



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SEMICONDUTORES, INSTRUMENTAÇÃO E
FOTÔNICA.**

**Desenvolvimento de Nós de Chaveamento de Pacotes
Ópticos para Aplicação em Redes Metropolitanas de
Acesso**

Décio Maia Junior

Orientador: Prof. Dr. Edson Moschim

Co-Orientador: Dr. Felipe Rudge

Composição da Banca Examinadora:

Dr. Felipe Rudge – Fundação CPqD/Campinas - Presidente

Prof^a. Dra. Maria Aparecida Martinez – Universidade Mackenzie / São Paulo

Prof. Dr. Mário Tosi Furtado – Fundação CPqD / Campinas

Prof. Dr. Luis Carlos Kretly – FEEC/Unicamp / Campinas

Prof. Dr. Furio Daminai – FEEC/Unicamp / Campinas

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Campinas, Junho de 2005.

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

M28d	Maia Junior, Décio Desenvolvimento de nós de chaveamento de pacotes ópticos para aplicação em redes metropolitanas de acesso / Décio Maia Junior. --Campinas, SP: [s.n.], 2005. Orientadores: Edson Moschim, Felipe Rudge Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 1. Comunicações óticas. 2. Fibras óticas. I3. Comutação de pacotes (Transmissão de dados). 4. Telecomunicações – Sistemas de comutação. I. Moschim, Edson. II. Rudge, Felipe. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.
------	---

Titulo em Inglês: Development of optical packet switching nodes for application in metro-access networks

Palavras-chave em Inglês: Optical communications, Optical fibers, packet switching data transmission, telecommunications switching systems

Área de concentração: Eletrônica, Optoeletrônica e Microeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Maria Aparecida Martinez, Mário Tosi Furtado, Luis Carlos Kretly e Furio Daminai

Data da defesa: 23/06/2005

**Dedico este trabalho aos meus Pais,
Décio Maia e Maria Márcia de Paula Maia,
pessoas de fibra e disposição, que me ensinaram
a trilhar os caminhos da honestidade e do bem, e aos
quais quero deixar explícita minha admiração
e eterna gratidão para com eles.**

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a FEEC/Unicamp e ao meu orientador Prof. Dr. Edson Moschim, que muito ajudou e foi compreensivo o bastante durante a elaboração deste trabalho.

Um agradecimento especial à Fundação CPqD, dentro da qual foi desenvolvido todo o trabalho, oportunidade esta dada pelo Dr. Paradisi, responsável pela gerencia de sistemas de comunicações ópticas - CPqD e ao meu co-orientador e grande amigo Dr. Felipe Rudge, que dentro de seu jeito todo particular de ser me ensinou muito, e conduziu este trabalho do modo mais adequado. Felipão, a você deixo toda minha admiração e gratidão, sem você eu teria me perdido no meio do caminho, muito obrigado pelos conselhos profissionais e pessoais, além de me ensinar um pouco mais de Rock' n Roll.

Quero agradecer também aos meus amigos do CPqD que sempre estiveram a disposição para me ajudar e me ensinar. Ao Ronaldo Ferreira, companheiro no início do desenvolvimento do trabalho; Antonio Sachs, essencial durante o desenvolvimento de todo trabalho e que muito me ensinou na parte de software; Leonardo Pezzolo, sempre a disposição para ajudar a solucionar os problemas com a parte eletrônica do trabalho; Mário Furtado, com quem fiz a entrevista para estágio e abriu as portas para mim. As outras pessoas não menos importantes, Borin; Mônica; Miriam; Valentino; Julio; Sandro; Mobilon; Amauri; Rosolem, enfim a todos da Fundação CPqD.

Quero deixar um agradecimento especial aos meus amigos de hoje e de sempre e aos amigos que conquistei durante o tempo em que estive na Unicamp.

RESUMO

Um novo sistema para geração, chaveamento e roteamento de pacotes ópticos é descrito, visando aplicação em nós de redes ópticas de próxima geração (NGON). Os pacotes ópticos são compostos por um campo de cabeçalho em frequência e um campo de carga útil digital de alta capacidade ($\sim$ Gb/s). Os nós de chaveamento óptico incluem as funcionalidades de bloqueio, roteamento e retirada de pacotes, e são controlados por circuitos eletrônicos lógicos que rapidamente processam a informação contida no cabeçalho dos pacotes ópticos, permitindo baixa latência. O chaveamento é realizado pacote-a-pacote, e o tempo de reconhecimento do cabeçalho e chaveamento dos pacotes ópticos é de alguns microssegundos ($\sim\mu$ s). Este sistema apresenta arquitetura simples, operação eficiente, e pode ser visto como uma solução atrativa nos aspectos técnicos e econômicos, aplicável a redes metropolitanas de acesso e, demonstra-se totalmente compatível com redes ópticas WDM.

ABSTRACT

A new system for the generation, switching and routing of optical packets is described, aimed for use in nodes of next-generation optical networks (NGON). The optical packets are composed of an in-band frequency tone header, and a high-capacity transparent digital payload ($\sim$ Gb/s), occupying separate fields. The optical node switching action includes blocking, routing and drop functions, controlled by electronic logic circuits, performed on a packet-by-packet basis, with only the header information being processed. Total header processing and optical packet switching time is few micro seconds ($\sim\mu$ s). This system is designed as a techno-economical solution for metro-access transport, having low latency and low packet loss, being fully compatible with WDM optical networks.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE ACRÔNIMOS	X
I) LISTA DE ACRÔNIMOS INTERNACIONAIS	X
II) LISTA DE ACRÔNIMOS INTERNAS	XI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REDES DE PACOTES ÓPTICOS PARA APLICAÇÃO METROPOLITANA E ACESSO	5
2.1 – TÉCNICAS DE CODIFICAÇÃO DE PACOTES ÓPTICOS	7
2.1.1 – <i>OCDM</i>	7
2.1.2 – <i>OTDM</i>	8
2.1.3 – <i>SCM</i>	9
2.1.4 – <i>FDM</i>	9
2.2 – PROPOSTAS E IMPLEMENTAÇÕES PARA CHAVEAMENTO DE PACOTES ÓPTICOS	10
2.2.1 – <i>OPERA</i>	10
2.2.2 – <i>KEOPS</i>	11
2.2.3 – <i>DAVID</i>	13
2.2.4 – <i>HORNET</i>	14
2.3 – REDES ÓPTICAS DE ACESSO	14
2.3.1 – <i>Arquitetura em Malha para Redes ópticas de Acesso</i>	15
2.3.2 – <i>Benefícios de Redes em Malha</i>	18
2.4 – PROPOSTA DE ARQUITETURA DE REDE E ESTRUTURA DO NÓ ÓPTICO	20
CAPÍTULO 3 – TRÁFEGO DE PACOTES ÓPTICOS EM REDES DE ACESSO COM COMUTAÇÃO ÓPTICA	25
3.1 – ESQUEMA DE ENDEREÇAMENTO E DEFINIÇÃO DA TÉCNICA DE ROTEAMENTO.....	25
3.2 – SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO DE PACOTES ÓPTICOS COM NS.....	27
3.3 – <i>MODELO ANALÍTICO PARA AVALIAR VAZÃO, ATRASO E VARIAÇÃO ATRASO</i>	30
3.3.1 – <i>Modelo Estatístico</i>	30
3.3.2 – <i>Resultados Alcançados</i>	33
CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE NÓS DE CHAVEAMENTO DE PACOTES ÓPTICOS TIPO <i>SPREAD HEADER</i>.....	37
4.1 – <i>PACOTES COM CABEÇALHO EM FREQUÊNCIA: SOLUÇÃO SH</i>	37
4.2 – <i>GERAÇÃO DE PACOTES ÓPTICOS SH</i>	38
4.3 – <i>CIRCUITO DE DETECÇÃO E RECONHECIMENTO DE PACOTES ÓPTICOS SH</i>	40
4.4 – <i>CHAVEAMENTO DE PACOTES SH COM RECONHECIMENTO DE CABEÇALHO POR FILTROS RF</i>	42
4.4.1 – <i>Discussão dos Resultados</i>	46
4.5 – <i>CHAVEAMENTO DE PACOTES SH ATRAVÉS DE RECONHECIMENTO DE CABEÇALHO COM CRISTAL OSCILADOR</i>	47
4.6 – <i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	51
CAPÍTULO 5 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE NÓS DE CHAVEAMENTO DE PACOTES ÓPTICOS TIPO <i>FIELD HEADER - FH</i>	53
5.1 – <i>ESTRUTURA DOS PACOTES FH</i>	53

5.2 – GERAÇÃO DOS PACOTES ÓPTICOS FH	54
5.3 – RECONHECIMENTO DE PACOTES ÓPTICOS FH – CIRCUITO HRC	56
5.4 – EXPERIMENTOS PRÁTICOS COM PACOTES ÓPTICOS FH.....	58
5.4.1 – Chaveamento de Pacotes FH com Chaves AO – Configuração 2x[1x2].....	58
5.5 - CIRCUITO LÓGICO DE DECISÃO DE CONTENDAS - LDC	63
5.6 – EXPERIMENTOS ADOTANDO TOPOLOGIA DE REDE 2X2.....	68
5.6.1 - Chaveamento e Roteamento de Pacotes FH – Configuração 2x2	68
5.6.2 - Roteamento de Pacotes Ópticos.	71
5.6.3 – Roteamento de Pacotes FH – Função Remoção de Pacotes.....	74
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	77
CAPÍTULO 7 - TRABALHOS FUTUROS.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
TRABALHOS PUBLICADOS.....	87
APÊNDICE A - CÓDIGO MATLAB – EXEMPLO REDE MS COM 9 NÓS	89
APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO CHAVE ELETRO-ÓPTICA	91
APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO CHAVE ACUSTO-ÓPTICA.....	97
APÊNDICE D - RECEPTOR DE PACOTES ÓPTICOS.....	99

LISTA DE FIGURAS

FIG. 1 – ILUSTRAÇÃO DAS FUNCIONALIDADES DO CHAVEAMENTO DE PACOTES ÓPTICOS	6
FIG. 2 - DIAGRAMA DO PACOTE ÓPTICO DO PROJETO KEOPS.....	12
FIG. 3 – TOPOLOGIA EM MALHA DISTRIBUÍDA AO LONGO DE UMA REDE ÓPTICA.....	17
FIG. 4 – INTERCONEXÃO SISTEMAS WDM COM A REDE LIMOPS (A); INTERCONEXÃO ENTRE OS NÓS DA REDE LIMOPS (B).....	21
FIG. 5 – ESTRUTURA DO NÓ ÓPTICO PARA CHAVEAMENTO DE PACOTES: (A) PROPOSTA INICIAL; (B) PROPOSTA FUTURA	22
FIG. 6 – PROPOSTA DE ENDEREÇAMENTO DE NÓS PARA REDE MS	26
FIG. 7 – TRÁFEGOS ADOTADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE PACOTES ÓPTICOS	28
FIG. 8 – TOPOLOGIAS SIMULADAS: A) 4 NÓS; B) 16 NÓS	28
FIG. 9 – COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTOCOLOS SPF E DR COM TRÁFEGO CPCI: A) 4 NÓS; B) 16 NÓS	29
FIG. 10 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTOCOLOS SPF E DR COM TRÁFEGO CPVI: A) 4 NÓS; B) 16 NÓS	29
FIG. 11 – TOPOLOGIA MS COM 9 NÓS	31
FIG. 12 – MATRIZ DE PROBABILIDADES	31
FIG. 13 – PROBABILIDADE DE HOPS EM UMA REDE MS COM 9 NÓS E CARGA DE 40% NOS LINKS.....	34
FIG. 14 – Nº HOPS (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) EM FUNÇÃO DA CARGA PARA REDE MS-9.....	34
FIG. 15 – (A) - NÓS 2x2 - TOPOLOGIA EM ANEL; (B) COMPARAÇÃO ENTRE TOPOLOGIA EM ANEL E MALHA (MS)	35
FIG. 16 – VAZÃO PARA TOPOLOGIA EM ANEL (A) E MALHA (B) COM 4, 9 E 32 NÓS.....	35
FIG. 17 – (A) GERAÇÃO PACOTES SH; (B) DIAGRAMA DE PACOTES ÓPTICOS SH	39
FIG. 18 – IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA PARA GERAÇÃO DOS PACOTES SH.....	39
FIG. 19 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO CIRCUITO DE RECONHECIMENTO DE CABEÇALHO PARA PACOTES SH...	41
FIG. 20 – SET-UP EXPERIMENTAL: GERAÇÃO, DETECÇÃO E CHAVEAMENTO DE PACOTES ÓPTICOS SH	43
FIG. 21 – A) ENVELOPE; B) PACOTE SH; C) CLAREZA ON/OFF	44
FIG. 22 – A) BER CHAVEAMENTO DE PACOTES SH; B) RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA TOM RF E SINAL DIGITAL .	46
FIG. 23 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO CIRCUITO DE RECONHECIMENTO BASEADO EM CRISTAIS OSCILADORES .	47
FIG. 24 – SET-UP EXPERIMENTAL: GERAÇÃO, RECONHECIMENTO E CHAVEAMENTO DE PACOTES SH, ATRAVÉS DE CRISTAIS OSCILADORES COMO FILTROS	48
FIG. 25 – ROTEAMENTO PACOTES SH; A) CANAL ÓPTICO CURTO; B) CANAL ÓPTICO LONGO	49
FIG. 26 – CLAREZA DE OPERAÇÃO ENTRE OS ESTADOS ON/OFF	50
FIG. 27 – PACOTE FH : A) ESTRUTURA; B) DIAGRAMA DO PACOTE ÓPTICO FH	54
FIG. 28 – PADRÃO DE TRÁFEGO DOS PACOTES ÓPTICOS	56
FIG. 29 – CIRCUITO RECONHECIMENTO HRC: A) DIAGRAMA EM BLOCOS; B) ESQUEMA ELÉTRICO	57
FIG. 30 – SET-UP EXPERIMENTAL: PACOTES FH USANDO AOS 2x2	59
FIG. 31 – RESULTADOS DO CHAVEAMENTO ÓPTICO DE PACOTES FH. A) RETIRA F1 – AOS 1; B) RETIRA F2 – AOS 2; C) SEGUE F3 – AOS 2; D) SEGUE TODOS – AOS 2.....	61
FIG. 32 – A) ESQUEMA ELÉTRICO LDC; B) RESULTADOS SIMULAÇÃO.....	65
FIG. 33 – SET-UP EXPERIMENTAL QUE OFERECE CONTENDA ENTRE PACOTES.....	65
FIG. 34 – A) AUSÊNCIA CONTENDA; B) RESOLUÇÃO CONTENDA	66
FIG. 35 - SET-UP PARA ROTEAMENTO DE PACOTES ÓPTICOS	68
FIG. 36 – TRÁFEGO SOBREPOSTO.....	69
FIG. 37 – ROTEAMENTO DE PACOTES FH COM CABEÇALHO F2 – TRÁFEGO SOBREPOSTO	70
FIG. 38 - LDC OFF – A) PAYLAOD CORTADO; B) CABEÇALHO CORTADO	71
FIG. 39 - ROTEAMENTO DE PACOTES F2 FH – A) LDC ON; B) LDC OFF	72
FIG. 40 – OPERAÇÃO HRC/LDC EM 2 PACOTES ÓPTICOS – A) LDC OFF; B) LDC ON.....	73
FIG. 41 – EXPERIMENTO PRÁTICO PARA ROTEAMENTO E RETIRADA DE PACOTES ÓPTICOS	74
FIG. 42 – ROTEAMENTO E RETIRADA DE PACOTES ÓPTICOS FH A) AOS 1: HRC/LDC – ON; AOS 2: HRC – OFF B) AOS 1: HRC/LDC – ON; AOS 2: HRC – ON.....	75
FIG. 43 – PROPOSTA PARA CONSTRUÇÃO DE NÓS ÓPTICOS A PARTIR DE SOA’S	81
FIG. 44 – DIAGRAMA FUNCIONAL DA CHAVE ELETRO-ÓPTICA.....	92
FIG. 45 – A) SET-UP EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DA CHAVE EO; B) FOTO CHAVE EO LiNbO3..	92

