc. 150 ps
Isolador Óptico	JDSU	-----
Atenuador Óptico	Agilent 81571A	Ajustável
Amplificador Óptico a Semicondutor (SOA)	InPhenix IPSAD 1503	Convencional
Combinador de Microondas I	HP 11667B	DC – 26,5 GHz
Combinador de Microondas II	Picosecond 2201	DC – 40 GHz
Cordões de Fibra	-----	FC-PC/APC SC-PC/APC
Cabos de Microondas	Huber-Suhner	Até 18 GHz
Osciloscópio Óptico Digital	HP 83480A	40 GHz
Analizador de Espectro Óptico (OSA)	Agilent 86146B	0,6 – 1,7 μ m
Medidor de Potência Óptica	Anritsu ML9002A	0,85 / 1,3 / 1,55 nm
Software LabView	National Instruments	Versão 6
Rede KyaTera de Fibras	SMF	20/40 km
Filtro Óptico	Sintonizável	1550 nm
Fonte de Tensão	Contínua	Ajustável

4.1.1.1. Laser Santec

A Fig. 4.1 mostra uma foto do equipamento utilizado como fonte de luz para a portadora dos pacotes ópticos; o laser utilizado, foi do tipo semicondutor e sintonizável por

cavidade externa. Ajustes no botão frontal permitem a fácil sintonização do comprimento de onda ou da potência óptica de saída. Trata-se de um laser do tipo Fabry-Perot, com isso possui uma faceta coberta de material anti-reflexivo. Internamente, também se utiliza lentes e isoladores para evitar o retorno da luz da cavidade externa para o laser [3]. Através da existência de uma grade de difração ajustável, sintoniza-se o comprimento de onda desejado.



Fig. 4.1. Laser Santec TSL-210V.

Quanto às características de seu funcionamento, pode-se ressaltar sua elevada potência de saída, em torno de 8 mW, e sua precisão de sintonia na faixa de 1530 à 1610 nm. Já sua resolução é de cerca de 0,01 nm e a velocidade de sintonia por volta de 170 nm/s.

4.1.1.2. Modulador Óptico

O modulador eletro-óptico externo utilizado foi o *Avanex AM 40*. Este modulador combina alta linearidade à pouca injeção de corrente. Na modulação externa, o feixe do laser deixa de ser modulado por meio de sua corrente de polarização e passa a ser modulado por um dispositivo externo capaz de variar a intensidade da luz em proporção à tensão aplicada ao seu terminal de RF. Com isto, não existe gorjeio (*chirp*), uma vez que o dispositivo fotoemissor (laser) está polarizado em uma corrente constante. Assim, a largura de banda possível é superior à de um laser sob modulação óptica direta. O modulador possui substrato de LiNbO_3 e é desenvolvido com a técnica de óptica integrada, consistindo de eletrodos planares e de guias ópticos, configurados, por exemplo, de acordo com a topologia de um interferômetro do tipo Mach-Zehnder.

A Fig. 4.2 apresenta a resposta eletro-óptica do modulador, fornecida pelo fabricante, demonstrando sua linearidade. Para sua operação na região linear é necessário manter uma tensão de polarização, de cerca de 4,9 volts.

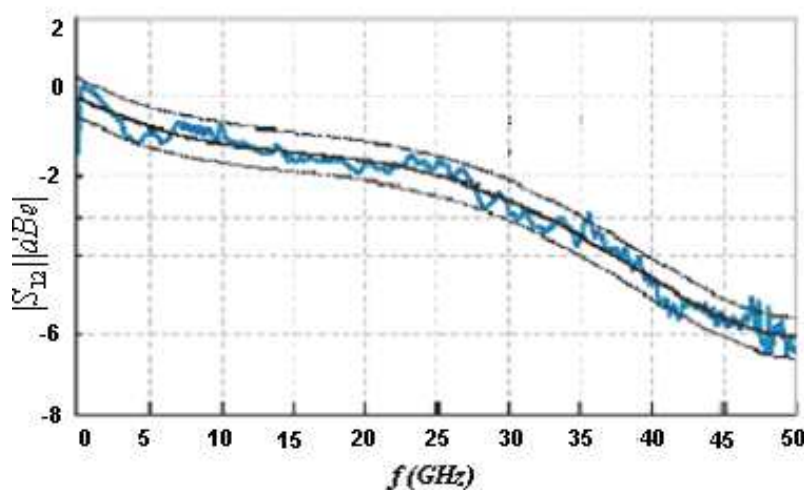


Fig. 4.2. Resposta eletro-óptica do modulador externo fornecida pelo fabricante.

Entre seus principais parâmetros de funcionamento, destacam-se, a sua razão de extinção de, aproximadamente 24,7 dB, sua perda por inserção óptica de 3,5 dB, sua largura de banda em torno de 30 GHz e sua faixa de comprimento de onda (de 1525 à 1615 nm).

4.1.1.3. Geradores de padrão de pulsos

Foram utilizados três diferentes geradores de padrão de pulsos, cada um com uma função específica na montagem. O conhecimento aprofundado do funcionamento e manuseio desses equipamentos foi de extrema importância para o experimento, pois possuíam características diferentes tanto nas suas configurações como na maneira de alcançar o sincronismo necessário para a aplicação.

O gerador de maior resposta em frequência, o 81141A, foi utilizado para modulação do sinal óptico vindo do laser, com taxa máxima de 14 GHz, formato de pulso do tipo retorno a zero (*return to zero* - RZ) e tempos de resposta na ordem de 35 ps; na Fig. 4.3 mostra-se o painel frontal do gerador 81141A.



Fig. 4.3. Gerador Agilent 81141A.

O segundo gerador, também do mesmo fabricante e mostrado na Fig. 4.4, possuía frequência máxima de 7 GHz e foi utilizado, conjuntamente com um terceiro gerador, de menor taxa e fabricante diferente, para a elaboração da técnica de microondas de acionamento da chave SOA.



Fig. 4.4. Gerador Agilent 81134A.

4.1.1.4. Amplificador Óptico

O SOA utilizado é do tipo convencional e adquirido no mercado. Tem como principais características a ampla largura de banda óptica, o elevado ganho óptico, a baixa sensibilidade à polarização e a baixa refletividade nas faces. A Tabela 4.2 apresenta outras características, agora funcionais, fornecidas pelo fabricante. Já na Fig. 4.5 mostra-se o amplificador encapsulado em uma montagem específica para a sua utilização no chaveamento, feita em laboratório.

Tabela 4.2 Parâmetros do SOA InPhenix IPSAD 1503.

Parâmetros	Valores
Comprimento de onda de pico	1540 nm
Figura de ruído	10,5 dB
Corrente máxima de polarização	250 mA
Polarização dependente do ganho	0,9 dB
Faixa espectral (-3 dB)	50 nm

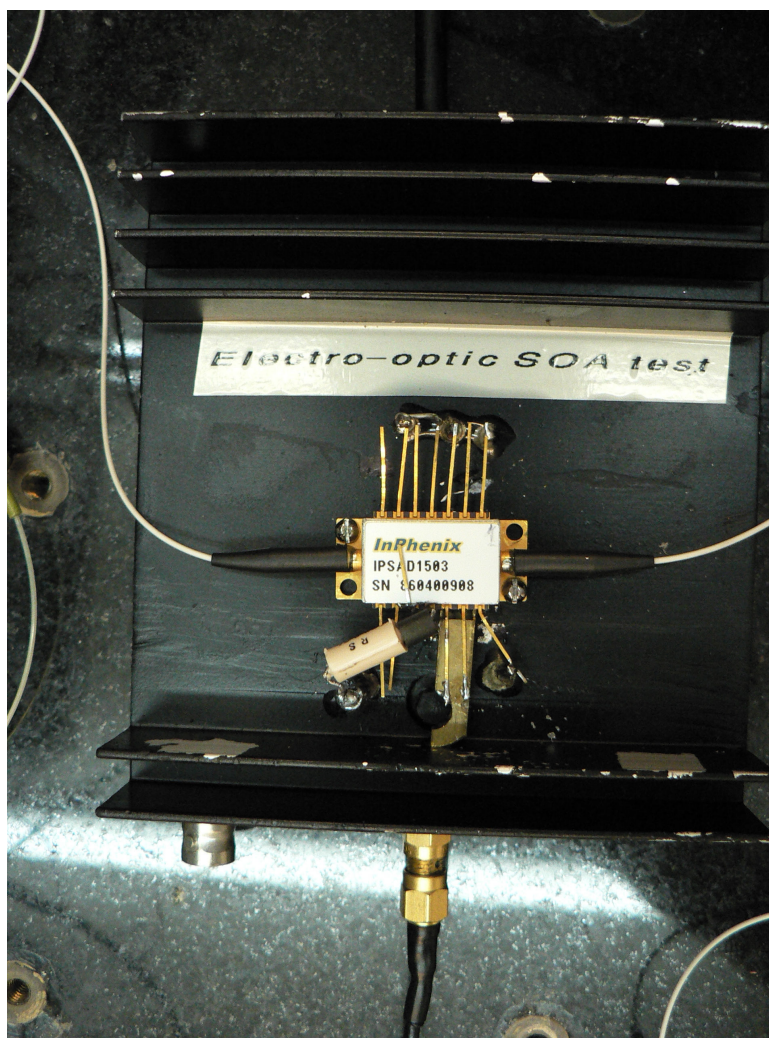


Fig. 4.5. SOA utilizado na montagem.

A Fig. 4.6 mostra um exemplo da estrutura interna do SOA encapsulado, semelhante àquela apresentada na Fig.4.5. Em destaque, pode-se observar o SOA propriamente dito (*SOA chip*), as conexões de entrada e saída de luz e a conexão elétrica.

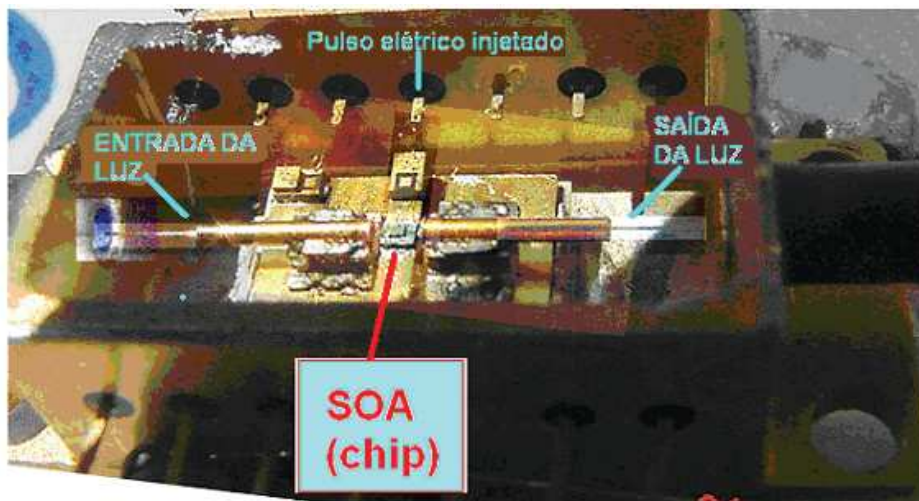


Fig. 4.6. Estrutura interna de um SOA encapsulado.

Para a polarização do SOA, utilizou-se de uma fonte de corrente contínua associada a um controle de temperatura, que foi construída no laboratório e utilizou circuitos integrados, sensores e atuadores do encapsulamento para o controle.

Para uma completa investigação sobre o dispositivo, várias medições de caracterização foram feitas. Primeiramente, como apresentado na Fig. 4.7, 4.8 e 4.9 mostram-se os comportamentos dos sinais ajustados em diferentes comprimentos de onda com o efeito da ASE, variando-se, desta forma, a potência de entrada entre dois valores (0 dBm e -10 dBm) para 4 valores distintos de corrente de injeção no dispositivo.