FIG. 46 – CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISSÃO DA CHAVE ELETRO-ÓPTICA 2X2 OPERANDO COM INFORMAÇÃO NA ENTRADA A. A) 1530NM; B) 1540NM; C) 1550NM; D) 1560NM	93
FIG. 47 – CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISSÃO DA CHAVE ELETRO-ÓPTICA 2X2 OPERANDO COM INFORMAÇÃO NA ENTRADA B. A) 1530NM; B) 1540NM; C) 1550NM; D) 1560NM.....	94
FIG. 48 – SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO DA CHAVE EO; (A) ENTRADA A; (B) ENTRADA B	94
FIG. 49 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA CHAVE AO.....	97
FIG. 50 – ESQUEMA ELÉTRICO DO OPpARE	99

LISTA DE ACRÔNIMOS

I) Lista de Acrônimos Internacionais

ASE	- Amplified Spontaneous Emission
AO	- Acusto-Óptica
AOS	- Acoustic Optical Switch
AOM	- Acoustic-Optical Modulator
ATM	- Asynchronous Transfer Mode
ATM/PON	- Asynchronous Transfer Mode/Passive Optical Network
AWG	- Arrayed Waveguide Grating
BER	- Bit Error Rate
CAG	- Controle Automático de Ganho
CDMA/CD	- Code Division Multiple Access with Collision Detection
CPCI	- Constant Packet Constant Interval
CPVI	- Constant Packet Variable Interval
CW	- Continuous Wave
DAVID	- Data and voice integration over WDM
DEMUX	- Demultiplexadores
DFB	- Distributed Feed-back
DR	- Deflection Routing
EDFA	- Erbium Doped Fiber Amplifier
EO	- Eletro-Óptica
EOM	- Electro Optical Modulator
FDM	- Frequency Division Multiplexing
FIFO	- First-in-First-out
HORNET	- Hybrid Optoelectronic Ring Network
IP	- Internet Protocol
ISO	- International Standard Organization
KEOPS	- Keys to Optical Packet Switching
MPLS	- Multiprotocol Label Switch

MS	- Manhattan Street Topology
MUX	- Multiplexadores
OBS	- Optical Burst Switching
OCDM	- Optical Code Division Multiplexing
OPERA	- Optical Packet Experimental Routing Architecture
OPS	- Optical Packet Switch
OSI	- Open System Interconnection
OTDM	- Optical Time Division Multiplexing
PLF	- Packet Loss Fraction
PRBS	- Pseudo Random Bit Sequence
RF	- Radio Frequency
SCM	- Subcarrier Multiplexing
SN	- Shuffle Net Topology
SOA	- Semiconductor Optical Amplifier
SONET	- Synchronous Optical Network
SPF	- Shortest Path First
TDD	- Time Division Duplexing
WDM	- Wavelength Division Multiplexing
WRS	- Wavelength Routing Switch

II) Lista de Acrônimos Internas

FH	- Field-code Header Packet
HRC	- Header Recognition Circuit
LDC	- Logical Decision Circuit
LIMOPS	- Limited-Area Metropolitan Optical Packet Switching Network
OpPaRe	- Optical Packet Receiver
SH	- Spread Header Packet

Capítulo 1 - Introdução

O grande crescimento do tráfego de Internet está impulsionando uma forte demanda para prestação de serviços em banda larga como comunicações de dados, voz e vídeo, principalmente para as redes ópticas que formam a quase totalidade dos *backbones* [1] metropolitanos e das rotas interurbanas. O surgimento da tecnologia WDM [1][2][3] já permitiu avanços significativos em relação à capacidade de transmissão ponto-a-ponto, porém, a capacidade de processamento eletrônico de chaves e roteadores impõem diversas limitações para as redes ópticas futuras. A tecnologia de chaveamento de pacotes ópticos oferece maior flexibilidade, granularidade e funcionalidades, desde que as informações permaneçam no domínio óptico da origem até o destino, evitando assim o processamento eletrônico nos nós de chaveamento. Além disso, as tecnologias de pacotes ópticos possuem um grande potencial para prover uma simples interface de gerenciamento para serviços de próxima geração baseados em chaveamento de pacotes ópticos para sistemas móveis.

A implementação de redes de pacotes ópticos deve considerar a solução de questões vitais para uma operação satisfatória, como a limitação do tamanho dos pacotes e se serão fixos ou variáveis, a sincronização dos pacotes em cada nó, a necessidade de se ter um tempo de guarda entre pacotes, o tipo de dados transportado pelo pacote para que seja efetuado o chaveamento em cada nó sem restrições, a arquitetura de chaveamento a ser definida para uso no projeto, a escolha de uma topologia de rede que seja capaz de solucionar todo tipo de contenda, disputa pela mesma saída, entre pacotes de modo simples, os atrasos e vazões esperadas para as redes ópticas de pacotes e a possível necessidade de se haver conversão de comprimento de onda.

Todas estas características estão sendo estudadas e desenvolvidas continuamente e podem ser geralmente enquadradas dentro de poucas funções de chaveamento:

- ✓ Roteamento dos Pacotes;
- ✓ Controle de Fluxos;
- ✓ Resolução de Contendas;
- ✓ Sincronização (ou não) dos Pacotes; e
- ✓ Regeneração de Cabeçalho;

sendo as três primeiras sempre necessárias e as duas últimas opcionais.

Um outro aspecto que se deve levar em consideração é a escalabilidade da rede [4], ou seja, sua capacidade de operar em taxas crescentes em relação a capacidade de tráfego e extensão, sobretudo a habilidade de rotear pacotes ópticos através de múltiplos nós de chaveamento da rede óptica. Há ainda algumas confusões que envolvem as regras de chaveamento de pacotes ópticos, onde um pacote é por definição um grupo de bits contendo dados e protocolos os quais são transportados pela camada de rede do OSI da ISO. Esta camada endereça todas as funcionalidades da rede, incluindo o roteamento, que definirá o caminho mais apropriado para cada pacote em questão. A funcionalidade de roteamento [5][6] pode ser então habilitada a utilizar esquemas hierarquizados para os nomes e endereços, de tal forma que o chaveamento de pacotes feito através das tabelas seja restrito aos nós vizinhos. Dessa forma, praticamente elimina-se a necessidade de armazenadores e atrasos, impactando num aumento considerável da vazão das redes e diminuindo os custos de implementação. Geralmente, um pacote é encapsulado com um pequeno cabeçalho que contém seu endereço final, assim como no roteamento de células em redes ATM e pacotes IP em redes MPLS [7].

A funcionalidade de roteamento pode ser endereçada através de protocolos em uma rede separada para gerenciamento e controle, que é a responsável pela organização das tabelas de chaveamento. O estudo da função de roteamento geralmente envolve diversos

aspectos de uma rede óptica, como a vazão, a carga de tráfego, algoritmos, protocolos de roteamento e engenharia de tráfego.

Este trabalho será focalizado nas funcionalidades de chaveamento e roteamento de pacotes ópticos em um nó de rede óptica, bem como os componentes, sub-sistemas e método para sua implementação. Portanto, este trabalho tem como objetivo o estudo e implementação de uma rede óptica de acesso baseada em chaveamento de pacotes ópticos com cabeçalho no domínio da frequência, utilizando-se chaves ópticas com duas entradas e duas saídas.

A apresentação deste trabalho segue a seguinte forma: no capítulo 2, inicia-se um estudo para a definição da tecnologia de cabeçalho dos pacotes a ser adotada, faz-se uma breve apresentação dos estudos em Chaveamento de pacotes Ópticos (OPS) em andamento no mundo, a definição da topologia de rede a ser adotada e seus benefícios e apresenta as características do nó de roteamento empregado no estudo. No capítulo 3, aborda-se a técnica de endereçamento dos nós e a técnica de roteamento, alguns tipos de tráfego simulados, além de um modelo analítico para comparar as características de redes em malha (MS) com redes em anel em função da carga na rede em relação ao atraso, número de saltos e vazão. Os capítulos 4 e 5, levam em consideração todo o estudo apresentado anteriormente, abordando as implementações práticas e seus consecutivos *up-grades* que é o ápice deste estudo, onde descrevem-se todas as características do projeto, desde a geração dos pacotes; o reconhecimento de seus cabeçalhos, passando pelo desenvolvimento dos circuitos que desempenham tais funções, e o conseqüente roteamento, passando por uma rede WDM e voltando a rede óptica de acesso sem nenhuma degradação. Finalmente apresenta-se as conclusões e trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

O presente trabalho foi desenvolvido dentro dos laboratórios da Fundação CPqD, em Campinas, visando a aplicação de sistemas de pacotes ópticos em redes WDM, o qual possibilitou todos os resultados aqui apresentados.

Capítulo 2 – Redes de Pacotes Ópticos para Aplicação Metropolitana e Acesso

Neste capítulo fazemos uma revisão do estado da arte para podermos estabelecer claramente o contexto tecnológico antes de entrarmos na solução original e inovadora desenvolvida neste trabalho.

Na maioria das propostas a função de chaveamento é feita no domínio óptico visando as vantagens de transparência e grande largura de banda proporcionada pelas redes ópticas. Contudo o processamento eletrônico é necessário para executar funções como endereçamento, reconhecimento e resolução de contendidas. Futuramente, o chaveamento de pacotes ópticos apresentará em sua parte eletrônica somente funções de controle como as citadas acima e etapas como o roteamento e a armazenagem dos pacotes serão executados no próprio meio óptico do sistema. Isto nos permitirá alta capacidade de transmissão através de componentes ópticos aliados com as funcionalidades do processamento eletrônico dos circuitos de controle destinados a tal função. Os pacotes consistem de cabeçalho e carga útil, onde o primeiro contém informações de roteamento, que será processada em cada nó de chaveamento. Contudo o cabeçalho pode apresentar uma taxa menor para o processamento eletrônico, enquanto o campo de carga útil que transporta a informação ao usuário final apresenta uma taxa maior. O chaveamento de pacotes ópticos pode ser dividido em duas categorias: síncrono e assíncrono. Inicialmente os pacotes ópticos tinham tamanhos idênticos, atualmente eles não apresentam necessariamente o mesmo tamanho. O chaveamento síncrono de pacotes tem sido exaustivamente estudado, e a figura 1 mostra um diagrama das funcionalidades para este esquema de chaveamento, que inclui: leitura e regeneração do cabeçalho, um sistema de sincronização para ajustar pacotes de diferentes portas de entrada; uma conversão de comprimento de onda; armazenagem e só então o tempo de recuperação.

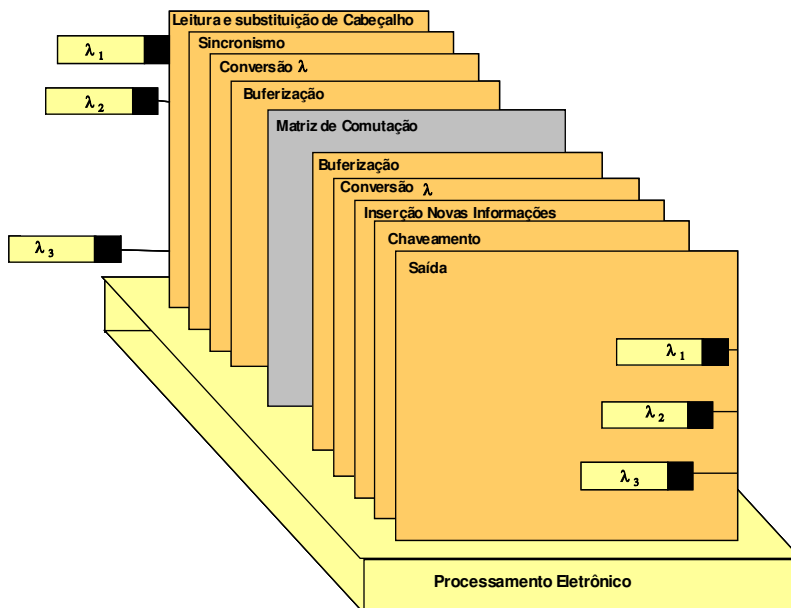


Fig. 1 – Ilustração das funcionalidades do Chaveamento de Pacotes Ópticos

O estágio de sincronização é responsável pelo alinhamento dos pacotes antes de sua entrada para o chaveamento, enquanto o estágio de chaveamento poderá enviar os pacotes para a saída antes ou depois da armazenagem. Alguns estudos recentes estão demonstrando o chaveamento de pacotes ópticos no domínio de comprimento de onda [7], porém um chaveamento óptico de pacotes ideal requer que todas as funções descritas acima sejam implementadas no domínio óptico [8]. O estágio de chaveamento pode incluir a conversão de comprimento de ondas, chaveamento espacial e *gates* ópticos. MUX e DEMUX para implementações WDM, assim como amplificadores ópticos são usados nos projetos. O número de portas de entrada e saída, atrasos e vazão da rede devem ser considerados para cada nó de chaveamento, no intuito de mensurar a performance da rede.

2.1 – Técnicas de Codificação de Pacotes Ópticos

Diversas técnicas de codificação vêm sendo propostas para chaveamento de pacotes ópticos. Os mais significantes trabalhos mostram técnicas de codificação como OCDM, OTDM, SCM, estas técnicas podem ser classificadas como bit-serial, bit-paralelo e sinalização fora da banda de transmissão [9]. Discutiremos cada uma dessas técnicas a seguir.

2.1.1 – OCDM

Na técnica de multiplexação óptica por divisão de códigos, a codificação dos pacotes ocorre no nível de bit, onde uma série de pulsos (*chips*) ortogonais representa o endereço do pacote. O código óptico de bit é gerado por fibras ópticas atuando como atrasos, que determinam o endereço de destino do pacote [10] [11]. Uma grande vantagem desta técnica é que o codificador óptico é implementado com simples componentes ópticos em comparação ao OTDM, além de não requerer sistemas de controles para sincronização e ser apropriado para conexões em redes sem fio. Recentemente, codificadores e decodificadores ópticos baseados em guias de onda e grades de Bragg em fibra criam grande expectativa para a utilização de OCDM em chaveamento de pacotes ópticos. Este tipo de codificação emprega a técnica de espectro espalhado, muito bem desenvolvida e usada para comunicações móveis [12], tornando mais eficiente a utilização da largura de banda para acessos assíncronos dos usuários. A performance do espectro espalhado é dependente do número de usuários e sempre permite que novos usuários sejam introduzidos na rede, ao contrário de outras técnicas de acesso assíncrono, como o CDMA/CD. A codificação e a decodificação no domínio óptico tem o potencial de agregar grandes capacidades, muito acima das disponíveis para a codificação eletrônica.

A técnica OCDM foi a primeira a ser implementada experimentalmente para o chaveamento de pacotes ópticos, mas o interesse nessa técnica tem caído

consideravelmente, comparado com outros métodos de codificação. Ultimamente, contudo, houve um re-interesse neste tipo de implementação, utilizando tecnologias ópticas mais modernas para a função de endereçamento. Assim, pacotes ópticos consistindo de cabeçalhos do tamanho de 8 *chips* e com informação de 64 bits tem sido gerados e roteados opticamente por processamento fotônico do endereço do código. [13]

2.1.2 – OTDM

Neste método, 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 [6]. Espera-se que, nas redes OTDM, sejam agregadas vazões da ordem de Tbps em um canal com um único comprimento de onda, pelo compartilhamento e processamento de uma grande quantidade de dados simultaneamente. A maioria das pesquisas em OTDM foi voltada para o desenvolvimento de dispositivos ultra-rápidos para demultiplexação e sincronização do fluxo multiplexado no tempo, assim como pulsos ultracurtos em altas velocidades. Espera-se com isso, que o chaveamento óptico de pacotes possa permitir funções de roteamento 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 retirada dos pacotes da rede, acontece quando estes chegam ao nó de destino e, como outras funções de roteamento, requer a demultiplexação da informação contida no cabeçalho do pacote. O processamento óptico pode acontecer muito rapidamente, mas a limitação está nos algoritmos ainda não muito robustos que até agora podem ser implementados, envolvendo, em alguns casos [14], não mais que um bit para tomar a decisão. 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.

2.1.3 – SCM

SCM [14] é uma técnica de sinalização fora da banda de transmissão de informação dos pacotes ópticos, que envolve a transmissão de um sinal ou canal de controle em uma frequência separada do canal de dados. Dois tipos de sinalização fora da banda foram demonstrados, 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 com bandas laterais de RF na 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. Na segunda abordagem, a informação e o cabeçalho dos pacotes são codificados com dois comprimentos de onda distintos. Na transmissão da informação e do cabeçalho em paralelo, a vazão é acrescida desde que o cabeçalho ocupe a mesma duração que a carga útil, implicando que, nestes casos, a sincronização entre a carga útil 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 carga útil. Contudo, a degradação do sinal devido a não-linearidades pode ocorrer, especialmente com o efeito de *crosstalk*, que pode limitar esses sistemas quando o espaçamento entre canais SCM é muito pequeno. 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 ópticos, bem como da dispersão das fibras, são também parâmetros críticos.