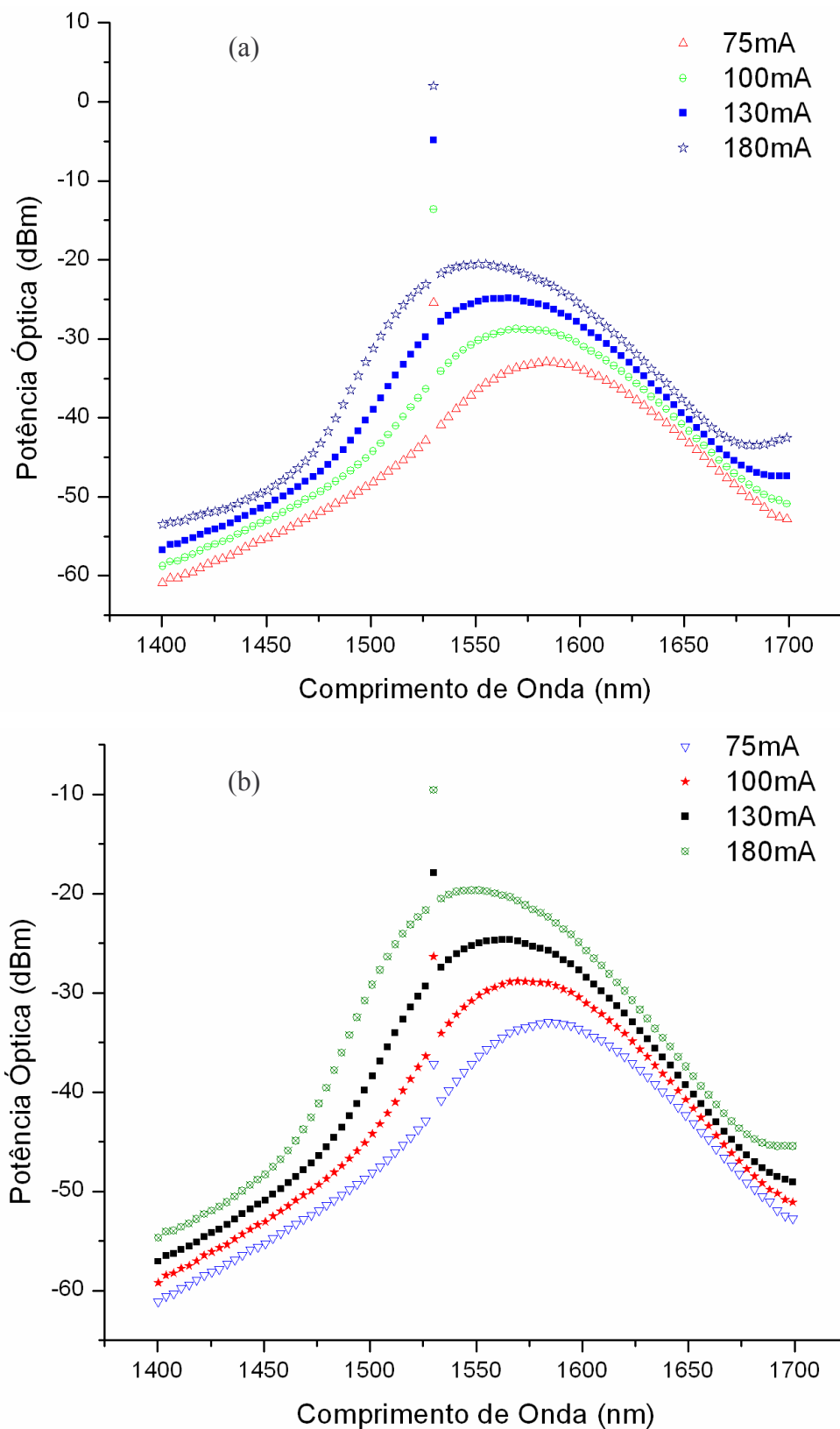


Fig. 4.7. Espectro de ASE com sinal ajustado no comprimento de onda 1530 nm (a) 0 dBm de potência óptica de entrada (b) -10 dBm de potência óptica de entrada.

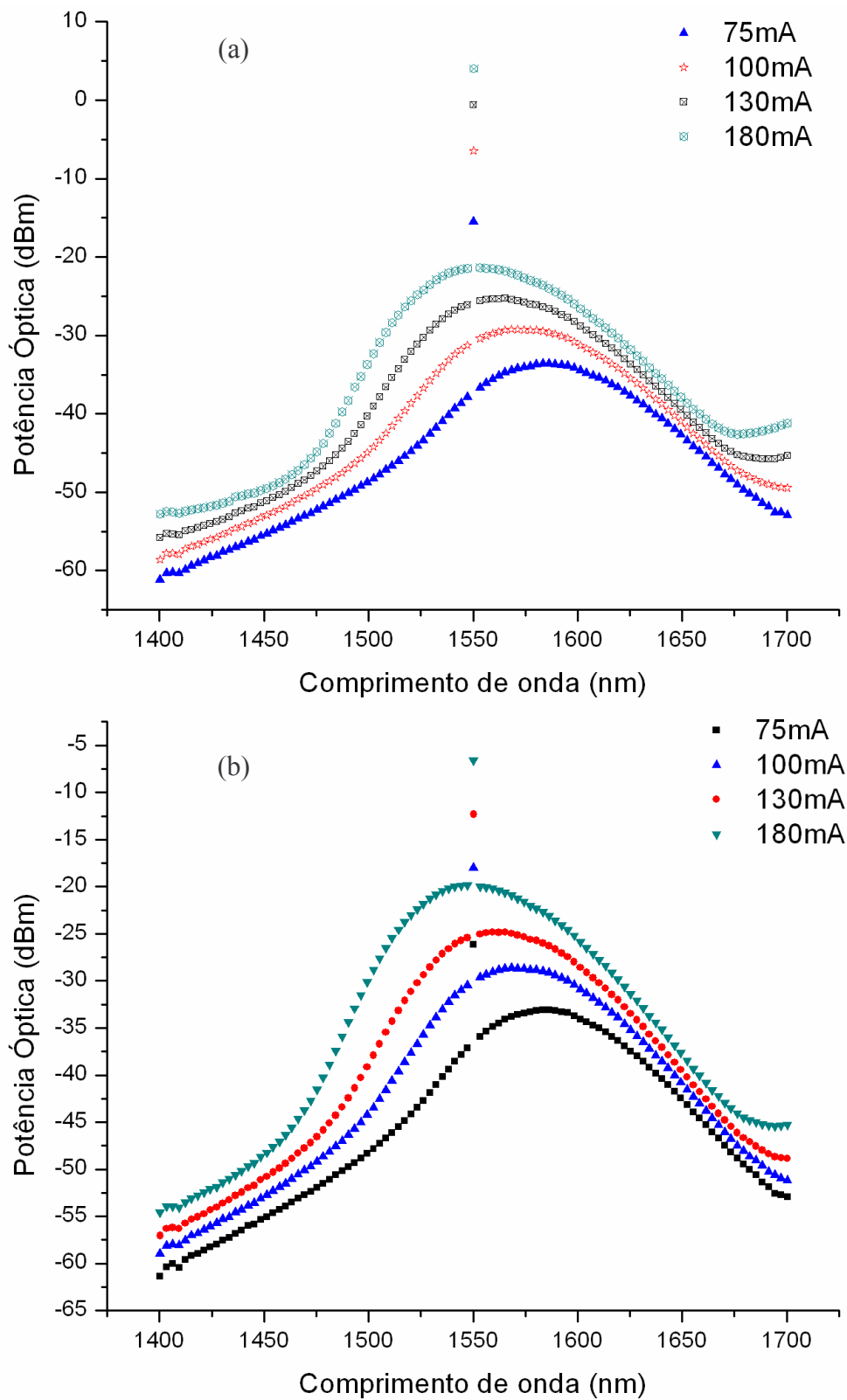


Fig. 4.8. Espectro de ASE com sinal ajustado no comprimento de onda 1550 nm (a) 0 dBm de potência óptica de entrada (b) -10 dBm de potência óptica de entrada.

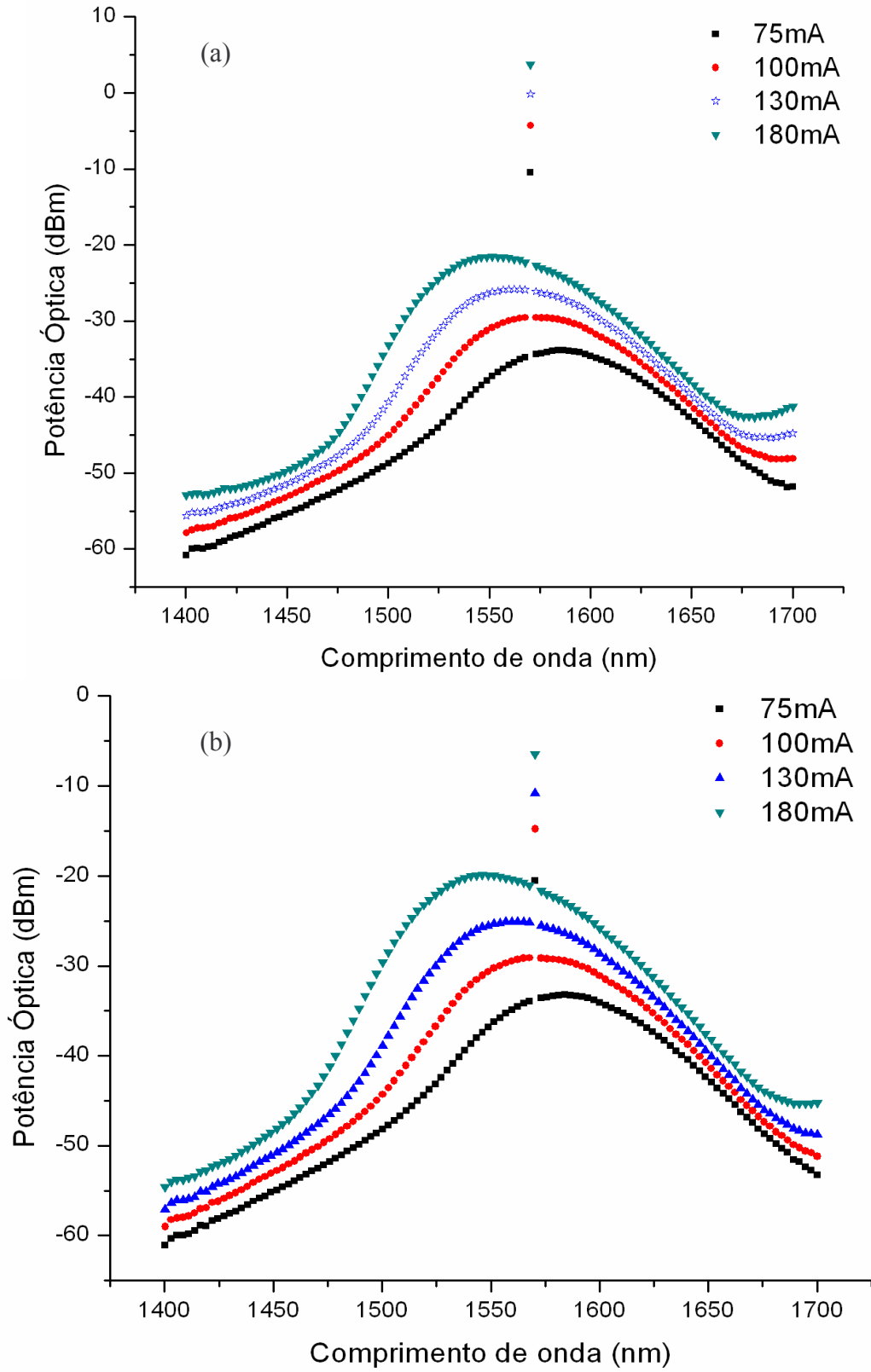


Fig. 4.9. Espectro de ASE com sinal ajustado no comprimento de onda 1570 nm (a) 0 dBm de potência óptica de entrada (b) -10 dBm de potência óptica de entrada.

A partir deste ponto analisou-se também o funcionamento do SOA um pouco acima do seu limiar de amplificação, por volta de 80 mA, variando, neste caso, a potência óptica de entrada através de um atenuador sintonizável. Essa avaliação é mostrada na Fig. 4.10, para 3 diferentes comprimentos de onda e com potência óptica de entrada no atenuador de 0 dBm.

Entre outras diversas medidas elaboradas, utilizou-se de alguns valores de potência de entrada, também, em três comprimentos de ondas diferentes (1525 nm, 1550 nm e 1575 nm) e variou-se a corrente de polarização do mesmo, chegando a valores, a partir do analisador de espectro óptico (OSA), para a potência óptica após a amplificação do SOA. A variação da corrente de polarização ocorreu de 50 a 200 mA, em passos de 25 mA.

Dessas medidas, elaboradas para caracterização, notou-se que o limiar de ganho, específico para esse SOA que estava sendo utilizado, ficava em torno de 75 mA e a sua saturação por volta de 180 mA. Com isso, os resultados obtidos no OSA para cada corrente de polarização, comparou-se com o valor de referência para a mesma potência de entrada no SOA, obtendo-se o ganho do SOA para uma determinada faixa de corrente de polarização, entre o limiar e a saturação. Esses resultados podem ser observados na Fig. 4.11 (para uma variação de corrente de 75 mA a 180 mA).

Observa-se, a partir das figuras apresentadas acima que, para uma mesma potência de entrada, aumentando-se a corrente de polarização, maior é o ganho óptico apresentado. Este fato está relacionado com o aumento da densidade de portadores disponíveis para amplificação, como apresentado no levantamento teórico no terceiro capítulo. Já para uma mesma corrente de polarização, aumentando-se a potência de entrada, menor é o ganho óptico. Este comportamento está relacionado a proximidade entre o valor da potência de entrada e a potência de saturação, ou seja, com a saturação do SOA, diminui-se o ganho. Para baixos valores de corrente e de potência de entrada, observa-se um aumento no ganho óptico. Isto ocorre devido a se operar muito abaixo da saturação. Mostra-se, assim, a correspondência entre os resultados experimentais e os teóricos descritos na literatura.

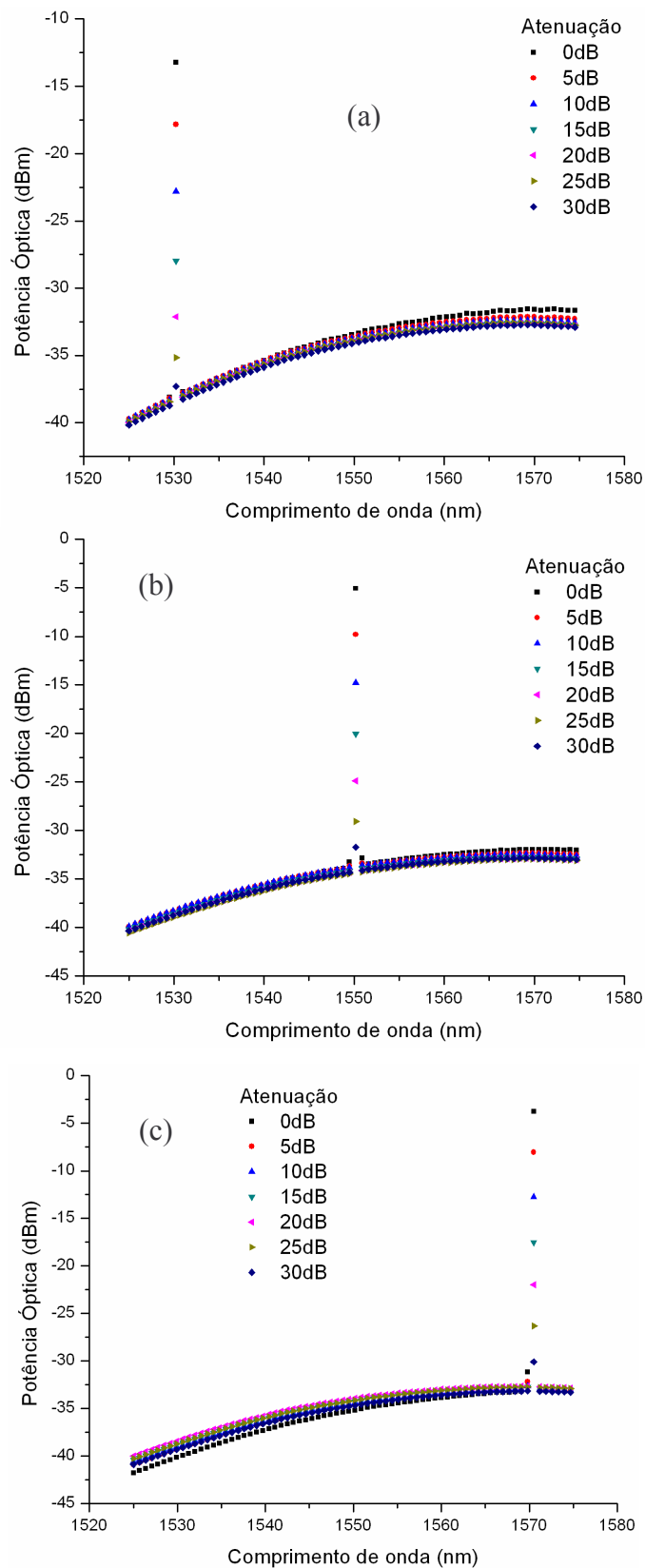


Fig. 4.10. Variação da potência óptica de entrada (0 dBm) com uma injeção fixa de corrente um pouco acima do limiar de amplificação (a) 1530 nm (b) 1550 nm (c) 1570 nm.

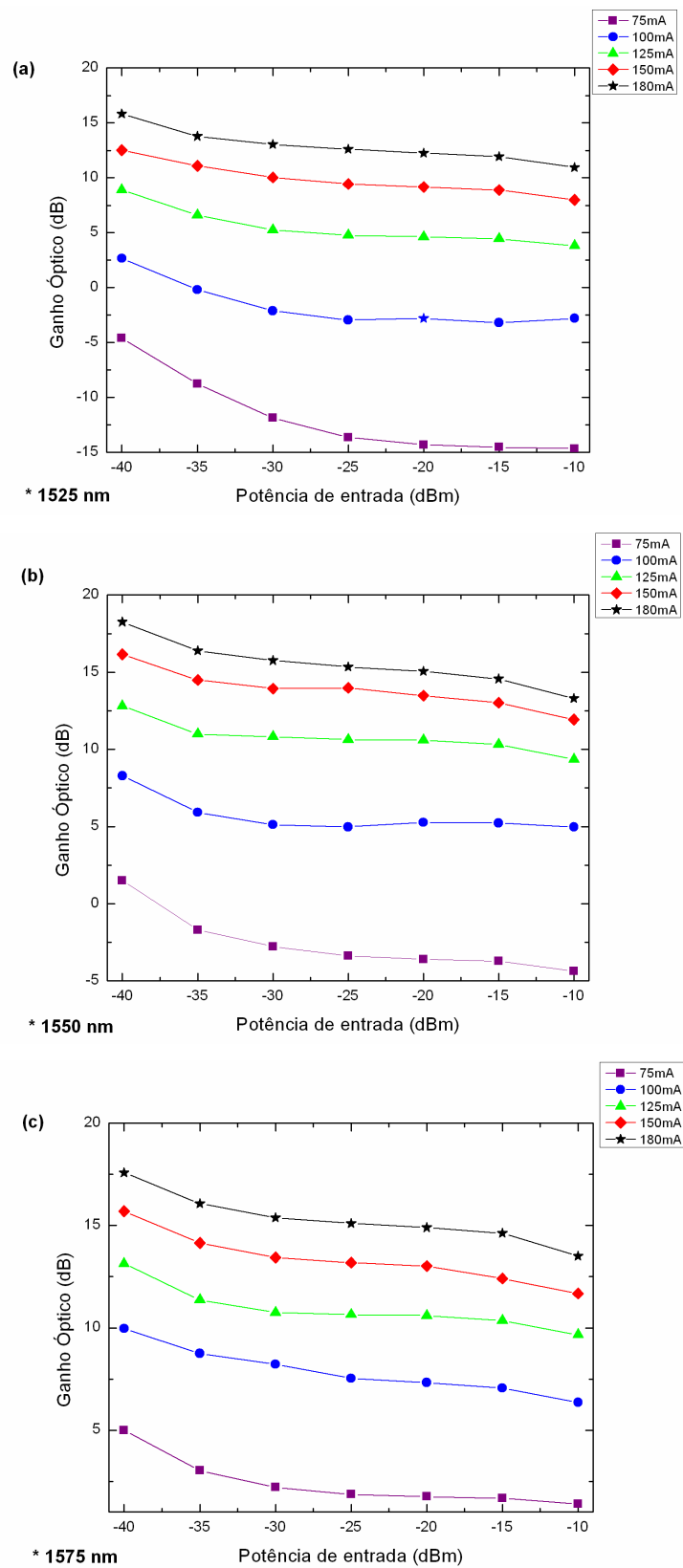


Fig. 4.11. Ganho óptico do dispositivo de acordo com a variação de injeção de corrente (a) 1525 nm (b) 1550 nm (c) 1575 nm.

4.1.2. Montagem Experimental

O projeto de montagem e os passos seguidos para a análise da técnica de chaveamento ultra-rápido foram baseados nos estudos de redes de chaveamento de pacotes e nas redes de chaveamento de rajadas, como descrito no Capítulo 2. A partir da análise na Fig. 4.12 tem-se uma referência de como proceder à montagem experimental de todo o projeto e, posteriormente, o estudo dos resultados obtidos.

Desta forma é passada a idéia de todo o processo de chaveamento óptico de pacotes, o qual pode ser descrito como: ao chegar vários pacotes ópticos separados por um determinado tempo de guarda pré-estabelecido pela supervisão da rede, faz-se necessária, a separação entre carga útil e o cabeçalho de endereçamento contidos no pacote, a fim de obter a rota específica daquele pacote através das informações do *header*. No entanto, para uma sincronia no tempo de processamento do cabeçalho e a saída da informação, é colocado um *buffer* ou armazenador óptico, muitas vezes composto por um enlace de fibra óptica.

A partir da análise do cabeçalho passa-se então, ao processo de acionamento da chave óptica para a determinada porta de saída; no caso específico de somente um dispositivo SOA se possui somente duas alternativas para saída. Desta forma, finaliza-se assim o processo de chaveamento utilizando amplificadores ópticos a semicondutor.

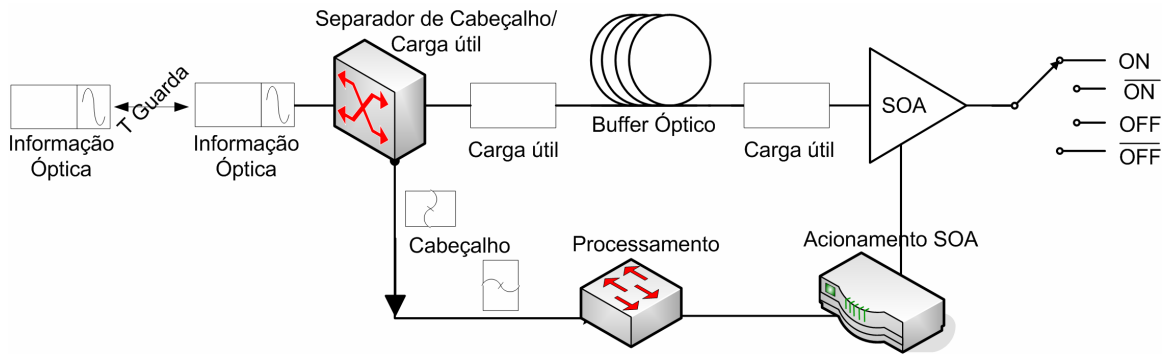


Fig. 4.12. Esquemático de estrutura experimental para chaveamento óptico de pacotes utilizando SOAs.

Desprezando-se o processamento eletrônico do cabeçalho para o acionamento da chave e permitindo-se a sincronização da construção da informação óptica ao acionamento

do dispositivo de chaveamento, chegou-se a um modelo esquemático adequado para execução do projeto, como apresentado na Fig. 4.13.

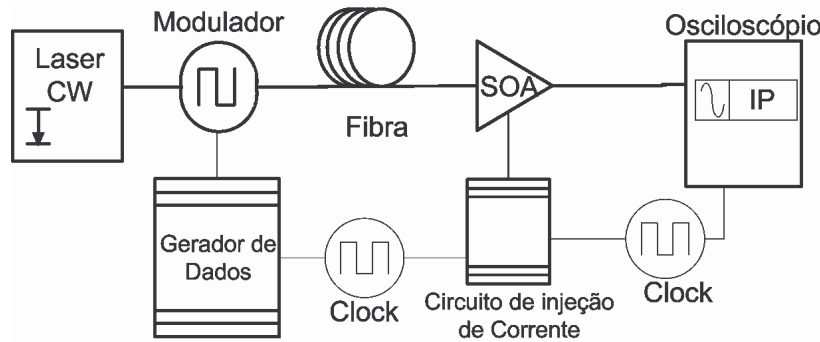


Fig. 4.13. Esquemático da montagem experimental proposta.