2.1.4– FDM

SCM [14] é uma técnica de acesso para múltiplos usuários através do fatiamento longitudinal da faixa de frequência utilizada. Suas principais características são:

- ✓ Pacotes identificados por tom em frequência dentro ou fora da banda de transmissão;

- ✓ Pacotes com tamanhos variáveis e transparentes à taxa e/ou formato das informações;
- ✓ Operação assíncrona;
- ✓ Bufferless.

Esta tecnologia foi amplamente utilizada neste trabalho e é parte fundamental de seu desenvolvimento. Através do uso desta tecnologia alcançamos todas as funcionalidades necessárias e que serão mostradas posteriormente.

2.2 – Propostas e Implementações para Chaveamento de Pacotes Ópticos

Diferentes arquiteturas para chaveamento de pacotes tem sido propostas e demonstradas experimentalmente [15][16][17][18][19][20]. As funções de chaveamento como o endereçamento, roteamento e armazenagem, foram na grande maioria dos experimentos, realizadas no domínio eletrônico. As implementações propostas para resolução de contendidas incluem roteamento por comprimento de onda, roteamento *broadcast and select* e roteamento espacial. A seguir são mostradas de forma resumida algumas das arquiteturas experimentais para o chaveamento óptico. Deve-se ressaltar que a grande maioria dessas implementações leva em conta a multiplexação de comprimento de onda, permitindo a conversão de comprimento de onda, aliada a possibilidade de uso de algum outro tipo de critério de resolução de contenda, seja temporal ou espacial.

2.2.1 – OPERA

Trata-se de uma proposta experimental para suportar as funções relacionadas ao protocolo de chaveamento em *Internet* óptica, incluindo troca de rótulo, roteamento de pacotes e operações de encaminhamento, além de reuso de comprimentos de onda [17]. A função de roteamento é baseada em um cabeçalho de endereçamento SCM, conversão de comprimento de onda de pacotes, e tecnologia AWG. A rede OPERA é estruturada de

forma a rotear pacotes entre usuários através de sub-redes múltiplas, as quais incorporam roteadores de interface óptica e um AWG. A carga útil e cabeçalho são transmitidos então, com o mesmo comprimento de onda, mas em taxas de bits diferentes. A detecção e recuperação de cabeçalho são feitas usando-se técnicas ópticas e de microondas sem qualquer sincronismo de fase. A conversão de comprimento de onda é feita na taxa do pacote utilizando-se modulação cruzada de ganho com um SOA, que proporciona a remoção do cabeçalho do pacote óptico sem nenhuma detecção da carga do pacote, enquanto a substituição do cabeçalho é feita utilizando eletrônica de faixa estreita.

A regeneração óptica da informação do pacote e a substituição do cabeçalho SCM podem prover roteadores em cascata para redes multicaminho, os quais superam as limitações de dispersão normalmente encontradas com a modulação por subportadora.

2.2.2 – KEOPS

Um dos primeiros e mais proeminentes projetos para o desenvolvimento de redes com chaveamento de pacotes ópticos foi o projeto Europeu KEOPS. O principal objetivo era o desenvolvimento de chaveamento de pacotes ópticos de modo a prover transparência em termos de taxa de bits [18]. Isso foi possível utilizando pacotes ópticos com duração fixa e com cabeçalho de baixa taxa de bits, de modo a simplificar o processamento eletrônico em cada nó. O projeto envolveu a colaboração de vários laboratórios e foi desenvolvido graças a diversos experimentos laboratoriais que proporcionaram a implementação de nós para o chaveamento óptico de pacotes, e de um bloco de interfaceamento, entre o nó e a rede.

As arquiteturas de chaveamento foram implementadas usando técnicas ópticas, como o chaveamento espacial e por comprimento de onda, para o roteamento e multiplexação, assim como o chaveamento temporal, usando armazenadores como fibras de retardo; tornando possível prover o roteamento de pacotes, multiplexação e

armazenamento. Os conceitos foram validados experimentalmente utilizando-se a tecnologia óptica disponível mais moderna. O formato dos pacotes foi definido utilizando quadros flexíveis para transportar dados em fibras ópticas. Pacotes de duração fixa foram adotados, enquanto que a carga útil e o cabeçalho foram codificados em uma simples portadora usando apenas um comprimento de onda. A figura 2 mostra o diagrama do pacote óptico adotado no projeto KEOPS, onde o cabeçalho é codificado em uma baixa taxa fixa, o que permite a utilização de um processamento eletrônico padrão. O conteúdo de informação também é fixo e seja qual for o seu formato, o volume de dados é proporcional à taxa de bits definida pelo usuário, podendo variar desde 622 Mbps até 10 Gbps.

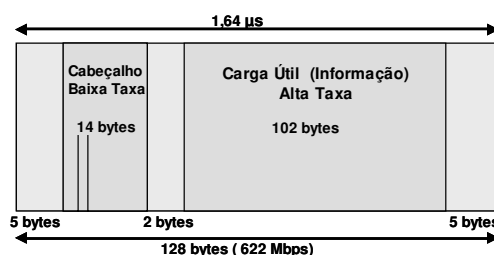


Fig. 2 - Diagrama do Pacote Óptico do Projeto KEOPS

Diversos esquemas foram propostos de modo a prover o processo de agendamento usado para resolução de contenda: distribuição de fibras de retardo, chave para recirculação, algoritmo de controle de fluxo para elementos em cascata e alocação dinâmica de comprimentos de onda. Um sincronizador de pacotes, experimental e transparente a taxa de bits do conteúdo da carga útil foi implementado. Este sincronizador é composto por uma parte mais grosseira e outra mais fina, colocadas antes e depois da chave óptica, respectivamente. O sincronizador mais rústico é baseado em uma cascata de chaves ópticas e linhas de retardo, e recupera os desalinhamentos temporais devido aos desvios térmicos na fibra de transmissão, enquanto o sincronizador mais fino, baseado em um conversor de comprimento de onda sintonizável e uma fibra de alta dispersão, recupera o sinal célula-a-célula limitando o ruído introduzido pela chave. Além disso, uma chave roteadora por comprimento de onda (WRS), apresentando uma arquitetura em dois estágios foi implementada, onde em seu primeiro estágio os pacotes que chegam são roteados para uma posição no armazenador, usada para resolver a contenda: a cada pacote que chega é dado quatro possíveis acessos a fibras de retardo com atrasos não-consecutivos e múltiplos do

comprimento de onda; e no segundo estágio, eles são roteados para a porta de saída desejada.

O roteamento se dá a partir da conversão dinâmica de comprimento de onda no nível dos pacotes. Este processo envolve as seguintes operações: seleção de uma fonte, conversão deste pacote para este comprimento de onda e roteamento espacial com um DEMUX. As funções básicas mostradas no WRS são: recuperação de comprimento de onda, resolução de contenda, atualização de cabeçalho e escrita dos pacotes; sendo que estas últimas funções são requeridas de modo a garantir uma média constante da potencia óptica na saída das chaves, para que não haja problemas com os amplificadores ópticos de linha.

2.2.3 – DAVID

DAVID [20] é o programa sucessor do KEOPS, e tem como principal objetivo o desenvolvimento de conceitos e a migração para a tecnologia de próxima geração, redes ópticas e chaveamento de pacotes. Desenvolvido através de uma parceria entre empresas, operadores, centros de pesquisas em telecomunicações e universidades européias, totalizando 15 integrantes de 9 países diferentes.

O principal objetivo é propor uma solução de chaveamento de pacotes sobre redes WDM, incluindo análise das propriedades de tráfego além de seu gerenciamento, baseado em pacotes ópticos com transmissão assíncrona sobre backbones metropolitanos. Este projeto une as propriedades ópticas e eletrônicas para prover uma combinação ótima entre estes componentes resultando numa capacidade de transmissão de terabits ou mais.

Para obter a convergência entre transporte de voz, dados e aplicações multimídias, o projeto considerada uma rede metropolitana em malha *buffer-less* através do uso de um protocolo de controle de acesso meio. O backbone é baseado em 10 Tbps multicamadas (comprimento de onda e pacotes), com roteadores de pacotes opto-eletrônicos incorporando

as funções do núcleo e das bordas das redes, apresentando assim, alta capacidade de integração entre componentes ópticos e eletrônicos.

2.2.4 – HORNET

Trata-se de uma rede híbrida (opto-eletrônica) em anel desenvolvida na Universidade de Stanford para direcionar os problemas do transporte SONET em redes metropolitanas [19]. Esta implementação emprega um transporte de pacotes chaveados para tirar vantagem da natureza explosiva do tráfego nas redes metropolitanas. HORNET utiliza uma portadora de múltiplo acesso com um protocolo para evitar colisões (CSMA/CD), mantendo os pacotes na rede em qualquer comprimento de onda disponível. A rede em anel pode suportar mais de 100 pontos de acesso, onde cada um tem um único comprimento de onda fixado para a remoção e um rápido transmissor sintonizável, o qual pode transmitir em qualquer comprimento de onda da rede. Este projeto utiliza tons SCM para, eletronicamente, monitorar cada comprimento de onda em cada ponto de acesso. Cada comprimento de onda possui uma única frequência associada a ele. Uma técnica de embutir um tom de relógio, onde o relógio local de um nó transmissor é multiplexado com os dados, é usado de forma a conseguir uma rápida recuperação do relógio dos dados. Cada pacote contém os dados de informação, o tom de relógio e o cabeçalho SCM. No nó receptor, o tom de relógio é reavido através de um filtro passa-faixa e usado como tempo de amostragem.

2.3 – Redes Ópticas de Acesso

Este projeto é focado em redes ópticas metropolitanas de acesso onde as soluções de comutação de pacotes ópticos provêm uma melhor granularidade da rede [6] e o transporte de serviços de comunicação em banda larga. Usualmente, as redes utilizadas no acesso possuem um grande número de ramificações sem a presença de tributários em altas taxas. Contudo, o tráfego apresenta características de rajadas (*burst*) se diferenciando de forma

considerável do *backbone* da rede, em que o transporte das informações dos diversos usuários é multiplexado juntamente com um simples fluxo com altas taxas de bits. Redes de longa distancia são geralmente caracterizadas por um completo e contínuo fluxo de tráfego de dados. Em redes ópticas de acesso, os nós que são acessados por um usuário ou por outra rede são considerados como nós de borda, mesmo quando localizados fisicamente no centro da rede.

Nas redes de acesso atuais, as mais comuns topologias são redes em estrela ou em árvore, as quais possuem um grande número de ramificações e com presença de alguns tributários de altas taxas. Estas redes provêm baixo custo dos nós, gerenciamento centralizado além de controle baseado na topologia de rede *broadcast and select* [6]. A proposta desse trabalho visa uma topologia de rede em malha que proporcionará maior flexibilidade para redes ópticas de acesso baseadas em chaveamento de pacotes ópticos. Com isso, a redundância de caminhos ópticos dispensa a necessidade de largura de banda extra, além do que os nós podem prover melhores funcionalidades para o chaveamento de pacotes ópticos, assemelhando-se as redes com gerenciamento descentralizado. Esta estratégia evita o uso do recurso mais complicado de redes com topologia *broadcast and select*, tecnologia de acesso ATM-PON [6], por exemplo. Além de tudo, a possível associação com WDM oferece grande flexibilidade e margens de manobra para as redes de acesso. Algumas importantes características que serão consideradas neste estudo são: baixa granularidade; alta eficiência de utilização da banda; escalabilidade; baixo custo, entre outras.

2.3.1 – Arquitetura em Malha para Redes ópticas de Acesso

Uma das principais vantagens de redes com topologia em malha é sua robustez em relação a falhas de link, devido exatamente a seu caminho alternativo numa rede distribuída com descrito em 1964 por P. Baran [21], que foi o primeiro a alertar para a necessidade de redes robustas para a transmissão de sinais digitais sem nenhuma dependência da quantidade de links. Hoje em dia, arquiteturas robustas como redes SDH empregam

topologias em anel com redundância de links para alcançar resistência em termos de sobrevivência da informação na rede. Neste estudo, visamos adiantar um passo aumentando a redundância dos links de redes com topologia em malha. A técnica de roteamento por deflexão força com que o pacote óptico que perdeu a disputa da contenda, aumente seu número de hops ao longo da rede até seu destino final, aumentando conseqüentemente o seu atraso de propagação desde a origem até seu destino. Contudo, alguns nós podem oferecer como alternativa ambas portas de saída, porém resultará no mesmo número de hops ao longo da rede, estes nós são chamados de nós *don't care*, que é um importante parâmetro de redes com topologia em malha. Por outro lado, a redundância de caminhos ópticos provida pelas topologias em malha para redes de acesso, contrasta com a convencional proteção implantada para redes SDH com enlaces de grande distancias e grande volume de tráfego.

A escalabilidade de redes em malha pode ser obtida adotando um procedimento de hierarquização, como mostrado na figura 3, onde a rede é dividida em 16 nós dentro de um domínio para um único nível hierárquico. Para um pacote mudar para um nível hierárquico mais alto, ele deverá seguir para um nó de borda, ou utilizar um caminho alternativo, como por exemplo, um nó de borda de um domínio vizinho quando o número de hops necessário para tal mudança for menor que para o nó de borda de seu domínio. Estando em um nível mais alto, os pacotes ópticos evitam nós de domínios mais baixos e atravessam longas distancias usando diferentes fibras ou diferentes comprimentos de onda. Portanto, em dois níveis hierárquicos com 16 nós por domínio a rede pode apresentar um total de 256 nós ópticos roteadores, oferecendo escalabilidade satisfatória.

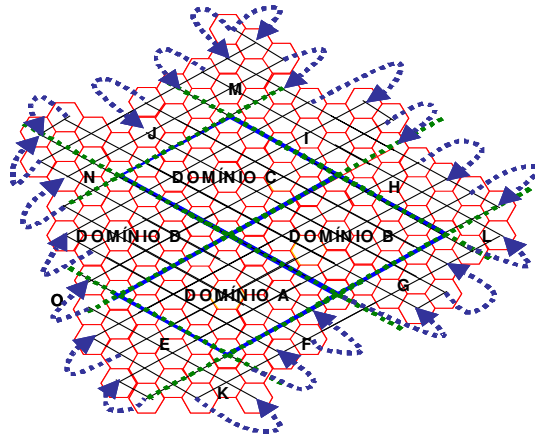


Fig. 3 – Topologia em Malha distribuída numa Rede Óptica

Domínios incompletos devido à inativação de alguns nós, ou por falhas e até por não-instalação, podem coexistir em topologias em malha. Nós inativos são fontes de distribuição de tráfego não-uniforme em seus domínios, mas eles tornam-se menos críticos nessas topologias devido a existência de caminhos alternativos. Além disso, o número de nós dentro de um domínio pode ser ajustado ou modificado para atender diferentes tipos de aplicação e/ou por razões econômicas. Na realidade, o número de nós mais adequado para um domínio deverá ser determinado através de estudos de simulação para uma específica rede de acesso. A configuração da rede mostrada na figura 4, que será mostrada adiante, onde cada nó possui duas portas de entrada e de saída, pode ser facilmente adaptada a topologia de rede MS.

Outra topologia de rede exaustivamente estudada e comparada aos resultados obtidos para MS é conhecida com SN [22]. Diversos estudos compararam o desempenho entre estas topologias de rede em malha, e a SN apresenta melhor performance em relação a alta vazão e menor atraso, características estas dependentes do número médio de hops que os pacotes executam até chegarem ao seu destino final. Porém, a topologia MS pode se adaptar mais facilmente as camadas físicas de redes regulares, desde que o número de hops pelos pacotes defletados podem se tornar muito maior que em redes SN. Por outro lado, o comportamento da rede física pode ser endereçado através da atribuição de *pesos* distintos para diferentes enlaces na rede e depois analisar esta influencia na vazão e no atraso das redes.

Finalmente, cada nó da rede apresenta características de inserção e retirada de pacotes para os usuários finais. No caso de redes ópticas, o acesso dos usuários ocorre em cada nó da rede, gerando e absorvendo tráfego da rede. Uma importante característica é a necessidade de armazenagem para prover a inserção de pacotes na rede [23].

2.3.2 – Benefícios de Redes em Malha

Atualmente a tecnologia WDM é considerada uma tecnologia suficientemente robusta para atender o aumento da demanda de serviços de banda larga em redes ópticas de próxima geração, utilizando as vantagens da largura de banda das fibras ópticas, onde um único comprimento de onda pode prover o transporte de altas taxas de dados. Hoje em dia, a transmissão de dados em 10 Gbps está sendo consolidada por equipamentos já disponíveis comercialmente, e isto é esperado para transmissão de dados em 40 Gbps num futuro próximo através do uso de uma portadora em um comprimento de onda. Na realidade, equipamentos compatíveis com estas altas taxas estão sendo testados atualmente em campo. Porém, não se espera atingir estas altas capacidades de transmissão em redes ópticas de acesso devido aos usuários finais não requererem, na maioria das vezes, taxas maiores que algumas dezenas de Mbps. Contudo, tributários com altas taxas que multiplexam diversos usuários através de um longo *backbone* nunca irá alcançar a rede de acesso, ao contrário de usuários finais que requerem um tipo de tráfego menos agregado e mais freqüente. Contrariamente ao núcleo da rede, onde grandes volumes de tráfego contínuos justificam a implementação de chaveamento de pacotes ópticos, que proverá uma melhor solução de acesso à rede óptica com uma excelente granularidade para os usuários finais.

A demanda crescente por largura de banda para novos serviços de comunicação impulsionará o desenvolvimento das fibras ópticas, motivado por investimentos que visam grandes rendimentos e conseqüentemente baixos custos de implementação. Além disso, o chaveamento de pacotes ópticos pode permitir uma alocação mais flexível de capacidade de transmissão para um grande número de usuários, que serão beneficiados pela melhor utilização dos recursos de largura de banda disponíveis nas redes de acesso.

Redes de acesso são geralmente baseadas em ramificações de topologias em árvore e/ou estrela visando atingir o máximo grau de ramificações mantendo as características de baixo custo dos nós finais. A arquitetura de rede para os usuários finais é *broadcast and select* sem funções de roteamento ou chaveamento. Nossa proposta é uma rede de acesso com topologia em malha baseada em tecnologia de chaveamento de pacotes ópticos. Assim, os nós ópticos assumem as funcionalidades de chaveamento para que seja feito o roteamento dos pacotes através da rede, e isto permitirá posteriormente a estratégia de chaveamento de pacotes ópticos em rajada (OBS) [24] com gerenciamento de chaveamento e controle de operação descentralizados. Ainda que a tecnologia *broadcast and select* represente uma atrativa opção para redes ópticas de acesso, como por exemplo na tecnologia ATM-PON, ela produz um desperdício considerável da largura de banda nas redes ópticas. Pelo contrário, topologias em malha oferecem uma vantagem importante graças a sua característica intrínseca de recuperação de falhas, desde que rotas alternativas estejam habilitadas.

A proposta deste trabalho são redes ópticas de acesso que transportarão pacotes ópticos com sinal digital em altas taxas, e provendo a partir daí uma granularidade satisfatória para redes WDM. A demanda de largura de banda pelos terminais dos usuários finais será atendida pela taxa de dados disponível pela transmissão dos pacotes.

2.4 – Proposta de Arquitetura de Rede e Estrutura do Nó Óptico

Este trabalho é focado na demonstração prática de transmissão e chaveamento de pacotes ópticos para aplicação em redes metropolitanas de acesso. A aplicação de topologias em malha em redes de acesso traz a agilidade e flexibilidade proporcionada por nós e tráfego distribuídos, além de ser mais adequado para a proposta de redes com chaveamento de pacotes ópticos do que as topologias em anel e/ou estrela [2] [3] [25]. A solução proposta aqui, uma rede metropolitana de acesso para pacotes ópticos geograficamente distribuída – LiMOPS, traz uma solução para tráfego não determinístico baseado em pacotes, com a vantagem de ser muito simples, além de ser economicamente atrativa através de nós ópticos distribuídos e alto roteamento dos pacotes. O contraste entre centralizar os nós com alta concentração de tráfego e equipamentos caros perde sua validade com a aplicação de tráfego não determinístico. A rede LiMOPS, baseada no chaveamento e roteamento de pacotes ópticos necessita de nós ópticos relativamente simples e provê transporte de informação com baixa latência da rede. Isto significa que a rede possuirá poucas dezenas de nós, e espaçados dos nós vizinhos por poucos quilômetros. Acreditamos que tal conceito de rede proverá num futuro próximo, alta vazão e baixo custo para transporte de informações se comparada aos sistemas existentes atualmente.

Após um amplo estudo de várias arquiteturas de rede, incluindo simulações de tráfego e carga para diversas topologias e configurações, que veremos mais adiante, adotamos uma rede com topologia em malha MS sem capacidade de armazenamento para a implementação da LiMOPS. Esta configuração que compreende o conceito citado acima será conectada a sistemas WDM com roteamento por comprimento de onda. Neste caso, tanto a rede de acesso baseada em pacotes ópticos quanto à rede WDM, *backbone* principal,

baseada em roteamento por comprimento de onda são transparentes ao formato da informação e também a hierarquia da rede, como mostra a figura 4.

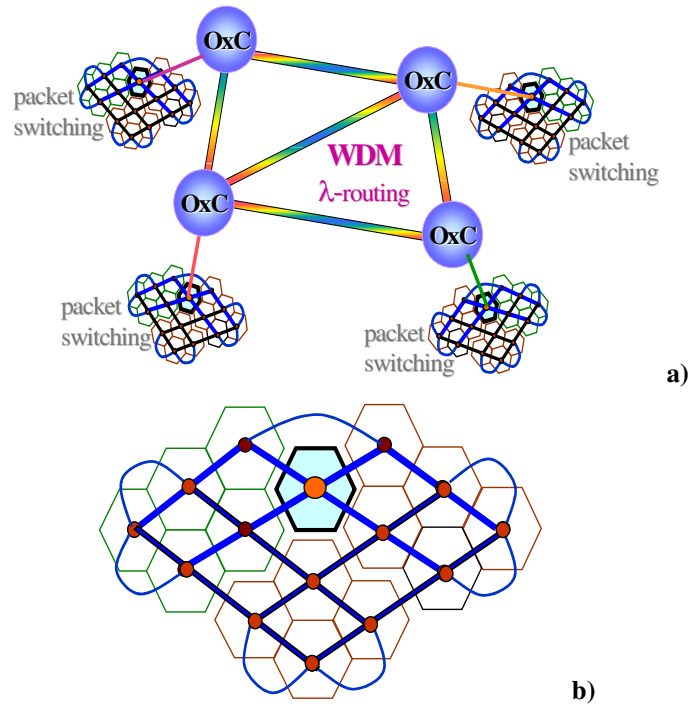


Fig. 4 – Redes em Malha; a) Interconexão sistemas WDM com a Rede LIMOPS; b) Interconexão entre os nós da rede LIMOPS.

A principal característica desta rede, pode ser entendida com o auxílio da figura 5 que mostra o modelo proposto para o nó óptico, onde cada entrada do nó terá um circuito de detecção, que identificará o cabeçalho do pacote e será responsável pela ação de chaveamento do nó. Os nós ópticos desta proposta de rede incluem funções de inserção e retirada de pacotes da rede, controladas por circuitos eletrônicos lógicos, com chaveamento e roteamento realizados 2x2, duas entradas e duas saídas, baseado pacote-a-pacote, de acordo com uma tabela de alocação pré-estabelecida, inserida em cada nó da rede. As tabelas de alocação de cada nó relacionam a frequência de cabeçalho dos pacotes com o nó de destino de cada pacote [26] e não com o usuário final. Os tempos de processamento de cabeçalho e chaveamento dos pacotes são na faixa de μ s, mantendo a integridade do payload ao longo da rede, portanto, o payload só é analisado pelo usuário final, fora da rede. Este conceito foi também adotado nas simulações realizadas, dando ao projeto uma consistente aproximação entre as atividades teóricas e experimentais.

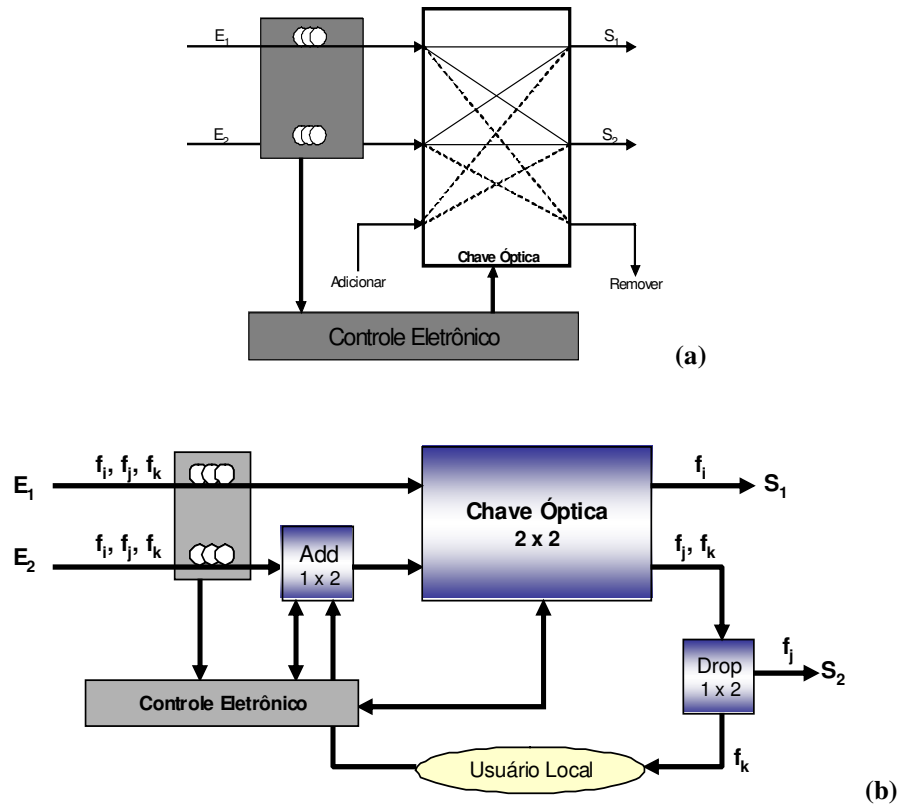


Fig. 5 – Estrutura do Nó óptico para chaveamento de Pacotes: (a) Proposta Inicial; (b) Proposta Futura

A rede LiMOPS-MS é *bufferless* pois o nó óptico não possui nenhum mecanismo capaz de armazenar as informações durante algum tempo; adota-se o roteamento *Hot-Potato* operando baseado na deflexão dos pacotes ópticos. A proposta de atuação do nó óptico é que todos os pacotes serão tratados pelo circuito de reconhecimento para que este possa sinalizar para o circuito de resolução de contendras e este por sua vez, sinalize para a chave óptica assumir a posição adequada para o roteamento do pacote em questão, e quando dois pacotes chegam às entradas de um determinado nó e requerem a mesma porta de saída, o pacote que chegou primeiro vencerá a contendra e será chaveado de acordo com sua tabela de alocação, enquanto o outro pacote será encaminhado para a porta de saída disponível, então, ele irá passar por mais alguns nós até atingir seu destino final. O processo de inserção e retirada dos pacotes em cada nó se dá através de uma checagem de ‘canal vazio’ para a inserção, e a retirada dos pacotes é feita simplesmente durante a passagem do

pacote em questão pelo nó, tudo controlado pelos circuitos lógicos desenvolvidos neste trabalho. Com isto notamos que apesar dos nós adotados apresentarem uma estrutura 2x2 no ponto de vista operacional, os nós ópticos são 3x3 no ponto de vista da rede física, desde que haja as funcionalidades de inserção e retirada de pacotes. Estes processos serão mostrados detalhadamente a seguir através dos experimentos práticos desenvolvidos neste trabalho.

Capítulo 3 – Tráfego de Pacotes Ópticos em Redes de Acesso com Comutação Óptica

Entre as diversas técnicas de codificação de pacotes ópticos escolhemos o FDM para designação do cabeçalho e payload multiplexados em um mesmo comprimento de onda. O uso de baixas frequências em RF como identificação de cabeçalho, permite relacionar os nós ópticos de uma rede de acesso com cada tom de cabeçalho através da frequência de cabeçalho de cada pacote, permitindo assim relacionar cada pacote a um nó da rede em questão.

Ao longo do desenvolvimento experimental do trabalho, foram realizados estudos de simulação [27][28][29][30] dos quais participamos ativamente buscando complementar os resultados experimentais de chaveamento de pacotes ópticos nos nós das redes a fim de dar uma visão de contexto ao trabalho experimental que será apresentado nos capítulos 4 e 5, como veremos adiante.

3.1 – Esquema de Endereçamento e Definição da Técnica de Roteamento

Adotando-se redes ópticas com topologia em malha propomos um simples esquema de endereçamento de nós, que operam com chaves ópticas 2x2, onde cada cabeçalho dos pacotes ópticos se relaciona a um determinado nó. Com esta proposta, uma rede óptica de acesso pode ser gerenciada através de uma associação entre quatro diferentes tons de cabeçalho em frequência que nesta análise se relaciona a bits como endereço final para cada domínio hierárquico, como vemos na figura 6. O bit menos significativo refere-se à frequência de cabeçalho mais baixa e o mais significativo refere-se a frequência mais alta.

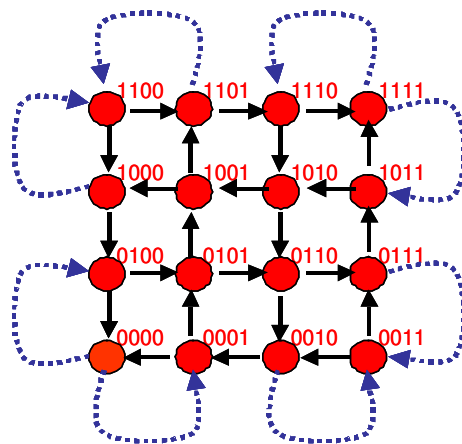


Fig. 6 – Proposta de Endereçamento de nós para rede MS

Esta proposta de endereçamento contradiz a forma convencional de fechamento circular de uma rede MS, porém este modelo minimiza as conexões físicas da rede, tornando mais viável sua implementação prática. A tabela I mostra o mapeamento de uma rede com 16 nós onde trafegam pacotes com 5 cabeçalhos diferentes, e a inclusão do 5º cabeçalho, que não é mencionado acima, é necessária para representar o nó #1. Contudo, na prática, este nó poderia ser rotulado para qualquer pacote que não apresente nenhuma das quatro frequências principais, pelas quais seria feito o gerenciamento da rede.

# Nó	Endereço	Tipo	Tons (MHz)
1	0000	HIERARQUICO	10
2	0001	REGULAR	2
3	0010	REGULAR	4
4	0011	REGULAR	2 e 4
5	0100	REGULAR	6
6	0101	REGULAR	2 e 6
7	0110	REGULAR	4 e 6
8	0111	REGULAR	2, 4 e 6
9	1000	REGULAR	8
10	1001	REGULAR	2 e 8
11	1010	REGULAR	4 e 8
12	1011	REGULAR	2, 4 e 8
13	1100	REGULAR	6 e 8
14	1101	REGULAR	2, 6 e 8
15	1110	REGULAR	4, 6 e 8
16	1111	REGULAR	2, 4, 6 e 8

Tabela I – Mapeamento de endereços para gerenciamento de uma rede MS com 16 nós

Este esquema de endereçamento nos possibilita a implementação de uma rede óptica totalmente assíncrona, sem a necessidade de se ter informação do tamanho do pacote inserida no cabeçalho. O nó (0000) de um determinado domínio é o nó concentrador, onde os pacotes ópticos poderão passar para outros níveis hierárquicos. Neste esquema, tem-se também disponível, caminho irrestrito para que pacotes alcancem o nó vizinho (0000) de um domínio adjacente, no intuito de mudar para uma hierarquia superior. Os resultados obtidos durante as simulações de tráfego [20], realizadas paralelamente ao experimento prático, comprovaram a proximidade entre os resultados obtidos e fomentou a implementação prática de uma rede óptica de acesso baseada em chaveamento de pacotes ópticos com maior segurança e estrutura teórica, além de se conseguir tal implementação com baixos custos e operação amplamente satisfatória.