Primeiramente, um sinal óptico do tipo onda contínua (cw) é gerado, a partir do laser sintonizável. Este sinal, é por sua vez, modulado em amplitude por um sinal de microondas vindo de um gerador de dados, que simula pacotes do tipo IP em taxas de 10 Gb/s, numa seqüência conhecida. Em contrapartida, o gerador mantém um sincronismo com o circuito de injeção de corrente no SOA, onde o mesmo liga e desliga (fornece amplificação ou atenuação, respectivamente) de acordo com a chegada de pacotes no dispositivo de chaveamento. Neste processo, levam-se em consideração os atrasos nas fibras, cabos de microondas e respostas dos equipamentos. Logo em seguida, com o sincronismo efetuado e a chave ligando e desligando de acordo com a passagem dos pacotes, analisam-se o tempo de chaveamento do dispositivo SOA e a deterioração da informação.

O tempo de chaveamento do dispositivo está diretamente ligado à injeção de portadores, pois o processo se resume à situação de fornecimento ou não de ganho óptico para o tráfego daquele sinal. Com isso, necessita-se da injeção, logo no início de acionamento da chave, de portadores suficientes para suprir os primeiros fótons que estão incidindo no interior da cavidade do SOA. Obtém-se, assim, uma condição de amplificação quase que imediata, resultando num menor tempo na espera para o momento ideal de funcionamento do SOA.

Portanto, utilizou-se de uma técnica já mencionada em Capítulos anteriores e desenvolvida pelo grupo de pesquisa, chamada de injeção de pré-pulso de corrente (*Pré-*

impulse step injection current - PISIC), em comparação à injeção normal de portadores no dispositivo a fim de se obter melhores tempos no chaveamento de pacotes ópticos. Deve-se observar que esta é a primeira vez que esta técnica é testada num ambiente sistêmico que utiliza chaves eletro-ópticas.

O funcionamento dessa pré-injeção de portadores tenta suprir, desta forma, a necessidade do processo de injeção quase instantânea no dispositivo objetivando a diminuição no tempo de chaveamento da chave. A partir dessa análise, fez-se algumas mudanças na técnica, adaptando-a estritamente à utilização em SOAs comerciais e levando-a a bons níveis de funcionamento no ambiente proposto.

Mostra-se na Fig. 4.14, de forma ilustrativa, a disposição dos equipamentos utilizados na montagem experimental do projeto.

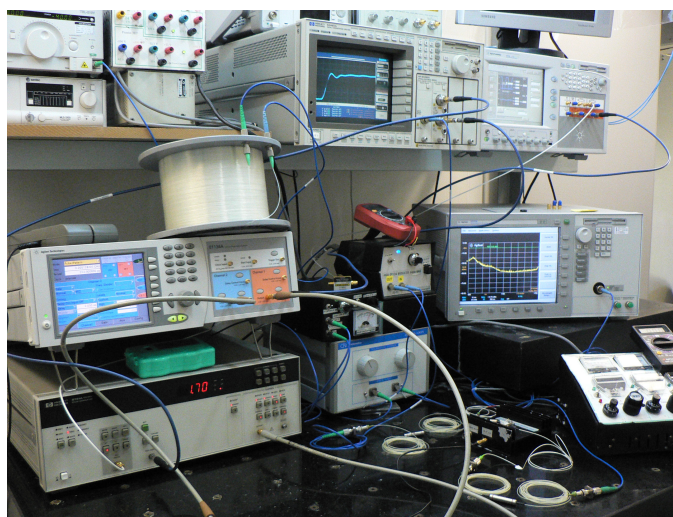


Fig. 4.14. Disposição dos equipamentos utilizados na montagem.

Após a montagem e resultados obtidos do chaveamento com a utilização da técnica simples de injeção de corrente no SOA foram elaborados os primeiros passos experimentais para a montagem da técnica PISIC e posterior análise e adaptação da mesma ao processo de chaveamento. A seguir, na Fig. 4.15, ilustra-se como foi feita a montagem da técnica, baseada no acoplamento de sinais de microondas vindos dos geradores, através de combinadores de RF. Desta forma, chega ao dispositivo SOA a forma de onda designada para o processo de injeção.

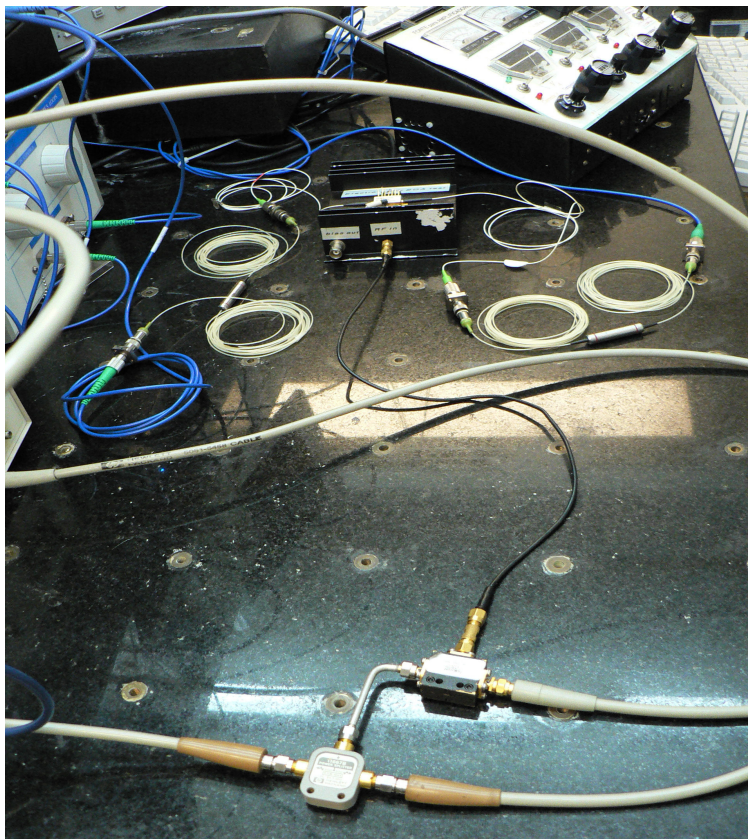


Fig. 4.15. Acoplamento de sinais de microondas a partir de combinadores de RF, para obtenção da forma de onda adequada para injeção no dispositivo.

Posteriormente, a montagem do experimento foi adaptada para fazer parte de uma rede estável de tráfego de dados a nível óptico de forma a enriquecer o nível experimental, testar de forma real o experimento elaborado em laboratório e analisar os efeitos que ocorrem durante uma transmissão de dados em longas distâncias e altas taxas. Esta rede chamada de KyaTera, é uma rede de dados baseada no protocolo Ethernet/IP (tecnologia de interconexão para redes locais, EtherIP), especificado no RFC 3378 do IETF (*Internet Engineering Task Force*) [26], e interliga vários laboratórios associados ao projeto KyaTera/Fapesp através de uma malha óptica dedicada de fibras monomodo e multimodo. A rede estável, apesar de não se restringir ao perímetro urbano de uma cidade, apresenta características de MAN (*Metropolitan Area Network*, IEEE Std. 802-2001). Na Fig. 4.16 mostram-se os bastidores ópticos de entrada e saída da rede fixados no laboratório, onde foi utilizado neste projeto de chaveamento óptico de pacotes.

Dessa forma a partir dos resultados obtidos, pôde-se chegar a conclusões do processo de melhoria nos tempos de chaveamento em redes ópticas de pacotes. Portanto apresentam-se, no capítulo seguinte, os resultados e processos dos experimentos sugeridos.

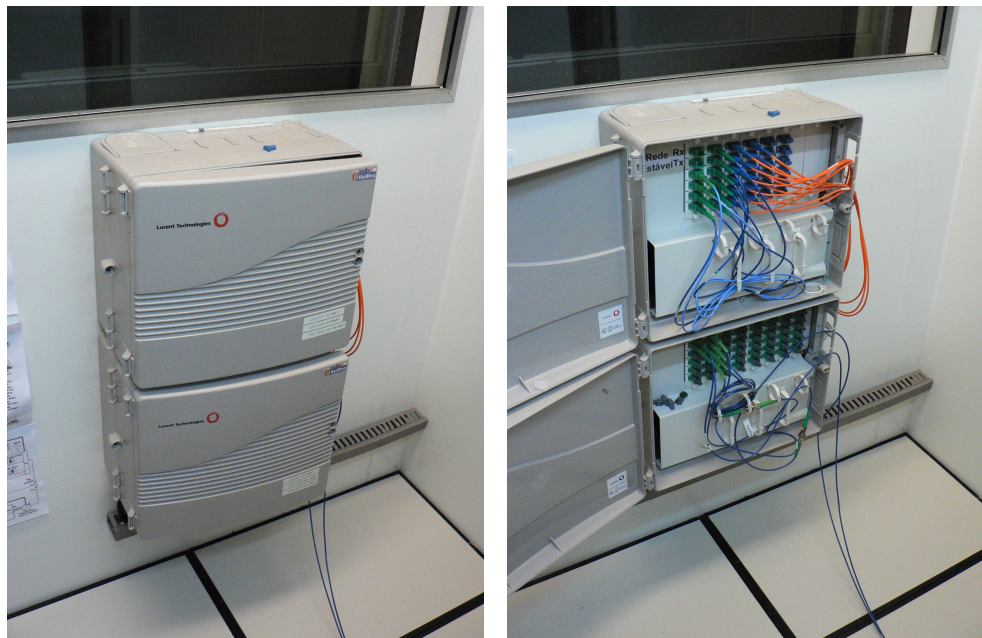


Fig. 4.16. Bastidor óptico da rede KyaTera.

5. Resultados Gerais Obtidos

Neste capítulo apresentam-se os resultados experimentais relativos à proposta de obtenção de chaveamento ultra-rápido de pacotes acionado por um esquema de pré-injeção de corrente em um SOA. Alguns destes resultados experimentais posteriormente são comparados a resultados de simulação, para enfatizar e comprovar a eficiência e aplicabilidade da técnica.

5.1. Técnica de chaveamento

Para simplificar o trabalho, a técnica de chaveamento foi adotada para controlar uma chave simples baseada em SOA, ou seja, uma chave que contém apenas um SOA e que permite, ou não, a passagem de luz. Contudo, demonstra-se a possibilidade de escalonar a aplicação da técnica para atender montagens mais complexas, com diversos SOAs.

Desta forma, analisam-se os momentos de chaveamento nos pontos críticos de deterioração dos bits da informação, a fim de obter não só o menor tempo de resposta no processo de chaveamento da chave, como, também, a menor degradação do pacote que estará sofrendo o processamento naquele instante.

Como comentado em capítulos anteriores, o funcionamento do dispositivo para este tipo de processo de chaveamento possui um tempo específico de acionamento da chave, o qual leva em consideração o tempo da chegada de portadores até a cavidade interna do SOA e o tempo do decaimento de elétrons dos níveis mais altos de energia para liberação dos fótons amplificadores do sinal. Portanto, estudou-se uma maneira de melhorar

os tempos de chaveamento sem a deterioração do mesmo e, principalmente, sem a geração de nenhum outro tipo de influência destrutiva no pacote de informações a ser chaveado naquele instante.

Utilizou-se, então, a pré-injeção de portadores no dispositivo, onde, instantes antes do processo de liga e desliga da chave óptica, injetam-se portadores para suprir a necessidade de amplificação no início e final do pacote, conseqüentemente não deteriorando, assim, os bits iniciais da informação por falta de fótons para amplificação completa do sinal de entrada.

Vale ressaltar que, no processo de pré-injeção de portadores sua aplicabilidade torna mais eficiente no momento para ligar a chave, isto é, na hora do primeiro acionamento para passagem de um pacote, pois o processo de início de amplificação é bem mais lento do que o processo de retirada de fótons amplificados.

5.2. Pacotes de Informações

Para simulação de tráfego real de informações, elaborou-se, a partir dos equipamentos descritos no capítulo anterior, uma rajada de pacotes constituídos por uma seqüência conhecida de bits na taxas de 10 Gb/s; a partir daí, elaborou-se todo o experimento e obtiveram-se os resultados, apresentados em sessões posteriores.

Após a análise em laboratório, esses pacotes foram submetidos a um ambiente real de enlace óptico (25 e 40 km) onde se pode analisar, além das deteriorações devido ao processo de chaveamento ultra-rápido, os efeitos dispersivos nos bits.

Os pacotes foram construídos em tempos definidos, para facilitar a análise dos dados e o processo de acionamento da chave, com valores de pico-a-pico de cerca de 1,5 volts na saída do gerador de pacotes. Na Fig. 5.1 mostram-se o pacote, constituído do cabeçalho e carga útil, e os intervalos fixos entre os pacotes (tempo de guarda).

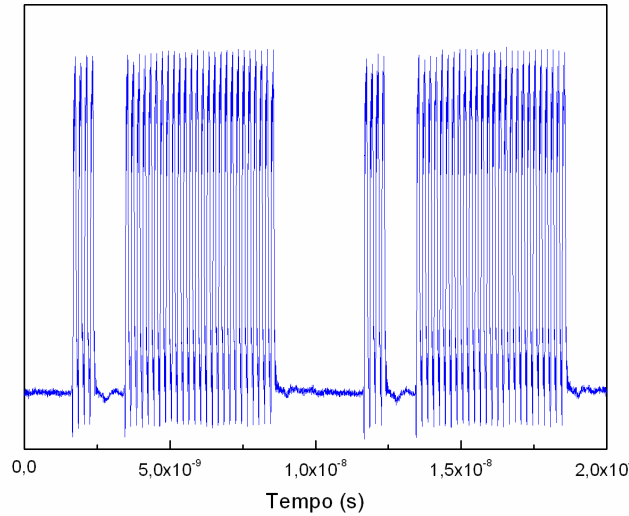


Fig. 5.1. Pacotes, no nível elétrico, obtidos na saída do gerador de pacotes com taxa de 10 Gb/s.

5.3 Chaveamento

Para o chaveamento do SOA, são possíveis diferentes formatos para aplicação de injeção de portadores no dispositivo. Na sequência, alguns destes formatos que foram adotados durante os experimentos são descritos. Além disto, procura-se descrever as características de acionamentos de cada um deles.

5.3.1 Simples

O chaveamento definido como “simples” consiste, basicamente, na injeção de portadores no tempo necessário para a passagem completa do pacote a ser chaveado. No tempo de chegada de portadores até o dispositivo, para início do processo, deve ser levado em consideração os retardos sofridos nos equipamentos e junções da montagem. Mostra-se, na Fig. 5.2, o modelo de pulso elétrico aplicado no dispositivo, gerando uma corrente de polarização por volta de 125 mA e a resposta óptica após o processo de chaveamento da informação no mesmo.

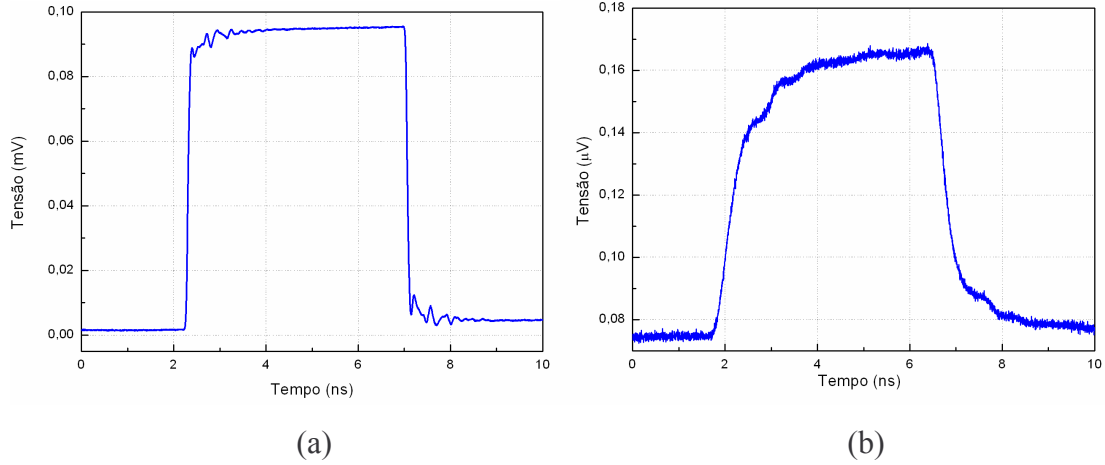


Fig. 5.2. Modelo para injeção de portadores por pulso simples (a) antes de chegar ao dispositivo e (b) a resposta óptica após o processo de chaveamento sofrido no SOA.

5.3.2 Duplo (1 Step)

O processo de injeção de portadores no dispositivo baseado na técnica de pré-injeção de corrente (PISIC), já descrita anteriormente, é proposto como uma alternativa para diminuir o tempo de acionamento da chave sem que deteriore os bits iniciais ou finais do *payload*, evitando, assim, perdas de informação e melhoria em processos de latência na rede. Apresenta-se, na Fig. 5.3, o modelo de pulso elétrico com um degrau injetado no dispositivo, com uma corrente de polarização por volta de 125 mA e a resposta óptica do SOA após o processo de chaveamento.

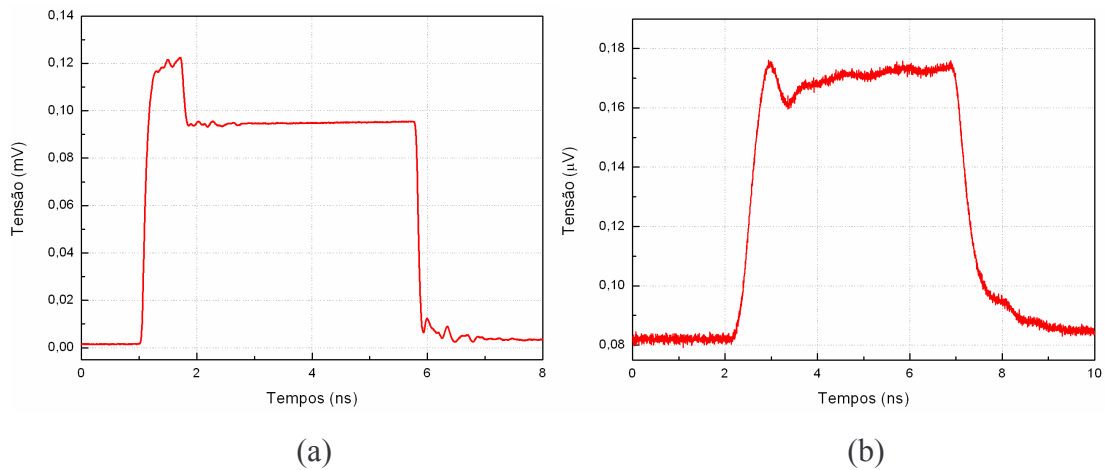


Fig. 5.3. Modelo para injeção de portadores por pulso duplo (a) antes de chegar ao dispositivo e (b) a resposta óptica do SOA após o processo de chaveamento sofrido.

5.3.3 Triplo (2 Steps)

Além do modelo de montagem utilizando um pré-pulso de injeção de corrente no dispositivo, foi proposta também a utilização de dois degraus de injeção para análise de uma possível melhoria nos tempos de resposta do chaveamento do SOA, pois com isso, espera-se que o nível de portadores seja incrementado dentro do dispositivo de forma gradativa e bastante rápida. Na Fig. 5.4 mostra-se o modelo de pulso elétrico com dois degraus no momento *on*, gerando por sua vez uma corrente de polarização de cerca de 125 mA e a resposta óptica após o chaveamento.

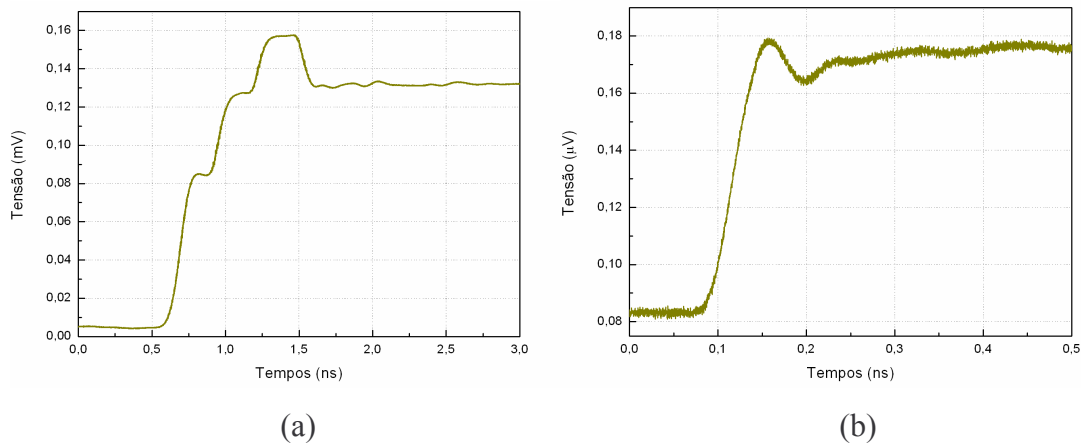


Fig. 5.4. Modelo para injeção de portadores por pulso triplo (a) antes de chegar ao dispositivo e (b) a resposta óptica do dispositivo após o chaveamento no SOA.

5.4. Resultados Obtidos

Os três resultados obtidos a partir das montagens apresentadas na sessão anterior são mostrados, analisados e comparados a seguir. Além da melhoria nos tempos de chaveamento propiciada pela técnica de pré-injeção, destaca-se a consequência dessa contribuição, que é uma possível diminuição na latência existente na rede e entre os pacotes, que, por sua vez, acarreta algumas vantagens às redes atuais de tráfego de pacotes em altas taxas [27-29].

Como já comentado em sessões e capítulos anteriores, para o experimento em questão utilizaram-se pacotes de tamanhos fixos e seqüências conhecidas, a fim de possibilitar uma análise mais precisa da técnica e do experimento. A indisponibilidade de

um analisador adequado para o estudo de pacotes variáveis no tempo de chegada e um dinamismo melhor na adequação do circuito de acionamento do SOA ao gerador de pacotes ópticos limitou investigações mais aprofundadas do assunto.

Contudo, a partir do estudo mostra-se o potencial de trabalhos futuros relativos à utilização da técnica PISIC em processamentos ópticos em redes de pacotes.

Resultados a seguir são apresentados enfatizando as melhorias nos tempos de respostas do dispositivo SOA em redes de tráfego de pacotes desprezando-se o processamento do cabeçalho para o acionamento da chave.

5.4.1. Chaveamento por pulso simples

Na Fig. 5.5, mostra-se a resposta óptica do SOA, ressaltando os tempos de chaveamento do dispositivo a partir da aplicação do pulso simples de portadores no dispositivo, obtidos por meio do osciloscópio óptico descrito no capítulo anterior. As análises são feitas, mais precisamente, no liga e desliga da chave, isto é, considera-se o ponto para análise no primeiro e último bit da informação contido no pacote. Observando-se, justamente, o limite no tempo de chaveamento antes que a chave deteriore os bits iniciais e finais do *payload*.

Os tempos de resposta (*on* e *off*) são calculados baseados em cálculos de tempo de subida e descida de dispositivos, neste caso não seguindo a regra de 90/10 da sua porcentagem total [5-7] e, sim, levando em consideração o tempo total.

Os tempos obtidos no experimento acima foram próximos aos esperados e relatados na literatura, em torno de 4,0 ns para liga e desliga (*on/off*). Contudo, vale salientar que além do sincronismo feito entre o circuito eletrônico e o gerador de pacotes, os tempos foram ajustados aos melhores possíveis para que não ocorressem deteriorações nos bits iniciais e finais (ver Fig.5.5) [27].

5.4.2. Chaveamento por pulso duplo (Pisic 1 step)

Para o chaveamento por pulso duplo, esperavam-se melhorias consideráveis tanto nos tempos de liga como no de desliga da chave, a partir de estudos feitos no comportamento intrínseco do dispositivo e nas simulações antes realizadas pelo grupo com a técnica de pré-injeção de corrente. Comprovou-se, então, essa melhoria e a redução para

cerca de 400 ps nos tempos compreendidos entre o *on* e *off* da chave nos pacotes a serem chaveados. Ressalta-se que para tais tempos não houve nenhuma deterioração nos bits de início e fim, passíveis de perda de informação.