Considerando um chaveamento de pacotes multi-hop em redes com topologias em malha, MS e SN, alguns parâmetros básicos devem ser considerados como a armazenagem de pacotes em nós intermediários, como é feito nas redes eletrônicas convencionais, sendo realizado na maioria das vezes através do protocolo *store-and-forwarding*, porém esta técnica não é facilmente implementada em OPS através do uso de linhas ópticas de atraso. Porém, a técnica de roteamento por deflexão de pacotes também conhecida como Hot-Potato, torna-se uma alternativa atraente para a implementação prática de chaveamento de pacotes ópticos com redes em malha e sem armazenamento de pacotes.

3.2 - Simulação de Tráfego de Pacotes Ópticos com NS

Foi feito o estudo de simulação de tráfego [33][39], e o qual mostraremos seus resultados a seguir, no qual o autor adotou 2 tipos de tráfego nos estudos de simulação que foram escolhidos por apresentarem características únicas entre os pacotes sucessivos, além de proverem um comportamento diferente a ser analisado para as redes de pacotes ópticos. A figura 7 mostra as características destes tráfegos usados nas simulações; em a) vemos o tráfego CPCI, com intervalos constantes entre pacotes e pacotes com mesma duração; em b) vemos o tráfego CPVI, com pacotes de mesmo tamanho e intervalo entre eles variável, caracterizando uma distribuição de tráfego poissoniana.

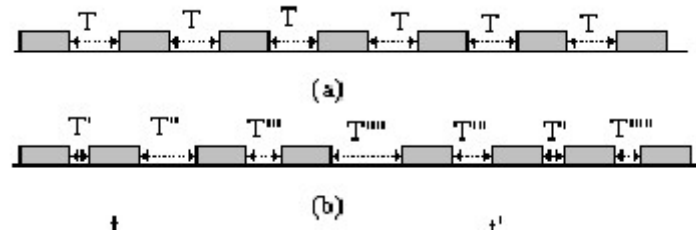


Fig. 7 – Tráfegos adotados para caracterização de redes de Pacotes Ópticos – a) Tráfego CPCI; b) Tráfego CPVI.

Foi adotado como ponto inicial dos estudos de simulação o protocolo SPF para inspecionar o comportamento de redes com chaveamento de pacotes ópticos. Este protocolo faz o roteamento dos pacotes entre origem e destino, levando-se em consideração o custo dos links, e nos permite comparar os resultados com o protocolo DR. Na figura 8 vemos as topologias de rede com 4 e 16 nós que foram utilizadas para se fazer um comparativo entre os protocolos supra citados.

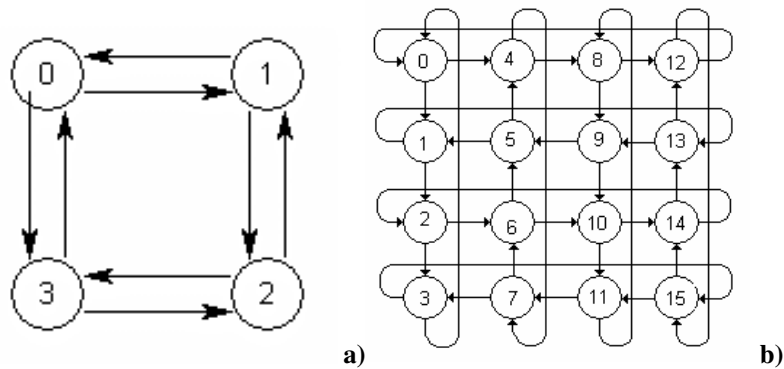


Fig. 8 – Topologias de rede em malha simuladas: a) 4 Nós; b) 16 Nós

Ambas topologias podem ser usadas para a implementação de uma rede óptica de acesso com vários domínios. Na figura 8.a) a rede MS, se torna simplesmente uma rede em anel com dois sentidos de circulação de tráfego; enquanto em 8.b) foi proposto um fechamento diferente para a rede em malha. Na figura 9 temos um comparativo entre os protocolos SPF e DR com tráfego CPCI em função da carga de tráfego aplicada à rede e da fração de perda de pacotes, esta simulação apresentou um comportamento não uniforme para SPF enquanto o DR deteriora-se com o aumento do número de nós da rede, tornando claro que redes de pacotes ópticos devem apresentar poucos nós para terem uma funcionalidade aceitável.

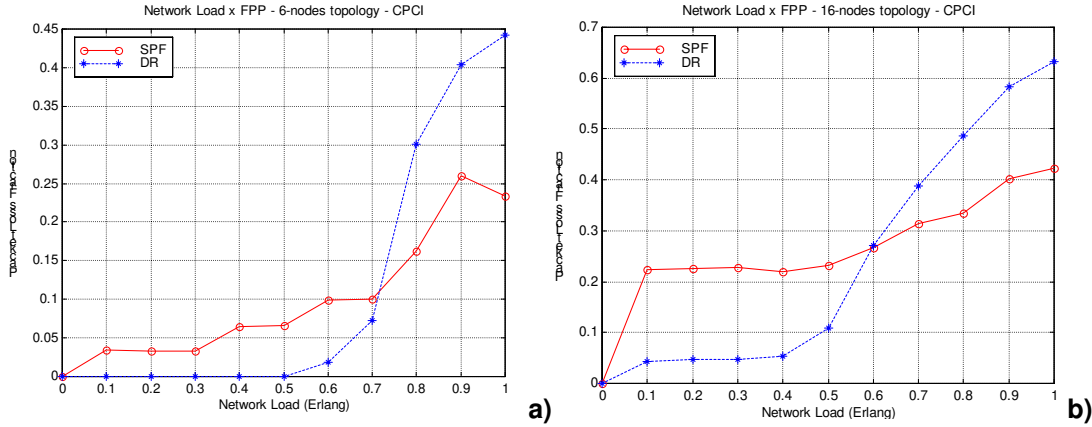


Fig. 9 – Comparação entre os Protocolos SPF e DR com tráfego CPCI: a) 4 Nós; b) 16 Nós

A figura 10 apresenta os resultados, levando-se em consideração os mesmos critérios, porém com tráfego CPVI e para uma rede em malha com 16 nós. Como vemos, o protocolo DR apresenta melhor performance com carga de rede menor que 40% e, assim como no tráfego CPCI a performance torna-se pior com o aumento do número de nós da rede. O que nos compromete a ter as redes ópticas de acesso com poucos nós, visando mínima perda de pacote possível.

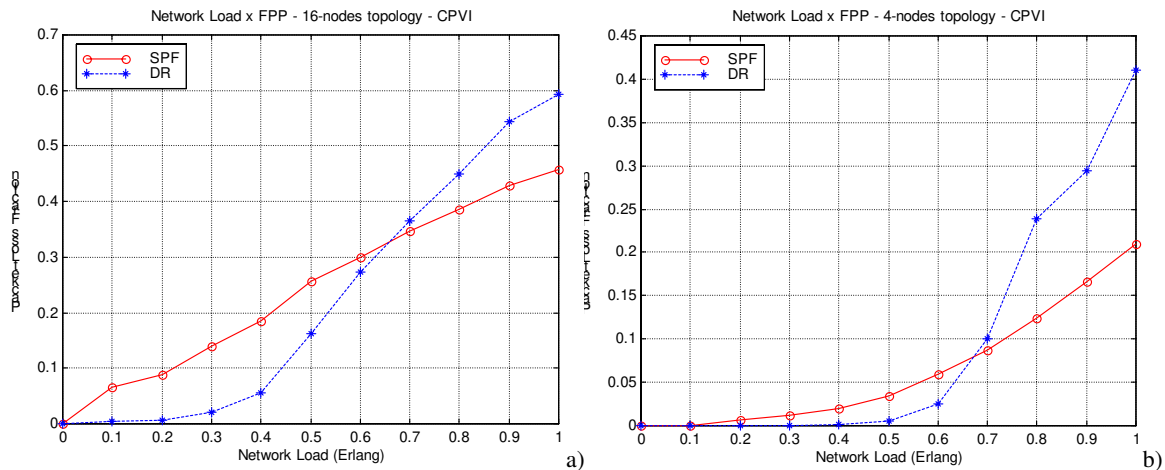


Fig. 10 - Comparação entre os Protocolos SPF e DR com tráfego CPVI: a) 4 Nós; b) 16 Nós

Geralmente a performance do protocolo DR é superior ao SPF para valores de carga de rede menor que 70%, a partir deste valor o DR apresenta alta fração de perda de pacotes

(PLF) devido ao grande número de deflexões consecutivas, pois isto aumenta a distancia percorrida pelos pacotes dentro da rede e conseqüentemente a probabilidade de perda. Uma performance aceitável para redes de pacotes ópticos utilizando-se as topologias de rede consideradas acima pode ser obtida mantendo-se a carga das redes em 40% para tráfego CPCI e 30% para tráfego CPVI.

3.3 – Modelo Analítico para avaliar Vazão, Atraso e Variação Atraso

Nesta seção mostra-se um modelo matemático analítico [30], apresentado por Sachs e Barbosa, que visa mensurar vazão, atraso e variação do atraso tendo como objetivo a comparação entre os desempenhos das redes MS e redes em anel. Todas as análises foram feitas baseadas em cálculos utilizando-se a ferramenta MatLab, e foi necessário estabelecer algumas condições iniciais que devem ser levadas em consideração durante os estudos.

- ✓ Consideramos um tráfego uniformemente distribuído pela rede. Para garantir uniformidade imaginamos que todos os nós estão se comunicando com todos os demais [$n \times (n-1)$ comunicações]. Cada uma das comunicações usa taxa fixa b (Gb/s) que pode ser inserida na rede na forma de pacotes, dentro dos quais os bits estão comprimidos temporalmente para serem transmitidos na taxa do link B (Gb/s). Onde $B \gg b$.
- ✓ Seguimos um pacote teste com destino ao nó 1. Como a rede é simétrica, o resultado poderá ser aplicado para qualquer outro nó de destino atribuído ao pacote teste.
- ✓ No instante inicial o pacote teste pode estar sendo gerado em qualquer um dos nós da rede exceto no nó 1. Assim a probabilidade de encontrar o pacote teste em qualquer nó da rede é dado por $(1/n)$ exceto para o nó 1 que não gera pacote teste pois não envia pacotes para si mesmo.

3.3.1 – Modelo Estatístico

A figura 3.6 mostra um exemplo de topologia Manhattan Street de 9 nós com duas entradas e duas saídas, que é uma das topologias utilizadas neste cálculo. Os números

marcados na saída de cada nó representam o número de saltos (hops) que o pacote teste enviado por esta porta teria que saltar até chegar ao nó 1 que é seu destino.

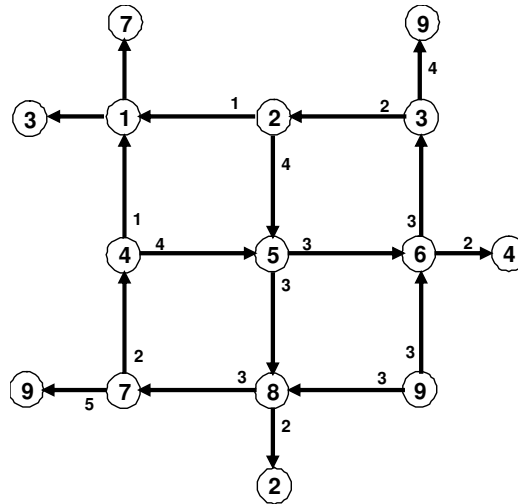


Fig. 11 – Topologia Manhattan Street com 9 Nós

Seguindo o mesmo modelo apresentado por Acampora [22] [31], foi montada uma matriz $n \times n$ das probabilidades de encaminhamento do pacote teste em cada nó da rede. Nesta matriz, cada coluna representa um nó e em cada linha teremos a probabilidade do pacote teste sair deste nó sendo encaminhado diretamente para qualquer outro nó da rede. Como todos os nós têm somente duas saídas, cada coluna terá somente dois elementos não nulos, sendo que um deles representa a probabilidade P do pacote teste sair pela porta preferencial (saída que resulta em um menor número de hops até o destino). A probabilidade de o pacote sair pela outra porta é chamada de probabilidade de deflexão $D = (1-P)$. A matriz de probabilidades correspondente a esta topologia está apresentada na figura 12 abaixo.

$$\begin{pmatrix}
 0 & P & 0 & P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & P & 0 & 0 & 0 & 0 & P & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P & P & 0 & 0 \\
 0 & D & 0 & D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & 0 & T \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & 0 & T \\
 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0
 \end{pmatrix}$$

P = Preferencial
 $D = 1 - P$ (defletido)
 $T = 0,5$ (tanto faz)

Eq. 3.1 – Matriz de Probabilidades

Em alguns nós da rede, não há diferença de caminho para os pacotes enviados por uma porta ou pela outra. Estes nós são chamados de nós *don't care*. Estes nós têm esta característica (tanto faz) para os pacotes que tenham o mesmo destino. Na matriz da figura 12 marcamos os nós tanto faz com a letra T. Aqui cabe uma ressalva: se supomos probabilidade meio para os nós tanto faz como sugerido, temos que supor também que outros pacotes que trafegam pela rede com outros destinos podem ter os seus nós tanto faz em nós diferentes, interferindo nas probabilidades todas. No trabalho de Acampora isto é introduzido através de um cálculo convergente que considera a probabilidade do pacote teste encontrar um pacote competidor para o qual o nó em questão é um nó tanto faz. Neste trabalho não há tratamento preferencial para o nó tanto faz. Se um pacote chega, ele é imediatamente encaminhado não havendo sincronização. Sendo assim, mesmo que seja um nó tanto faz, elegemos uma porta de saída preferencial fixa. A probabilidade de o pacote sair pela sua saída preferencial será sempre P independentemente de ser nó tanto faz. Assim, escolhendo uma porta qualquer como preferencial para os nós tanto faz obtém-se a matriz de comutação T:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & P & 0 & P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & 0 & 0 & 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P & P & 0 & 0 \\ 0 & D & 0 & D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P & 0 & 0 & 0 & P \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 & D \\ 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Eq. 3.3 – Matriz de Probabilidade definida pela Topologia.

Na hipótese de tráfego uniforme, no instante igual a zero (instante inicial) imaginamos que cada nó da rede pode iniciar a comunicação com qualquer outro nó. Isto resulta numa probabilidade do pacote teste, com destino ao nó 1, estar em cada um dos n nós da rede é dada por 1/n. Isto porque supomos que no instante inicial existem n x (n-1) comunicações possíveis entre os nós e deste total (n-1) são destinadas ao nó 1, resultado a

probabilidade de encontrar o pacote teste no instante inicial é dada por $P = \frac{(n-1)}{n \times (n-1)} = \frac{1}{n}$.

Com isto montamos o vetor de probabilidades no instante inicial:

$$P_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/n \\ 1/n \\ 1/n \\ 1/n \\ 1/n \\ 1/n \\ 1/n \\ 1/n \end{bmatrix}$$

Eq. 3.4 – Vetor de Probabilidades

Considerando intervalos de tempo correspondentes a cada enlace, no instante 1 todos os pacotes deram um único salto (um único "hop"). No instante igual a um a probabilidade de encontrar o pacote teste em cada um dos nós será dada por $P_1 = T \times P_0$. E assim sucessivamente calculamos $P_k = T \times P(k-1)$ para ter a probabilidade de encontrar o pacote teste em cada um dos n nós da rede após k intervalos de tempo. Isto corresponde ao cálculo das probabilidades de encontrar o pacote de teste após k saltos (k hops). O elemento $P_k(1)$ será a probabilidade de encontrar o pacote teste no nó 1 após k hops e portanto será a probabilidade do número de hops ser k.

3.3.2 – Resultados Alcançados

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos através de simulação com a ferramenta matemática Matlab, do qual o código adotado pode ser visto no anexo 1. A probabilidade de um pacote continuar sendo defletindo por muito tempo é pequena. Poderia se incluir uma funcionalidade que remove pacotes antigos da rede pelas propriedades ópticas que variam com a distância percorrida, como é o caso da dispersão cromática. Entretanto esta funcionalidade não é necessária se considerarmos adequado, por exemplo, que a probabilidade de um pacote chegar no destino depois de 28 hops numa rede

Manhattan Street de 9 nós é da ordem de 10^{-6} . A figura 13 mostra a probabilidade de número de hops nesta rede MS com 9 nós, quando operando com 40% de carga nos links.

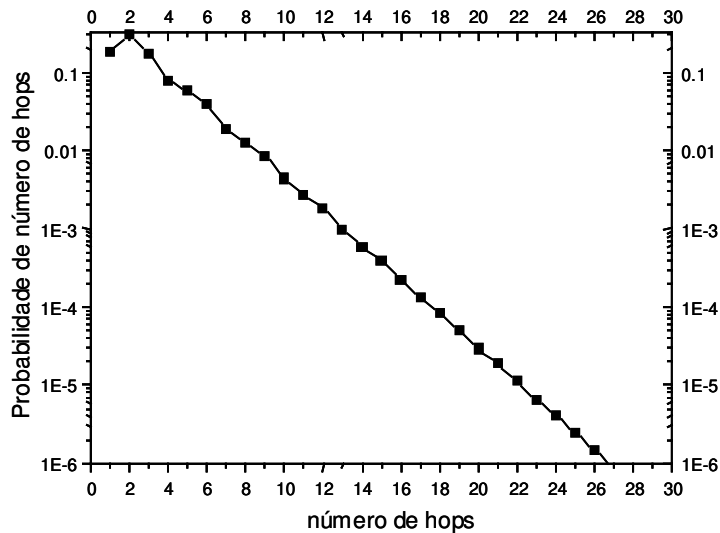


Fig. 12 – Probabilidade de Hops em uma Rede MS com 9 Nós e carga de 40% nos links

O número de saltos, *hops*, aumenta com a carga no link, portanto foi calculado o número médio e o desvio padrão do número de hops em função da carga do *link* e apresentamos o resultado na figura 14 abaixo.

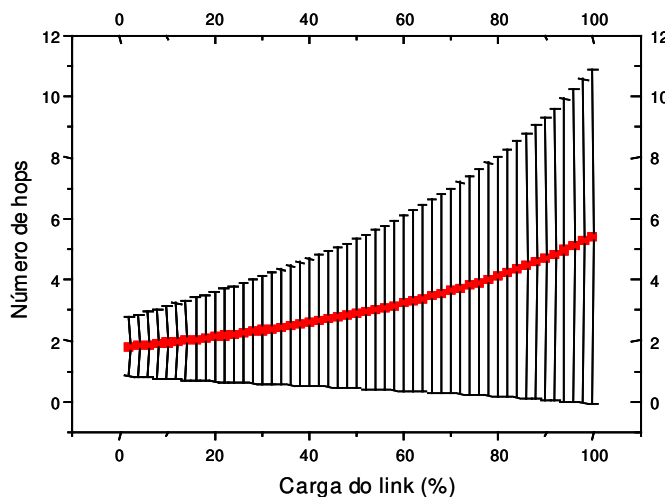


Fig. 13 – N° Hops (média e desvio padrão) em função da carga para rede MS-9

Foi feita uma comparação entre duas topologias que podem ser montadas com os mesmos nós 2x2 e a mesma técnica de chaveamento de pacotes. A topologia alternativa em

anel pode ser uma solução adequada para aproveitamento de fibras já instaladas em dutos e percorrendo anéis fechados para atender a esquemas de proteção propostos pelo sistema SDH já amplamente utilizado. Nesta topologia em anel, a inteligência que se incorpora de maneira distribuída nos nós da rede é tal que em caso de deflexão o pacote pode voltar somente um enlace no sentido oposto ao do menor caminho, mas retoma o menor caminho na primeira oportunidade. A figura 15.a) ilustra este exemplo de encaminhamento enquanto b) mostra a diferença de vazão em favor da topologia MS. A figura 16 ilustra o comportamento deste tipo de roteamento em função da vazão para a topologia em anel e em malha em função do número de nós na rede.

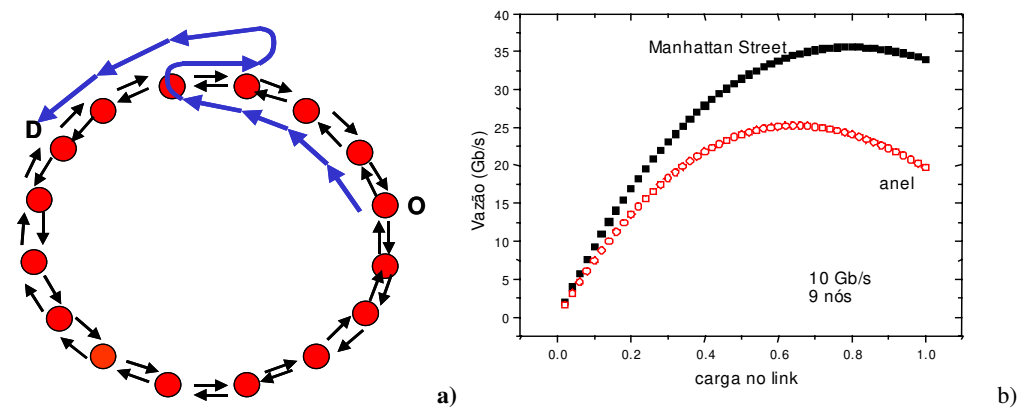


Fig. 14 – a) - Nós 2x2 - topologia em anel; b) Comparação entre topologia em anel e malha (MS)

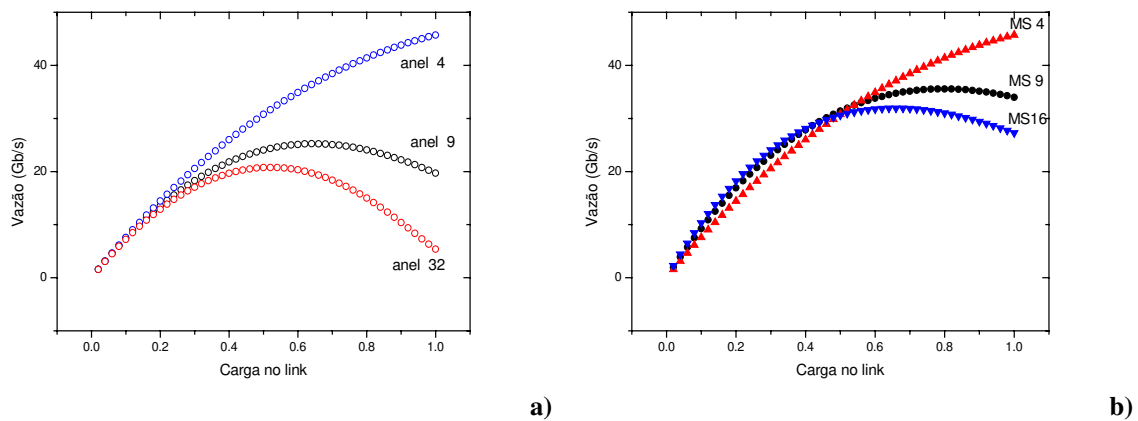


Fig. 15 – Vazão em função da carga no link; a) Topologia em Anel com 4, 9 e 32 nós; b) Topologia em Malha com 4, 9 e 32 nós.

Notamos um comportamento mais uniforme para redes com topologia em malha e carga de rede em torno de 50%, o que nos levou a adotar este tipo de rede para inclusão nos trabalhos práticos, como veremos a seguir.

Capítulo 4 - Desenvolvimento Experimental de Nós de Chaveamento de Pacotes Ópticos tipo *Spread Header*

Neste capítulo apresentam-se as implementações práticas adotadas na construção do projeto de chaveamento e roteamento de pacotes ópticos, buscando uma maior compatibilidade técnica e econômica entre as topologias de rede estudadas, os nós ópticos e as estruturas de pacotes usados no desenvolvimento do estudo. Este modelo adota uma estrutura de pacote com cabeçalho em frequência espalhado, *Spread Header – SH*, ao longo da duração do pacote, chamado pacote óptico SH.

4.1 – Pacotes com Cabeçalho em Frequência: Solução SH

Esta solução adota pacotes com cabeçalho no domínio da frequência e apresentam a vantagem de ser relativamente simples sua implementação e ser intrinsecamente assíncrono, não sendo necessário um sinal de clock para fazer o sincronismo ao longo da rede. Pacotes com tamanhos diferentes podem ser facilmente introduzidos, contudo, adotamos pacotes com tamanhos iguais. Visando tornar a circuitaria eletrônica a mais simples possível, escolhemos usar um tom de RF na faixa de poucos MHz, dentro da banda base do payload digital que apresenta alta taxa de bits, à 2,5 Gbps. O tom de cabeçalho é espalhado ao longo do pacote, delimitando o início e o término de cada pacote óptico.

4.2 – Geração de Pacotes Ópticos SH

O processo completo para geração dos pacotes SH é feito de forma extremamente simples e com equipamentos comuns, este processo passa por 4 etapas distintas e fundamentais e que são relacionadas abaixo:

- Modulação Externa de um laser DFB;
- Combinação entre os sinais que formam cabeçalho e payload;
- Conversão Eletro-Óptica;
- Superação das Perdas.

A figura 17 mostra o set-up para a geração e o diagrama dos pacotes ópticos SH. Na primeira etapa um laser DFB operando em $\lambda = 1547,72$ nm (canal 37 na grade ITU-T), é diretamente modulado com um gerador de pulsos, que forma o envelope dos pacotes. Trabalhamos inicialmente com pacotes que poderiam variar entre 2.4 - 2.8 μ s, porém adotamos como duração típica, pacotes com $\tau_p \approx 2.5$ μ s. Este envelope do pacote é enviado para a entrada de um controlador de polarização conectado a entrada de um modulador eletro-óptico (EOM) de Niobato de Lítio - LiNbO₃. Neste ponto, os sinais elétricos, cabeçalho que contém a informação de endereço dos pacotes através de uma onda senoidal pura em 3 MHz provida por um gerador de frequências, e o payload (carga útil) provido por um gerador digital de padrões, por meio de uma palavra PRBS ($2^{23} - 1$) à 2.5 Gbps são misturados e formam os pacotes ópticos logo após a conversão eletro-óptica que ocorre após a passagem de ambos sinais por um mixer.

Devemos ressaltar que a situação onde um tom de RF em baixa frequência é a identificação do cabeçalho e se localiza dentro da banda base do sinal digital é uma característica peculiar deste estudo, não sendo usado normalmente em outros estudos relacionados a chaveamento de pacotes ópticos.

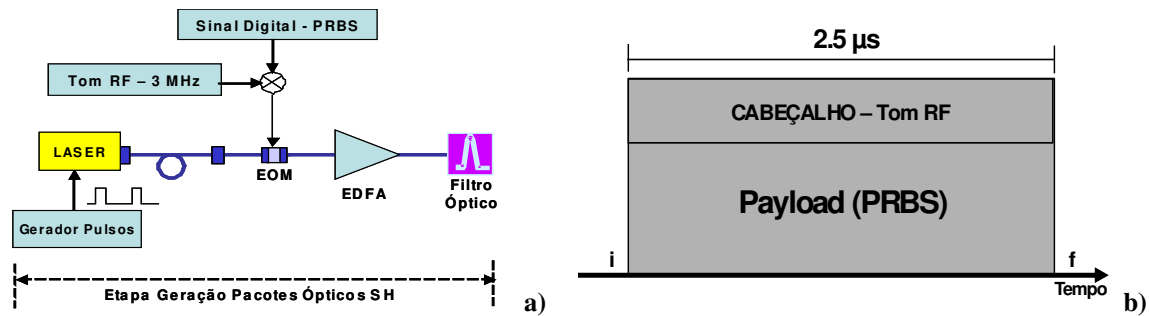


Fig. 16 – a) Diagrama experimental para geração de pacotes SH; b) Diagrama do Pacote Óptico SH

Após a etapa inicial de preparação e conversão EO os pacotes são encaminhados para sua etapa final de geração, que é passar por um EDFA no intuito de suprir todas as perdas intrínsecas neste processo, que giram em torno de -12 dB. Após a amplificação os pacotes passam por filtro óptico para eliminar ASE, pois podem deteriorar a performance do sistema. Com isso, temos finalizado todo o processo de geração dos pacotes ópticos com cabeçalho em frequência espalhado ao longo de sua duração - SH. Este processo de geração, além de ser simples nos propiciou a comprovação do princípio de operação proposto neste trabalho, além de ser economicamente viável.

A figura 18 abaixo mostra uma parte do experimento onde vemos o osciloscópio com os pacotes ópticos, o conversor opto-elétrico, além de boa parte da estrutura de geração dos pacotes ópticos: controlador de polarização, EOM com seu driver de RF, gerador de pulsos, circuito de detecção e roteamento dos pacotes, além das chaves usadas inicialmente neste estudo.

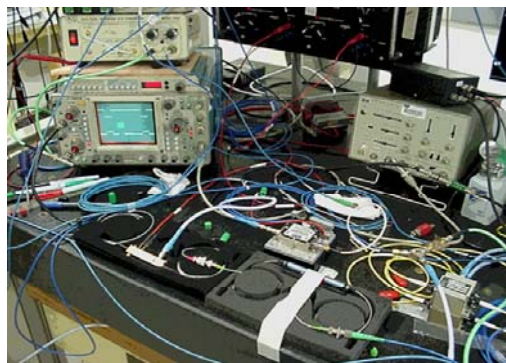


Fig. 17 – Foto do arranjo experimental para geração dos pacotes SH

4.3 – Circuito de Detecção e Reconhecimento de Pacotes Ópticos SH

No intuito de demonstrar a viabilidade prática de geração, identificação, chaveamento e roteamento de pacotes ópticos, baseado pacote-a-pacote, projetamos um circuito que faça o reconhecimento do cabeçalho no domínio da frequência de cada pacote óptico que trafega na rede.

As principais características que a unidade de controle opto-eletrônico, ou seja, o circuito de reconhecimento de cabeçalho, deve apresentar para o correto reconhecimento e chaveamento do pacote óptico, as quais chamamos de ***Regras de Ouro***, são citadas abaixo:

- ✓ Seletividade em frequência;
- ✓ Chaveamento pacote-a-pacote;
- ✓ Estados on/off claramente definidos;
- ✓ Integridade dos pacotes; nenhum pacote pode ser perdido ou parte de suas informações cortadas.

Este circuito deverá reconhecer todos os possíveis tipos de cabeçalho de pacotes e será parte integrante das entradas de todos os nós de uma rede óptica de acesso. O circuito retira uma amostra do sinal presente na rede em cada instante e faz o reconhecimento do tom que determina o endereço do pacote, então o circuito sinaliza para que a chave faça o chaveamento dos pacotes analisados de acordo com o sinal que lhe foi entregue, determinando a posição que a chave deverá assumir para o roteamento do pacote que está sendo analisado naquele instante.

O circuito projetado atendeu parcialmente todas as premissas citadas acima, contudo foi fundamental para demonstrar o princípio de operação de redes ópticas baseadas em chaveamento de pacotes. Além disso, ele nos permitiu entender e desenvolver o experimento básico em chaveamento de pacotes usando um tom de RF como cabeçalho [14]. Apesar das limitações apresentadas por este circuito, que eram a pouca seletividade

em frequência, clareza on/off insuficiente e degradação da taxa de erro operando com relação entre cabeçalho e payload menor que 20%, relação esta que será mostrada adiante.

A figura 19 mostra o diagrama em blocos da operação deste circuito, do qual faremos agora um detalhamento de suas características de operação, além de apresentar suas limitações de operação.

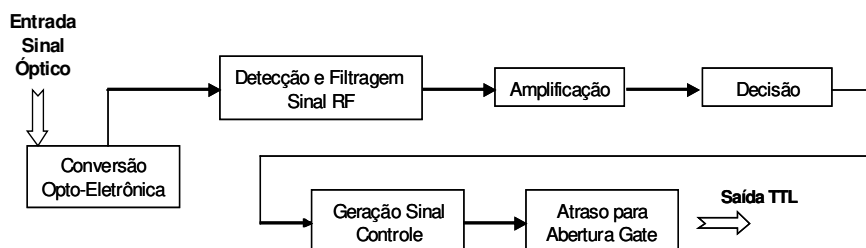


Fig. 18 - Diagrama em Blocos do Circuito de Reconhecimento de Cabeçalho para Pacotes SH

Este circuito apresenta algumas características importantes como sua fácil e barata implementação, dimensões físicas reduzidas além de nos permitir alcançar resultados consideráveis. Sua operação é extremamente simples, após a conversão OE, da amostra do sinal nas entradas das chaves, inicia-se o processo de detecção do cabeçalho, através de filtros de RF em 1ª ordem com $f_c \approx 3$ MHz, após a detecção do tom de cabeçalho o sinal passaria por uma amplificação para suprir as perdas, e conseqüentemente por um circuito de decisão lógica que sinalizará para a etapa de geração do sinal de controle que acionará a chave óptica após a passagem por um circuito de atraso, que foi implantado para evitar cortes nos pacotes.