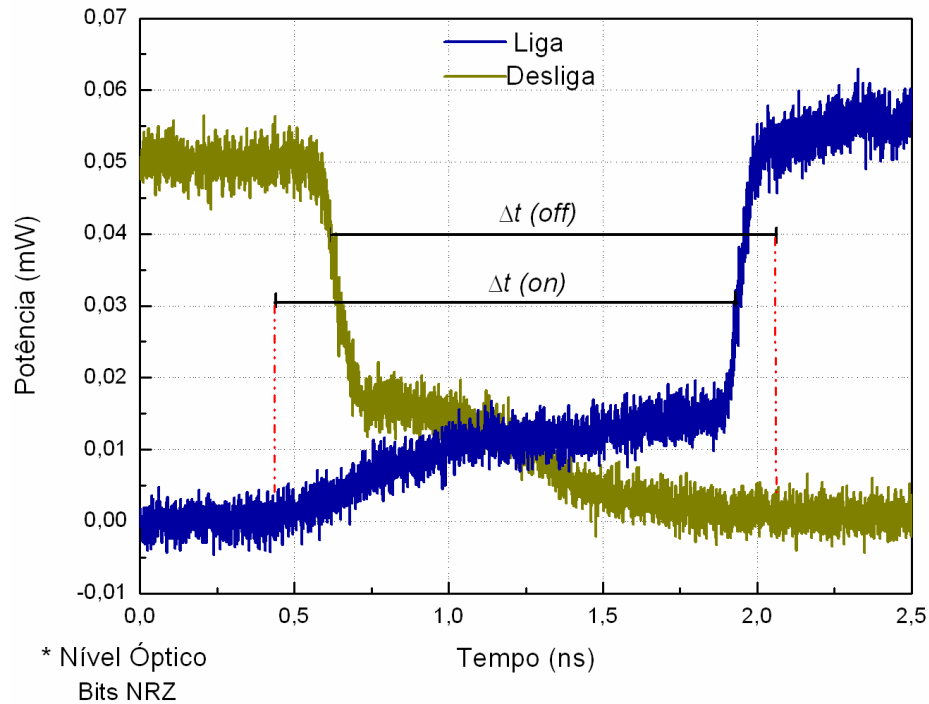


Fig. 5.5. Resposta óptica após o chaveamento da informação ao utilizar pulso simples para acionamento do circuito eletrônico.

Na Fig. 5.6, apresentam-se as respostas ópticas após o chaveamento utilizando o PISIC de um degrau (ver Fig. 5.3) e ressaltam-se os tempos obtidos. É válido levar em consideração que os tempos de subida e descida dos equipamentos utilizados foram os mesmos, bem como os retardos sofridos pelos cabos de microondas, cordões ópticos e dispositivos envolvidos no experimento anterior.

A redução nos tempos de chaveamento da chave de cerca de 10 vezes contribui de forma explícita para o incremento de maiores tráfegos e/ou diminuição drástica na latência da rede. Posteriormente, este assunto será novamente abordado para a discussão das propostas de utilização da técnica em redes de chaveamento de pacotes ópticos [28-29].

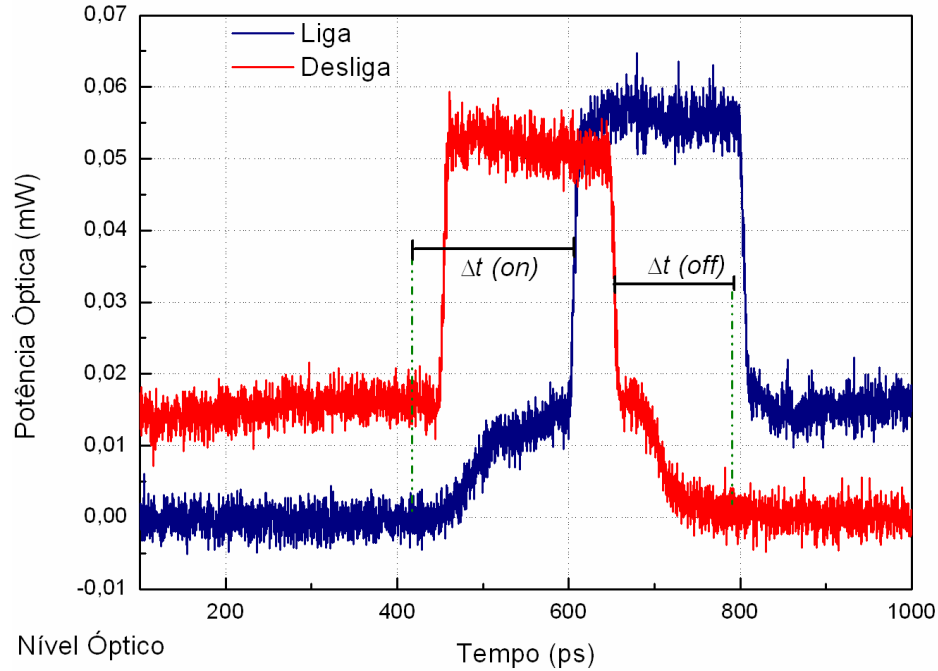


Fig. 5.6. Resposta óptica do SOA após processo de chaveamento da informação por pulso duplo.

5.4.3 Chaveamento por pulso triplo (Pisic 2 step)

No experimento utilizando o chaveamento com pulso elétrico, PISIC, de dois degraus, os tempos de chaveamento obtidos foram semelhantes aos tempos obtidos no experimento com PISIC de um degrau. Com isto, conclui-se que a essência da melhoria do processo de chaveamento se dá, basicamente, pela injeção de portadores suficiente para suprir a necessidade de lacunas vagas no início do acionamento da chave SOA, levando assim a amplificação da informação desde o seu acoplamento na cavidade do dispositivo e eliminando o tempo que o mesmo precisa para chegar ao seu ponto ótimo de operação.

Contudo, como apresentado nas Fig. 5.7 e 5.8, mostra-se a resposta óptica do SOA após o processo de chaveamento, porém utilizando-se do princípio de relação de sensibilidade (*sensitivity*) do funcionamento de um fotodetector utilizado comercialmente, analisou-se como uma possível deterioração de 10% do bit iria influenciar nos tempos de resposta obtidos, partindo da relação 90/10 [5-7]. Conclui-se que resultados promissores foram observados e possíveis implementações nesse âmbito são passíveis de análises futuras.

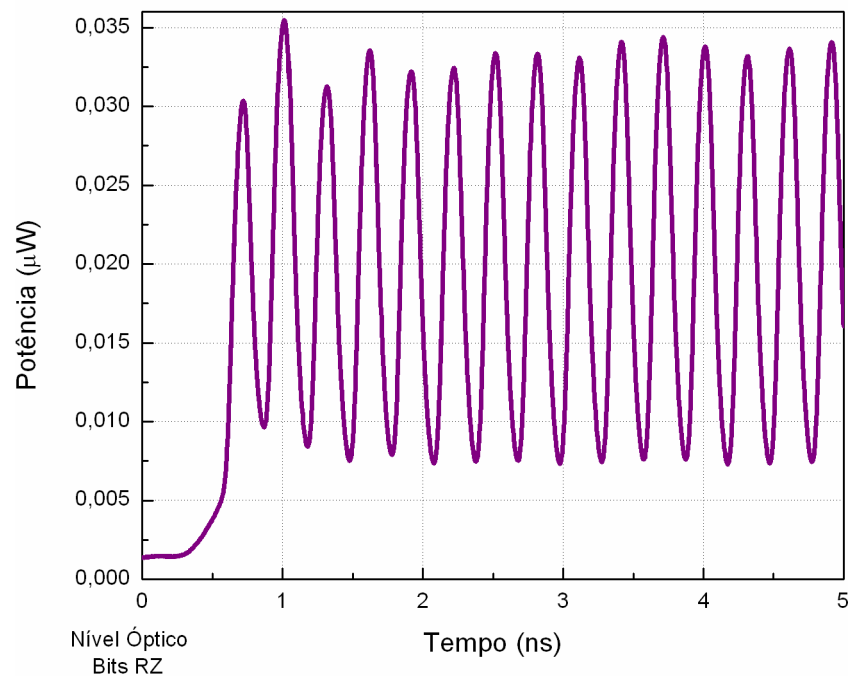


Fig. 5.7. Resposta óptica do SOA após sofrer chaveamento óptico com níveis de deterioração no bit inicial compreendido na relação 90/10.

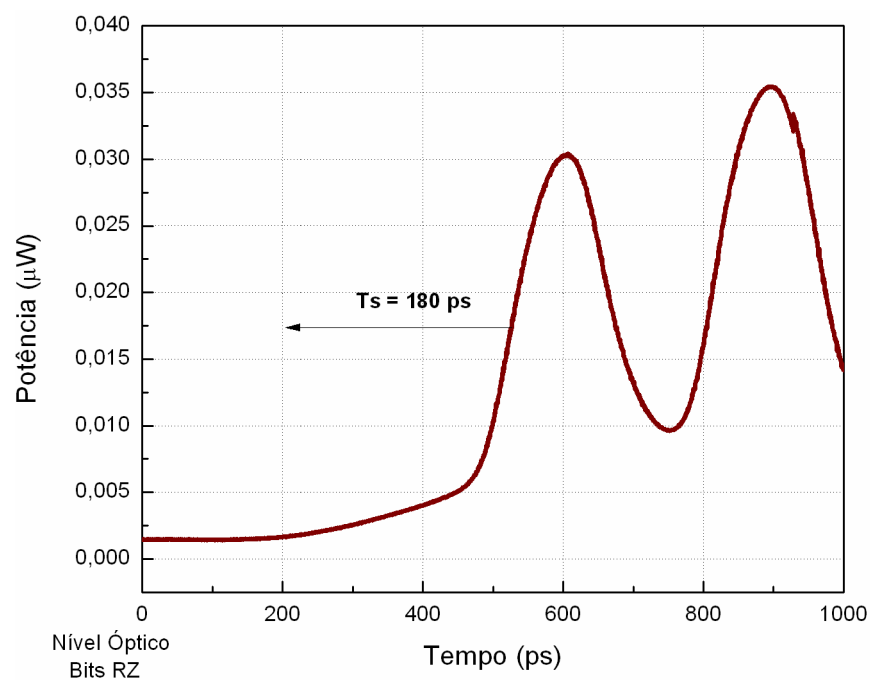


Fig. 5.8. Tempo de subida do bit inicial da informação ou chaveamento considerando-se uma deterioração de 10% do bit.

Do ponto de vista sistêmico e aplicável às redes de chaveamento de pacotes ópticos, essa análise foi viável. Já que essa regra de 90/10 é bastante implementada na detecção de sinais nos fotodetectores, alcançando tempos na ordem de 180 ps de subida. Por outro lado, deve-se analisar o aspecto de funcionamento do fotodetector em relação à sua carga e aspectos direcionados a ruídos que porventura possam aparecer ao longo de uma transmissão.

5.4.4. Chaveamento por pulso PISIC idealizado

A partir das análises das propostas levantadas para a melhor elaboração do PISIC a ser injetado no dispositivo SOA, chegou-se à conclusão que o PISIC idealizado, nesse âmbito de estudo, seria aquele com o menor tempo de subida, isto é, um tempo quase instantâneo. Assim, a injeção de portadores no início do acionamento seria imediata, evitando desta forma os atrasos nos tempos de resposta do dispositivo, estes por sua vez responsáveis pelas deteriorações nos bits iniciais e finais.

Porém sabe-se que a elaboração de um pulso com tempo de subida irrelevante ou instantâneo é impossível, pois existem as limitações elétricas e eletrônicas dos equipamentos e cabos de transmissão utilizados para construção do experimento. Contudo simulou-se a aplicação desse tipo de injeção, adaptando-o aos tempos exigidos. Apresenta-se, na Fig. 5.9, a proposta levantada de qual seria a forma do PISIC idealizado.