O uso de filtros de RF como circuito de reconhecimento de cabeçalho trouxe como conseqüência a pouca seletividade em frequência da circuitaria, pois para filtrar um tom em 3MHz o filtro apresentava banda de passagem maior que 1MHz. Com isso, frequências do sinal digital não eram totalmente rejeitadas, fazendo com que os blocos de decisão e de geração da sinalização para a chave operem erroneamente, pois frequências do sinal digital eram confundidas com o cabeçalho; além do mais, quando um pacote não havia cabeçalho

o circuito assumia frequências do sinal digital como sendo de cabeçalho de pacotes. Isso não permitia uma clareza entre os estados on/off de operação do circuito.

Este circuito mostrou viabilidade de operação, dentro de suas limitações, para pacotes com cabeçalho de 2.5-3.8 MHz, mantendo sua característica de pouco clareza on/off; Uma característica importante a ressaltar é que, se ajustarmos sua operação para obter clareza no estado on, comprometemos o estado off; sendo verdadeira a recíproca. Apresentaremos a seguir os resultados obtidos com o uso de pacotes modelo SH e o circuito descrito acima.

4.4 - Chaveamento de Pacotes SH com Reconhecimento de Cabeçalho por Filtros RF

A figura 20 mostra o set-up experimental montado para prover o chaveamento de pacotes SH usando o circuito de detecção descrito na seção anterior. O processo de geração dos pacotes é feito de acordo com os procedimentos descritos na seção 4.2, sendo apenas introduzido um divisor óptico após o controlador de polarização. Este divisor é inserido para termos um tempo de referencia, pois é enviado para a saída apenas o envelope do pacote, o que nos permitirá medir todos os tempos incluídos no processo.

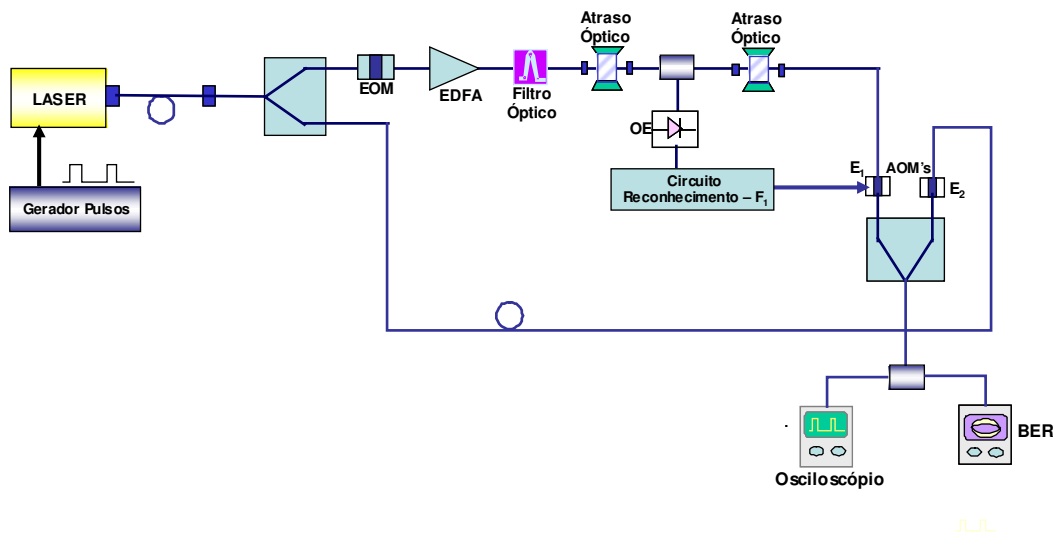


Fig. 19 – Set-up Experimental: Geração, detecção e chaveamento de pacotes ópticos SH

Após concluída toda etapa de geração dos pacotes, o pacote óptico atravessa um nó remoto da rede, localizado a poucas centenas de metros, caracterizado por um carretel de fibra com 500m, onde poderíamos fazer o roteamento dos pacotes, o que não é o caso neste momento. Na entrada do nó o sinal óptico é amostrado, faz-se sua conversão OE, e então é direcionado para o circuito de reconhecimento. Se o pacote possui o tom de cabeçalho f_1 , então o circuito sinaliza para a chave abrir o gate da porta 1 para deixar o pacote óptico passar através desta porta; se não, o gate desta porta permanece fechado. Esse set-up permite medidas de atraso do sinal, com precisão melhor que $0.1 \mu s$. O atraso total para detecção do pacote, processamento do cabeçalho e sinalização para o gate na entrada do nó é $2.5 \mu s$; foi adicionado um atraso óptico para suprir o atraso do processamento dos pacotes, fazendo assim que os pacotes cheguem à chave somente junto com seu respectivo sinal, que definirá a abertura ou não da chave óptica. O gate permanece aberto pelo mesmo tempo da duração do pacote devido termos o tom de RF espalhado durante a duração do pacote, delimitando seu início e seu fim, visando que nenhuma informação contida no pacote seja cortada. Quando o pacote termina, o gate fecha.

Finalmente, o pacote óptico pode ser visualizado na tela do osciloscópio para analisar a performance do gate e medir amplitude e duração dos pacotes. A figura 21.a)

mostra o pulso elétrico, invertido, que é o envelope do pacote com duração típica de $2.4 \mu\text{s}$ e separado aproximadamente $14 \mu\text{s}$ do próximo envelope; b) mostra a referência do sinal óptico alinhado no tempo com a entrada do sinal elétrico e também o pacote óptico deslocado no tempo $4.4 \mu\text{s}$, que é o tempo total para atravessar completamente o circuito óptico. No pacote óptico já estão inseridos o tom de RF e sua carga útil, esta situação abrirá o gate 1 da chave exatamente durante o tempo da duração do pacote, e o gate 2 será mantido fechado simultaneamente através de seu sinal complementar; c) mostra a ineficiência do circuito quando o pacote está sem o tom de RF, estado off, e não temos definida a clareza deste estado.

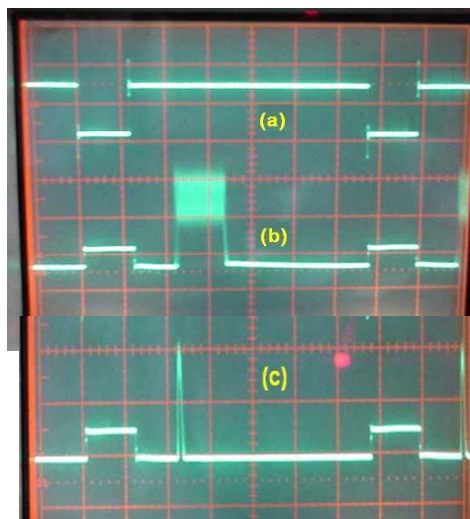


Fig. 20 – a) Envelope; b) Pacote SH; c) Clareza On/Off

Algumas peculiaridades devem ser ressaltadas para conseguirmos os resultados mostrados acima. O tom de RF deve ser maior que 100 mV , para que o gate abra e feche precisamente, além disso, a amplitude do sinal digital não deve exceder 600 mV , caso contrario, algumas componentes espectrais do sinal digital podem mascarar o tom de RF no circuito de detecção de cabeçalho. A amplitude adequada na entrada do circuito de detecção deve estar entre 30 e 60 mV , senão teremos o sinal de gate saturado ou então, não conseguimos ajustar seu ponto de *trigger*.

Os resultados obtidos com o experimento apresentado serviram para validar o princípio de operação de detecção e chaveamento de pacotes ópticos, isto é demonstrado através da presença do sinal digital que não impede a detecção do tom piloto de RF, e por outro lado, o tom de RF não degrada a taxa de erro do sinal digital, operando em condições apropriadas. Contudo, problemas ocorreram. Primeiramente, a abertura do gate é afetada pela presença do sinal digital, que dentro de sua banda base apresenta composições espectrais próximas à frequência do tom de RF, fazendo com que o circuito de reconhecimento interprete de modo errôneo a presença ou não do tom de RF que definirá a abertura do gate. Contudo, essa situação de abertura “espontânea” do gate é cuidadosamente evitada através do ajuste da tensão de polarização do EOM e pela correlação entre as amplitudes dos sinais de RF e digital; porém, não conseguimos sua eliminação. O pico mostrado na figura 21.c) mostra este problema de abertura espontânea do gate. Outro problema percebido é que quando o tom de RF possui uma amplitude insuficiente para ativar o gate, temos uma medida de BER inaceitável, por outro lado, se mantivermos a amplitude do tom de RF fixo em aproximadamente 20% da amplitude do sinal digital, obtemos uma medida de BER aceitável.

No intuito de checar se a presença do tom de RF deteriora a taxa de erro, realizamos medidas com este nas condições on e off. Os resultados confirmaram que a presença ou não do tom de RF não influenciava na taxa de erro, como podemos ver na figura 22.a) enquanto em b), temos as relações entre tom de RF e payload com suas respectivas medidas de BER. O melhor resultado obtido foi $8 \cdot 10^{-13}$, e o resultado típico gira em torno de $2 \cdot 10^{-12}$ para uma potência óptica recebida em torno de -15 dBm. Um atenuador óptico de linha foi introduzido na saída da chave para verificarmos a performance com baixas potências ópticas recebidas. Quando a potencia óptica cai abaixo de -20 dBm, a taxa de erro aumenta consideravelmente.

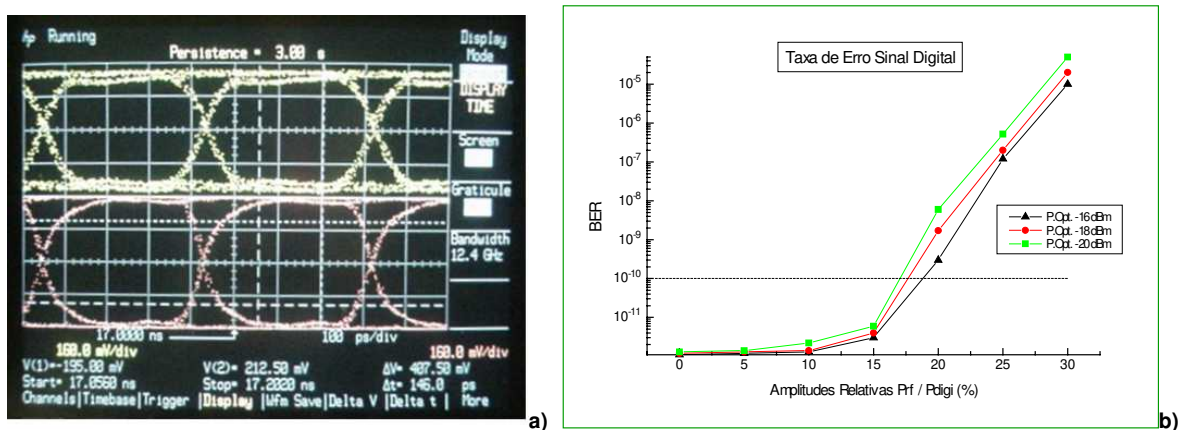


Fig. 21 – a) Medida de BER para chaveamento de pacotes SH; b) Relação entre potência do tom de RF e a potência aplicada no sinal Digital

4.4.1 – Discussão dos Resultados

O set-up apresentado comprova a viabilidade de se gerar, detectar e chavear pacotes ópticos usando um tom de RF em 3 MHz como cabeçalho padrão. A presença deste tom não degrada a carga útil, e a presença desta carga (à 2.5 Gbps) não impede o reconhecimento do pacote pelo circuito.

Os resultados mostrados pelo gráfico 22.b) foram alcançados após diversas medidas realizadas em laboratório, onde concluímos que com baixas amplitudes do sinal digital a abertura do gate pelo circuito de controle ocorre normalmente. Depois de comprovado o princípio de chaveamento de pacotes ópticos com cabeçalho em frequência, partimos para uma etapa de otimização dos pacotes ao estudo apresentado.

Uma alternativa para otimizar a integridade do payload ou melhorar a taxa de erro é incluir um circuito de extração no destinatário final, que receberá o sinal antes do medidor de BER. Este procedimento de extração da portadora é válido no sentido de evitar interferências entre o tom de RF e o payload do sinal, porém, para tal otimização o primeiro passo será a implementação de um circuito de reconhecimento de cabeçalho mais seletivo, através de um filtro, função desempenhada por um cristal oscilador que reconhece o tom de

cabeçalho, apresentando largura de faixa < 0.5 KHz e que forneça alta amplitude do sinal na saída do circuito de reconhecimento que controla a abertura do gate da chave, que representa o nó óptico, este circuito é descrito a seguir.

4.5 – Chaveamento de Pacotes SH através de Reconhecimento de Cabeçalho com Cristal Oscilador

Este novo circuito foi proposto para superar as deficiências do circuito apresentado na seção anterior, através do uso de cristais osciladores atuando como filtros de frequências com faixa de passagem na ordem de KHz. Neste modelo, além de se detectar o tom de RF leva-se em conta a amplitude do pacote. A figura 23 mostra o diagrama deste novo circuito e sua proposta de ter dois ‘braços’, um usado para detectar o tom de cabeçalho e outro para detectar o envelope, e somente depois sendo combinados para atuarem, em nível TTL, na operação da chave.

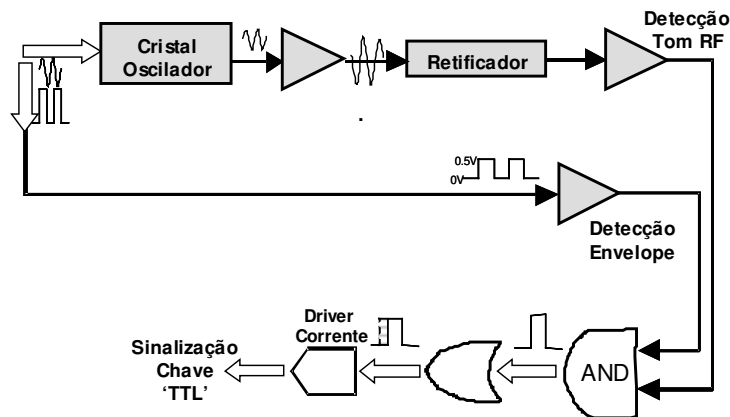


Fig. 22 - Diagrama em blocos do circuito de Reconhecimento baseado em Cristais Osciladores

O tempo de detecção do envelope do pacote ocorre em aproximadamente 2ns, que é o próprio tempo de subida (rise time) do envelope. Contudo este envelope espera a sinalização de reconhecimento do tom de cabeçalho pelo outro ‘braço’ do circuito durante poucos μ s, para que, somente neste momento ocorra à sinalização de decisão para a chave. Este atraso interno no circuito de reconhecimento de cabeçalho é diferente do atraso óptico

inserido no set-up experimental, que é rigorosamente ajustado para que o pacote óptico só chegue ao nó depois do gate da chave aberto, garantindo sua integridade. As principais características deste circuito é a geração de pacotes duplos e o novo método de filtragem e detecção do tom de RF. Este modelo garante exatamente uma fina seletividade em frequência, uma perfeita clareza entre os estados on/off, além de garantir a integridade do pacote.

O set-up experimental é mostrado na figura 24 e foi usado para testarmos as funcionalidades do circuito em operação. Nesta configuração onde ambos os braços geram pacotes simultaneamente é necessário incluir mais um atraso óptico para evitar a sobreposição dos pacotes na etapa de amplificação óptica, pois esta etapa é compartilhada por ambos os braços, tornando o estudo mais simples e reduzindo custos. Além disso, a presença do EDFA torna o nó óptico praticamente sem perdas.