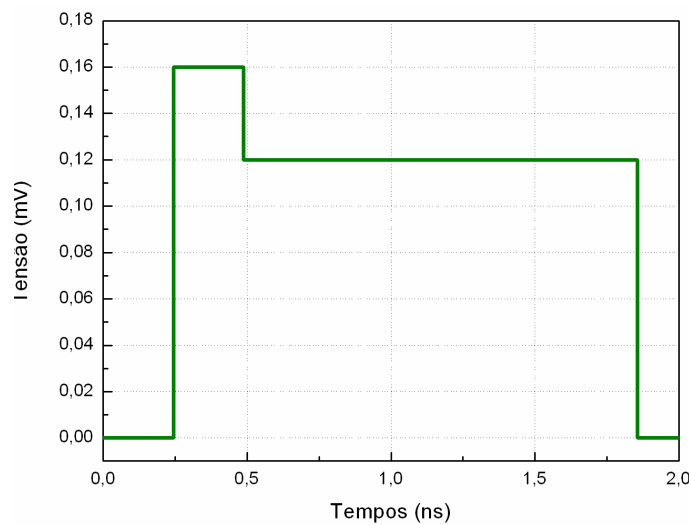


Fig. 5.9. Modelo simulado de PISIC idealizado antes de chegar ao dispositivo SOA.

Com isso, a partir do *software* de simulação Z-SOA, desenvolvido pelo grupo, que simula o comportamento de SOAs, foi testado qual seria o melhor formato de pulso a ser aplicado no dispositivo, com boa probabilidade de redução nos tempos do SOA.

Durante as simulações, foram consideradas características reais de operação, como os parâmetros intrínsecos ao dispositivo e, principalmente, os tempos de subida e descida dos geradores, nesse caso fixado em valores de cerca de 25 ps. Por outro lado, foram desprezados os retardos ocasionados pelos cabos e, principalmente, o ocasionado pelo encapsulamento do dispositivo.

Na Fig. 5.10 é apresentada a interface gráfica do simulador, destacando-se os campos para preenchimento dos parâmetros intrínsecos do dispositivo e os locais para carregar as formas de onda de entrada e a corrente de polarização no SOA.

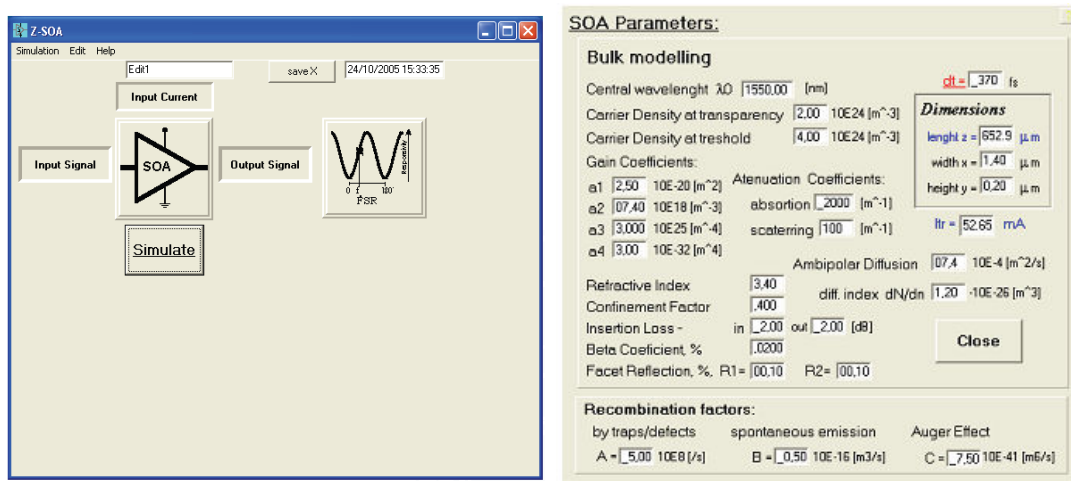


Fig. 5.10. Interface gráfica do software de simulação Z-SOA.

Os resultados obtidos foram promissores, limitando-se o chaveamento ao tempo de recombinação no processo de geração de fótons, como mencionado no Capítulo 3, e, especialmente, aos tempos de subida e descida da geração dos padrões de pulsos de controle pelos geradores. Na Fig. 5.11 mostra-se, desta forma, a resposta óptica simulada a partir da aplicação do PISIC idealizado. É importante se ressaltar que as oscilações existentes no pico inicial do pacote, devido a efeitos parasitas (capacitivos e indutivos) do encapsulamento do SOA e da linha de transmissão formada pelo cabo de microondas envolvido na montagem, não foram simulados.

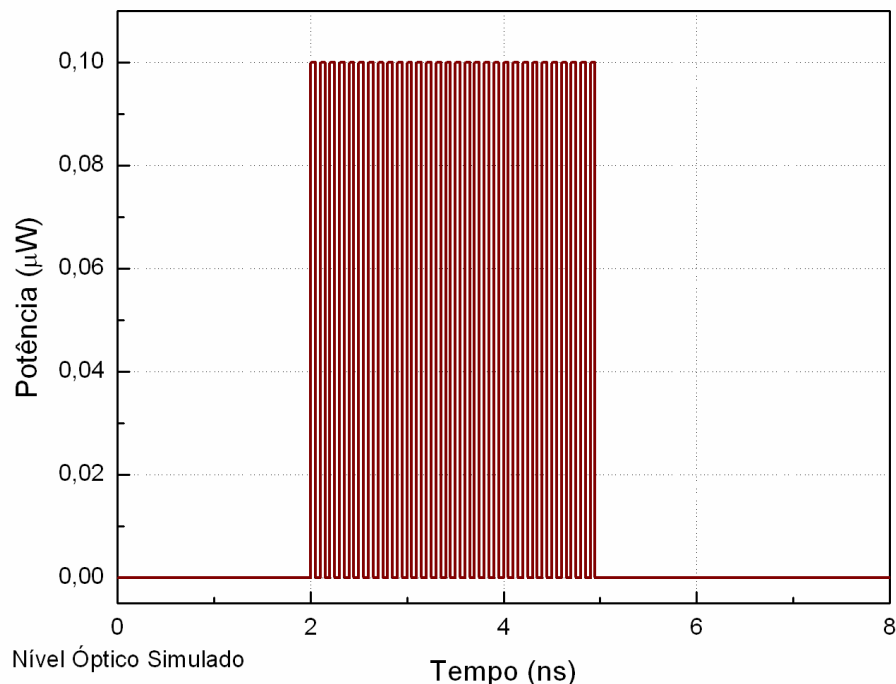


Fig. 5.11. Resposta óptica simulada após o chaveamento com PISIC idealizado.

5.5. Testes na rede KyaTera

Para uma análise de forma sistêmica e adaptada a um possível ambiente de rede, o experimento foi testado numa rede de tráfego de dados de alta velocidade instalada no Estado de São Paulo, sob financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, para o desenvolvimento de projetos acadêmicos, como descrito no Capítulo 4.

Do ponto de vista técnico, foram analisados os efeitos dispersivos sofridos ao longo do trajeto pelos pulsos trafegados num trecho de cerca de 50 km e taxa de 10 Gb/s.

Notou-se que não ocorreram tantas influências das dispersões sofridas com o processo de chaveamento devido, provavelmente, ao tamanho do percurso submetido. Notando-se, assim, quase que somente a perda de potência óptica, ocasionada, provavelmente, pela atenuação sofrida ao longo do trajeto e das emendas, que é cerca de 0,2 dB/km na fibra e 1,5 dB nas emendas ou transições.

Na Fig. 5.12 é apresentada a resposta óptica após a aplicação da técnica de chaveamento da informação por PISIC de um degrau. O processo na rede se dá

primeiramente com a passagem da informação pelo trecho do enlace e logo após o percurso é feito o processo de chaveamento.

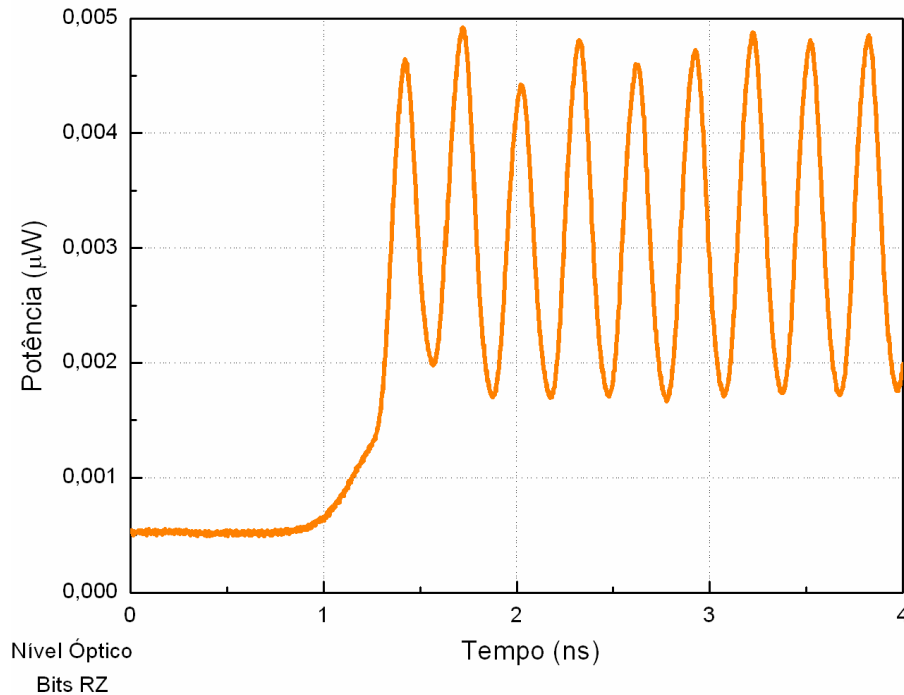


Fig.5.12. Chaveamento após tráfego na rede KyaTera

5.6. Melhor latência ou aumento de tráfego

Numa situação onde todo o processo de tráfego na rede e o encaminhamento da informação para o destino escolhido são considerados, quer para uma condição onde a chave funciona para bloquear a informação (caminho único, como o analisado), quer para uma situação onde se opera com um outro SOA em paralelo (caminho duplo) ou vários outros, o chaveamento via PISIC resultaria numa melhoria considerável do tempo total de chaveamento. Desta forma, através dos dados obtidos, é interessante fazer uma associação entre a utilização dessa técnica em redes com chaveamento de pacotes ópticos e a diminuição na latência do tráfego dos pacotes.

Por exemplo, considerando o caso de redes OPS com pacotes de tamanhos fixos e tempos variáveis de chegada de pacotes, modelados por uma distribuição de Poisson, conforme apresentado no Capítulo 2. Além disto, assumindo a utilização do protocolo

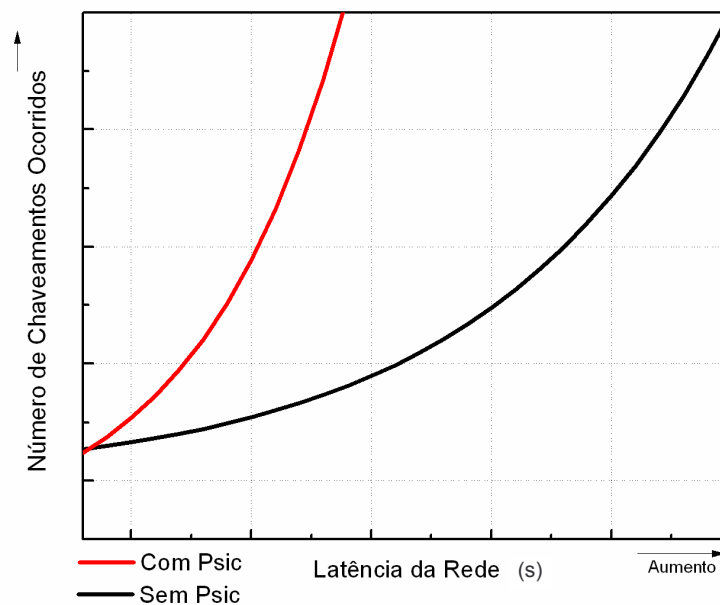
Internet, com datagrama de tamanho mínimo de 20 bytes e máximo de 65.535 (64 kbytes), pois o tamanho máximo do datagrama que qualquer nó requer para estar apto a manusear a informação é 576 bytes (apesar da existência de nós mais modernos, que manuseiam pacotes bem maiores) [27]. Com base nestes aspectos, a configuração do tráfego adotada nesta análise é àquela de uma rede de 10 Gb/s e pacotes com tamanhos fixos de 100 bytes, para efeitos de simplificação de cálculos e melhor entendimento. Portanto, tomando-se como base o fato de que as chaves comerciais que utilizam SOAs demoram, em média, cerca de 4,0 ns para efetuar o processo de liga/desliga, os resultados obtidos a partir do experimento aqui apresentado mostram que é possível aumentar a capacidade no tráfego da rede em cerca de, em média, 40 bits por cada processo de chaveamento que ocorre na rede ou no nó em questão, ou, ainda, de diminuir a latência para obtenção de um melhor desempenho no tempo de percurso da informação.

Para efeito de compreensão, a Tabela 5.1 mostra a análise acima detalhada para uma rede com o tráfego variando de 10 a 10^{10} pacotes num dado intervalo de tempo e que irão sofrer chaveamento. Vale ressaltar que o número de chaveamentos na rede é aleatório, para facilitar a compreensão. Além disto, o número de processos de chaveamento na rede está diretamente relacionado ao número de pacotes trafegados que irão sofrer roteamento ou algum outro tipo de processamento que necessite o seu direcionamento de rota através da técnica de chaveamento, em particular, utilizando o SOA. Com isso, na primeira coluna mostra-se o número de chaveamentos sofridos num dado intervalo de tempo, na segunda coluna o número de pacotes possíveis, a mais, a serem trafegados no mesmo intervalo de tempo e na terceira o tempo possível para diminuição da latência através da diminuição do tempo de guarda ao invés do incremento de pacotes.

Para composição da tabela utilizou-se o *software Network Simulator* (NS) com os parâmetros mencionados acima, sem levar em considerações alguns efeitos na rede. Porém, sabe-se que a relação entre o número de chaveamentos e a latência não é totalmente linear, pois existem alguns parâmetros da rede que são variáveis, como atrasos e tempos de processamento. Portanto, mostra-se na Fig. 5.13, de forma generalizada, o comportamento dessa relação entre a latência e os chaveamentos com e sem aplicação da técnica PISIC, levando em consideração possíveis atrasos e/ou efeitos no tráfego de uma dada rede.

Tabela 5.1. Análise do aumento de tráfego de pacotes e/ou diminuição do tempo total de tráfego.

Número de chaveamentos com PISIC na rede	Número de pacotes a mais possível a trafegar na rede	Tempo total de diminuição na latência da rede (ns)
10^2	5	4×10^2
10^3	5×10	4×10^3
10^4	5×10^2	4×10^4
10^5	5×10^3	4×10^5
10^6	5×10^4	4×10^6
10^7	5×10^5	4×10^7
10^8	5×10^6	4×10^8
10^9	5×10^7	4×10^9
10^{10}	5×10^8	4×10^{10}

**Fig. 5.13.** Relação entre a latência e o chaveamento óptico com e sem aplicação da técnica PISIC.

5.7. Conclusões

Apresentou-se uma análise experimental da utilização de uma técnica ultra-rápida de chaveamento óptico e as implicações da utilização desta no comprometimento e tráfego da informação em uma rede.

A técnica utilizada foi baseada na pré-injeção de corrente num amplificador óptico a semiconductor, onde um pulso de curta duração é sobreposto a um pulso simples de corrente. Os resultados desta técnica foram comparados aos de técnicas convencionais de

chaveamento de SOAs, as quais são conhecidas e utilizadas comercialmente. Foi observada uma redução considerável do tempo de chaveamento para cerca de 180 ps, com a técnica PISIC, sugerindo que é possível uma melhoria expressiva dos gargalos das redes ópticas apreciadas no processo de comparação [27].

Conseqüentemente, os congestionamentos observados em nós ópticos poderão ser diminuídos devido ao menor tempo de processamento da informação, gerando, assim, uma menor latência na rede de pacotes. Além disto, com melhoria dos tempos de chaveamento, pode-se, por exemplo, aumentar o número de pacotes trafegados nas redes em malha ou proporcionar uma diminuição no tempo de guarda entre os pacotes. Dessa forma, garante-se uma melhor eficiência na utilização da banda passante fornecida naquele momento.

6. Considerações Finais

Apresentou-se o estudo teórico das redes ópticas de tráfego de dados, embasando, desta forma, o motivo e onde se poderiam aplicar os resultados do projeto desenvolvido. A modelagem matemática e uma breve introdução do funcionamento intrínseco do dispositivo SOA foram apresentadas, assim como todo o processo de montagem experimental e a descrição dos equipamentos envolvidos para elaboração do projeto, mostrando suas principais características físicas e funcionais.

Posteriormente, foram mostrados todos os resultados obtidos nos experimentos elaborados e a obtenção de resultados teóricos esperados através de simulações computacionais.

Portanto, a técnica de injeção de portadores, utilizando SOA para chaveamento óptico, foi apresentada e estudada de forma mais próxima do ambiente real, neste trabalho. Para tanto, o estudo do SOA, importante dispositivo cada vez mais utilizado no processamento totalmente óptico do sinal, foi realizado levando-se em conta seus efeitos para sua utilização como chave.

As montagens experimentais e o processo de aplicação da técnica foram desenvolvidos de forma a se adequarem a padrões exigidos pelos requisitos de aplicações das redes de chaveamento fotônico.

Entre outros aspectos destacados, para enfatizar a viabilização da investigação na utilização de SOAs com boas respostas nos tempos de processamento da informação, pode-se ressaltar o emprego deste método no aumento da capacidade de tráfego nas redes com alto fluxo de transmissão de informações e, principalmente, nas redes que possuem um

grande tempo de retardo de chegada dos pacotes (latência total), os quais se caracterizam hoje como sendo os grandes gargalos das redes atuais de última milha.

Ainda na visão tecnológica, as análises feitas utilizando a rede estável de altas taxas de transmissão, KyaTera, foram produtivas no âmbito sistêmico. Portanto, foi propiciado um estudo do processo de forma não só laboratorial, mas também de maneira real, isto é, em ambiente idêntico aos utilizados em redes ópticas comerciais de dados.

Entretanto, após todos os experimentos realizados, utilizou-se do simulador Z-SOA e o NS para um comparativo dos resultados teóricos aos experimentais.

Em visão geral, o estudo para redução nos tempos de chaveamento óptico, utilizando SOA, foram promissores e apresentaram resultados bons ao serem comparados aos existentes sem a técnica de pré-injeção de portadores no dispositivo. Isso reforça a importância desse dispositivo e dessa técnica nas redes com processamento óptico, onde a demanda por melhores taxas de transmissão e melhores tempos é crescente e contínua.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, o primeiro passo seria o processo de chaveamento ser controlado pelo cabeçalho da informação, isto é, o circuito de acionamento, ao invés de ser sincronizado com o *payload*, seria comandado pelo *header*, se aproximando mais ainda da realidade de redes ópticas com protocolo IP.

Um segundo estágio seria a utilização de vários SOAs em paralelo, propiciando múltiplas saídas e diversas possibilidades de rotas distintas. Estes dispositivos, por sua vez, teriam o seu controle por meio de um circuito eletrônico de acionamento baseado na leitura do cabeçalho da informação.

Desta forma, propõe-se, também, para trabalhos futuros um estudo mais aprofundado da aplicabilidade da técnica em redes ópticas comerciais. Agrega-se, desta forma, o conhecimento estudado e desenvolvido em ambiente de pesquisa à sociedade tecnológica.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, *Optical Networks- A practical perspective*, Academic Press, 1^a ed., San Diego, 2002.
- [2] U. Black, *Optical Networks – Third Generation Transport Systems*, Prentice Hall, 1^a ed., New Jersey, 2002.
- [3] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems*, Wiley Series, 2^a ed., New York, 1997.
- [4] C. Guillemot et al., “Transparent Optical Packet Switching: The European ACTS KEOPS Project Approach”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, pp. 2117-2134, 1998.
- [5] K. Bengi, *Optical Packet Access Protocols for WDM Networks*, Kap, 1^a ed., Massachusetts, 2002.
- [6] C. K. Chan, F. Tong, L. K. Chen, K. W. Cheung, e E. Kong, “Node architecture and protocol of a packet-switched dense WDMA metropolitan area network,” *J. Lightwave Technol.*, pp. 2206–2218, 1999.
- [7] D. J. Blumenthal, et al., “Optical signal processing for optical packet switching networks”, *IEEE Opt. Comm.*, S23-S29, 2003.
- [8] B. Meagher et al., “Design and implementation of ultra-low latency optical label switching for packet-switched WDM networks,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, no. 12, pp. 1978–87, 2000.
- [9] C. M. Gallep et al., “Reduction of semiconductor optical amplifier switching times by preimpulse step-injected current technique”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 7, 2002.
- [10] A. Viswanathan, N. Feldman, Z. Wang, e R. Callon, “Evolution of multiprotocol label switching,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 5, pp. 165-173, 1998.
- [11] J. S. Turner, “WDM burst switching for petabit data networks,” *Anais do OFC’00*, Baltimore, MD, WD2, pp. 1-4, 2000.
- [12] Y. Suemura, S. Takahashi, S. Araki, et al., “Terabit opto-electronic packet switch demonstrator”, Technical report of IEICE, SSE99-13 1.
- [13] M. Y. Jeon et al., “Demonstration of all-optical packet switching routers with optical label swapping and 2R regeneration for scalable optical label switching network applications,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no.11, pp. 2723–2733, 2003.

- [14] C. M. Gallep, “*Redução do tempo de chaveamento eletroóptico em amplificadores ópticos a semiconductor*”, Tese de Doutorado FEEC/UNICAMP, 2003.
- [15] G. P. Agrawal, *Semiconductors lasers*, 2^a ed., New York, 1993.
- [16] R. J. Manning, A. D. Ellis, A.J. Poustie e K.J. Blew, “*Semiconductor laser amplifier for ultrafast all-optical signal processing*”, *J. Optical Society of America B*, vol.14, no. 11, pp 3204-3216, 1997.
- [17] Y. Shibata, Y. Yamada, K. Habara e N. Yoshimoto, “*Semiconductor laser diode optical amplifiers/gates in photonic packet switching*”, *J. Lightwave Technol.*, vol.16, no. 12, pp 2228-2235, 1998.
- [18] M. Connelly, “*Semiconductor optical omplifiers and their applications*”, Anais da IASTED, International Conference on Optical Communications Systems and Networks, Banff, Canada, 2005.
- [19] A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, Mill Valley, CA, 1986.
- [20] T. E. Darcie e R. M. Jopson, “*Nonlinear interactions in optical amplifiers for multifrequency lightwave systems*”, *Electron Lett.*, vol.24, no.10, 1988.
- [21] A. Ehhardt, M. Eiselt, G. Grobkopf, L. Kuller, R. Ludwig, W. Pieper, R. Schnabel e H. G. Weber, “*Semiconductor optical amplifier as optical switching gate*”, *J. Lightwave Technol.*, vol.11, no. 8, 1993.
- [22] M.J.Adams, D.A.O.Davies, M.C. Tatham, M.A. Fisher, “*Nonlinearities in semiconductor optical amplifiers*”, *Optical and Quantum Electronics*, vol.27, pp. 1-13, 1995.
- [23] C. M. Gallep, “*Não-linearidades em amplificadores ópticos a semiconductor: causas, efeitos e aplicações*,” Seminário FI 197, 1999.
- [24] A. L. Rayol, “*Conversão em Comprimento de Onda via Modulação Cruzada de Ganho Utilizando Amplificador Óptico a Semiconductor*”, Tese de Mestrado, FEEC UNICAMP, 2004.
- [25] D. Chiaroni, B. Lavigne, A. Jourdan, M. Sotom, L. Hamon, C. Chauzat, J. C. Jacquinet, A. Barroso, T. Zami et al., “*Physical and logical validation of a network based on all-optical packet switching systems*,” *J. Lightwave Technol.*, vol.16, pp. 2255-2263, 1998.
- [26] www.ietf.org.br

- [27] R. N. Carvalho, E. Conforti e A. C. Bordonalli “*Redução da latência em redes de pacotes ópticos por técnica ultra-rápida de chaveamento*”, Anais do MOMAG 2008, 13º SBMO, Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 8º CBMag, Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Florianópolis, 2008.