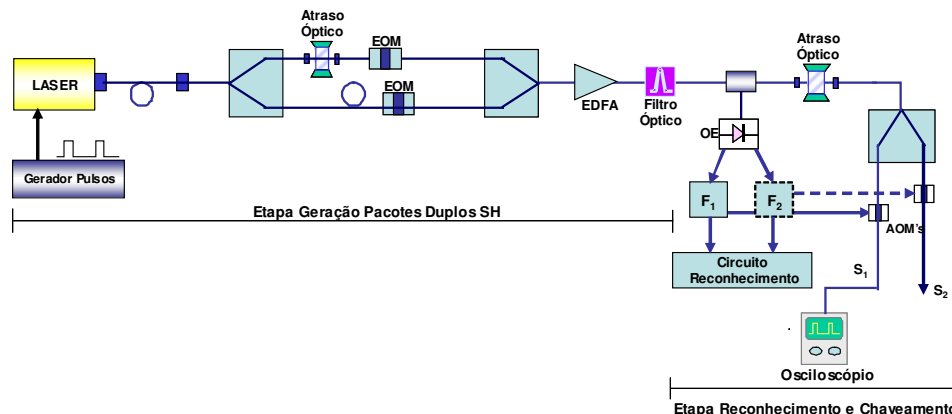


Fig. 23 – Set-up experimental: Geração, Reconhecimento e Chaveamento de Pacotes SH, através de Cristais Osciladores como filtros

A figura 25 mostra os resultados obtidos usando cristais osciladores como filtro do tom de cabeçalho. A duração dos pacotes ópticos pode variar entre 2-4 μs e período entre 6-12 μs . Porém, trabalhamos com $\tau_p = 2\mu\text{s}$ e $\tau_{pp} = 7\mu\text{s}$, valores estes adotados para propiciar uma melhor visualização dos pacotes no osciloscópio. O traço superior em 25.a) e b) é o envelope do pacote, enquanto que o inferior mostra os pacotes com e sem cabeçalho e carga útil, vindos dos braços distintos do circuito. O atraso entre os dois braços para evitar a

sobreposição dos pacotes no EDFA é $2.5\mu\text{s}$. Em a), vemos a inserção do tom de RF e do PRBS em pacotes que trafegam pelo braço óptico sem atraso. Enquanto em b), vemos os pacotes quando é inserido tom e payload através do braço longo, com atraso.

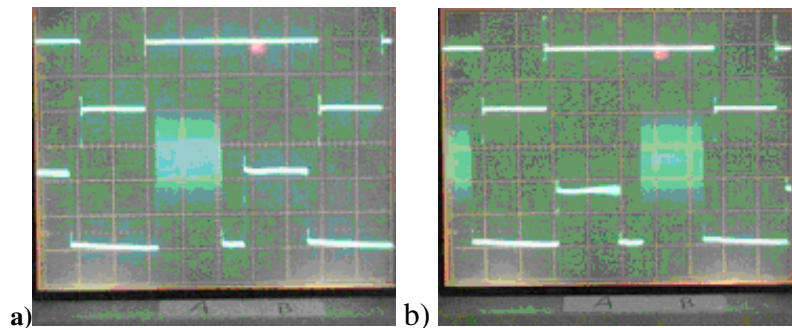


Fig. 24 – Roteamento Pacotes SH; a) Canal Óptico Curto; b) Canal Óptico Longo

As fotos acima ilustram os pacotes na saída da chave óptica, é necessário ressaltar que este modelo contempla um avanço, já visando trabalhar com mais que um cabeçalho, porém analisamos pacotes com apenas um tipo de cabeçalho. Onde após o reconhecimento do pacote, que só é possível devida a característica única deste circuito com etapas distintas de reconhecimento, em que uma seção detecta a amplitude do pacote e outra o tom, e somente quando estas informações são combinadas é que o circuito gera um nível TTL para controlar a abertura do gate óptico. Este gate nada mais é que um AOM, que apresenta “rise/fall time” igual a $0.1\mu\text{s}$. O ajuste do tempo de guarda dos pacotes ópticos é dado por um carretel de fibra, e pelo ajuste do atraso elétrico na saída do circuito de reconhecimento. Em outras palavras, após a entrada dos pacotes ópticos no AOM, ele passa por inteiro, ou seja, o pacote não é cortado, caso contrário o gate não abre e os pacotes são perdidos na entrada do AOM, estado off do circuito de reconhecimento, como mostra a figura 26.

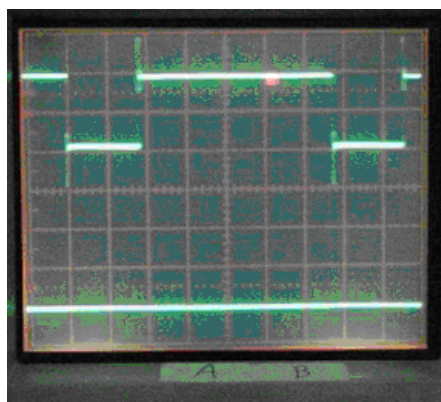


Fig. 25 – Clareza de operação entre os estados on/off

A seletividade em frequência é confirmada através da variação da frequência do tom de RF, no ato de sua inserção no pacote, apresentando seletividade melhor que 0.1KHz para cabeçalhos com frequências de 1-5 MHz. Isto possibilita a implementação de muitos pacotes com cabeçalho diferente dentro de uma estreita faixa do espectro. Estes diversos pacotes podem ser criados através da natural independência entre a geração dos pacotes em cada braço óptico, inserindo um tom diferente a cada vez.

Outro teste realizado com este set-up foi inserir o sinal digital em um braço e o tom de RF em outro, tendo um pacote só com cabeçalho e outro só com sinal digital, formando juntos um pacote óptico completo. Mesmo sendo esta proposta atraente no ponto de vista de independência entre os sinais, pois elimina a possibilidade de interferência no processo de detecção, esta proposta apresenta uma ineficiência no que diz respeito à utilização da banda de transmissão da rede, reduzindo a capacidade da rede a metade. O que torna a proposta inviável com este processo de geração dos pacotes. Porém esta tentativa nos abriu uma nova possibilidade de implementação que será apresentada a seguir, onde através de circuitos digitais criamos um pacote com total independência entre cabeçalho e carga útil. Esta proposta foi bem aceita, pois além de propiciar a independência entre os sinais, eliminávamos a principal ineficiência do circuito apresentado nesta seção, que apresentava um tempo de oscilação do cristal na ordem de ms, fazendo com que uma vez aberto o gate do AOM outros pacotes passavam sem que fossem tratadas suas informações, o que

descaracterizava o chaveamento pacote-a-pacote, nos levando a abandonar este modelo de circuito de reconhecimento.

4. 6 – Considerações Finais

Vimos que nos experimentos apresentados nas duas últimas seções conseguimos de modo satisfatório comprovar o princípio de geração, detecção e chaveamento de pacotes ópticos com cabeçalho no domínio da frequência, mesmo que dentro das limitações de cada circuito. Nestes experimentos adotamos AOM's como chaves 1x1 o que não se adequou a arquitetura de rede óptica de acesso em malha proposta neste estudo, MS, onde cada nó da rede, chave óptica, possuirá 2 entradas e 2 saídas, permitindo a técnica de roteamento por deflexão e conseqüentemente ausência de armazenadores ao longo da rede, tornando o trabalho viável economicamente.

A implementação de um nó óptico 2x2 traz a necessidade de se ter pacotes na rede com diferentes tons de cabeçalho, fazendo com que o circuito faça seu correto chaveamento e roteamento, levando em consideração a matriz de roteamento do nó em questão.

Tal adequação do estudo as arquiteturas de redes ópticas propostas foi realizada depois de concluída a implantação de um sistema de reconhecimento de cabeçalho mais eficiente e confiável que será apresentado no capítulo 5 a seguir. Para tal adequação chaves ópticas 2x2 serão inseridas no estudo. Duas arquiteturas de chaves foram estudadas para avaliar sua utilização, chave Eletro-Óptica (Apêndice B) e Acusto-Óptica (Apêndice C).

Capítulo 5 - Desenvolvimento Experimental de Nós de Chaveamento de Pacotes Ópticos tipo *Field Header - FH*

Com o modelo de pacote óptico SH as condições de operação se tornaram impróprias, principalmente devido à dificuldade de se conseguir um processamento eletrônico capaz de desvencilhar todas as frequências e seus espectros dentro da banda base de transmissão e tratar o pacote e seus dados de forma correta. Logo, as limitações apresentadas até aqui por ambas propostas devem ser aprimoradas. Este novo modelo de pacote óptico, apresenta campos distintos para cabeçalho e carga útil, denominado *field-code header*, denominado pacote FH. Foi proposto buscando as possibilidades de operação que pode oferecer, além de ser possível implementar um circuito digital de reconhecimento do modo mais simples e mais barato e que atenda todas as **Regras de Ouro** do trabalho apresentadas anteriormente, e que são vitais também para este modelo de pacote.

Ao contrário do SH que possui cabeçalho espalhado ao longo do pacote dificultando seu reconhecimento pela presença de diversos espectros de frequência, o FH possui cabeçalho e payload totalmente independentes, permitindo fácil reconhecimento de cabeçalho, e garantido a não degradação da taxa de erro em função da potência do tom de RF, pois o chaveamento de pacotes ópticos deve prover grande flexibilidade e fácil gerenciamento da rede devido à manutenção da informação no domínio óptico desde a fonte ao destino. O chaveamento óptico combina alta velocidade de chaveamento e grande largura de banda, provendo alta vazão na rede, Tbps [3].

5.1 – Estrutura dos Pacotes FH

A estrutura deste pacote e seu diagrama são mostrados na figura 27 a seguir. Composto por dois campos distintos, um pequeno cabeçalho seguido por um longo corpo que transporta a informação para o usuário final. A relação entre os dois campos pode variar desde 0.1/0.9 a 0.5/0.5, porém neste estudo trabalhamos com relação em 0.25/0.75 por questões de implementações e adequações das medidas em laboratório.

O cabeçalho contém a informação do endereço do nó de destino do pacote e seu corpo transporta a informação destinada ao usuário final. Esses dois campos formam juntos uma estrutura TDD, onde o cabeçalho é contido no domínio da frequência e corresponde unicamente a um endereço de nó da rede óptica de acesso. Atualmente a característica predominante no ponto de vista de redes ópticas é a técnica de endereçamento [32] [33], que no caso deste pacote, é o endereço contido apenas no campo de cabeçalho; e o outro campo sendo destinado apenas ao payload, de onde surge o nome de pacote óptico FH, contendo campos específicos para cabeçalho e payload.

O campo de carga útil é transparente a taxa e/ou formato de dados, porém adotamos trabalhar com palavras PRBS ($2^{23} - 1$ à 2.88 Gbps), não se aplicando nenhuma restrição em relação às redes ópticas. A única restrição que tem de ser considerada é a razão entre a taxa de bits e a maior sequência de símbolos iguais (0's ou 1's) que deverá ser maior que 400 MHz. A razão para isto se torna clara com o desenvolver do processo de detecção do pacote, o qual veremos posteriormente.

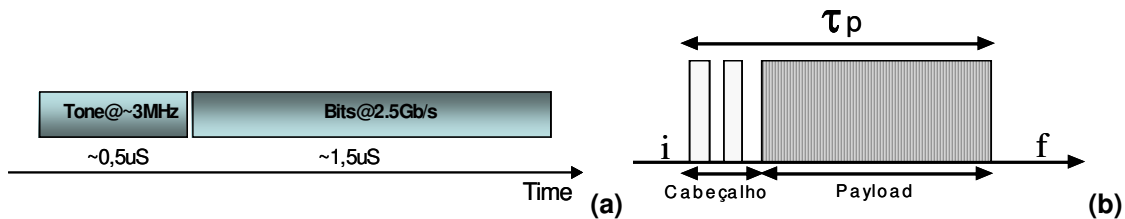


Fig. 26 – Pacote FH : a) Estrutura; b) Diagrama do Pacote Óptico FH

5.2 – Geração dos Pacotes Ópticos FH

Como dito acima, a informação de endereço do pacote é contida no cabeçalho, isto é, a ocorrência entre as transições de 0's e 1's dentro de um pré-determinado intervalo de tempo, ou o intervalo entre a subsequente transição é que determina a frequência do tom de cabeçalho, ou seja, seu endereço. Contudo, a frequência do tom não implica que este seja, necessariamente, uma onda senoidal (análogica). Caso contrário, durante o processo de

detecção da frequência é usual limitar o sinal através de uma forte amplificação e direcionando-o a um comparador, eliminando todas características analógicas do sinal e, conseqüentemente a susceptibilidade do processo de detecção a uma eventual modulação em amplitude que poderia estar presente no sinal.

A construção deste novo pacote deu-se através da programação de um gerador de padrão (HP 70841 B), onde os cabeçalhos são seqüências fixas entre 0's e 1's e o payload um PRBS ($2^{23}-1$ à 2.88 Gbps), com tamanhos distintos entre cada campo. Podem-se implementar cabeçalhos com varias frequências, porém com o mesmo tamanho de campo. Trabalharemos inicialmente, com uma seqüência continua de pacotes com 3 frequências distintas de cabeçalho: $f_1 \approx 3\text{Mhz}$; $f_2 \approx 6\text{ Mhz}$ e $f_3 \approx 9\text{ Mhz}$. A tabela II mostra construção de cada pacote com seus respectivos cabeçalhos e a separação entre cada pacote.

Bit Inicial	Bit Final	Comprimento (bits)	Valor Bit	Descrição
0	5039	5040	0	Separação entre Pacotes
5040	5459	420	1	Cabeçalho 1 = 3MHz
5460	5879	420	0	
5880	6299	420	1	
6300	10079	3780	PRBS	
10080	15119	5040	0	Separação entre Pacotes
15120	15371	252	1	Cabeçalho 2 = 6 MHz
15372	15623	252	0	
15624	15875	252	1	
15876	16127	252	0	
16128	16379	252	1	
16380	20159	3780	PRBS	
20160	25199	5040	0	Separação entre Pacotes
25200	25379	180	1	Cabeçalho 3 = 9 MHz
25380	25559	180	0	
25560	25739	180	1	
25740	25919	180	0	
25920	26099	180	1	
26100	26279	180	0	
26280	26459	180	1	
26460	30239	3780	PRBS	
				Carga Útil (@2.5 GHz)

Tabela II – Construção dos Pacotes Ópticos FH

O padrão dos pacotes com um tamanho fixo de 5040 bits, sendo 1260 bits para cabeçalho e 3780 bits para payload, apresenta no cabeçalho, bits distribuídos de modo diferente para formar um conjunto de 3 pacotes ópticos com cabeçalhos distintos num total de 30240 bits. O payload é composto por um sinal PRBS ($2^{23} - 1$) numa taxa de 2.5 a 3.2 Gbps. A figura 28 mostra os pacotes ópticos na tela de um osciloscópio implementados numa seqüência contínua f_1 , f_2 e f_3 , com separação entre pacotes igual ao tamanho do pacote, τ_p , e relação entre cabeçalho/payload 0.25/0.75, podendo variar desde 0.1/0.9 a 0.5/0.5, com duração típica de 1.8 μ s, também sendo variável desde 1.5 a 2.5 μ s.

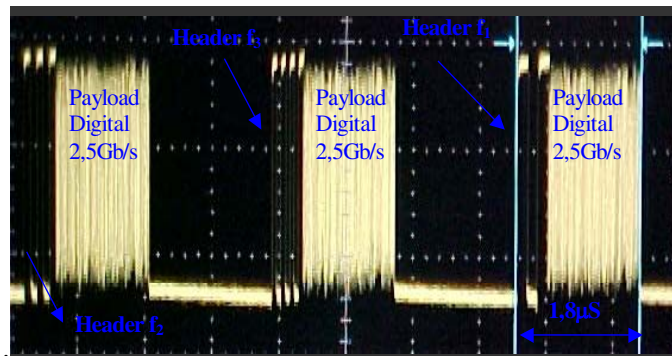


Fig. 27 – Padrão de tráfego dos Pacotes Ópticos

5.3 – Reconhecimento de Pacotes Ópticos FH – Circuito HRC

O número de possíveis endereços diferentes e válidos na rede pode ser alto, até algumas dezenas, mais são limitados para atenderem a premissa de uma rede óptica de acesso; e são estes cabeçalhos em frequência que devem ser identificados, não havendo nenhum tratamento da informação do payload, pois se trata de uma rede transparente a taxa e/ou formato dos dados que nesta trafegam. Portanto, a identificação do endereço se torna um processo de medida de frequência, através das transições de níveis do cabeçalho. Como a velocidade de identificação do endereço é de suma importância para o estudo, pois atua diretamente no processo de chaveamento e conseqüentemente na latência da rede, pois o atraso de grupo (τ_g) do sinal através de um circuito é inversamente proporcional a

seletividade deste. Para superar as considerações descritas acima usamos o princípio básico do contador de frequências.

A tecnologia “fast TTL” garante que a velocidade de processamento com tempo típico de propagação de gate na ordem de 3ns. O diagrama em blocos e o esquemático funcional do circuito de reconhecimento de cabeçalho - HRC são mostrados abaixo na figura 29.

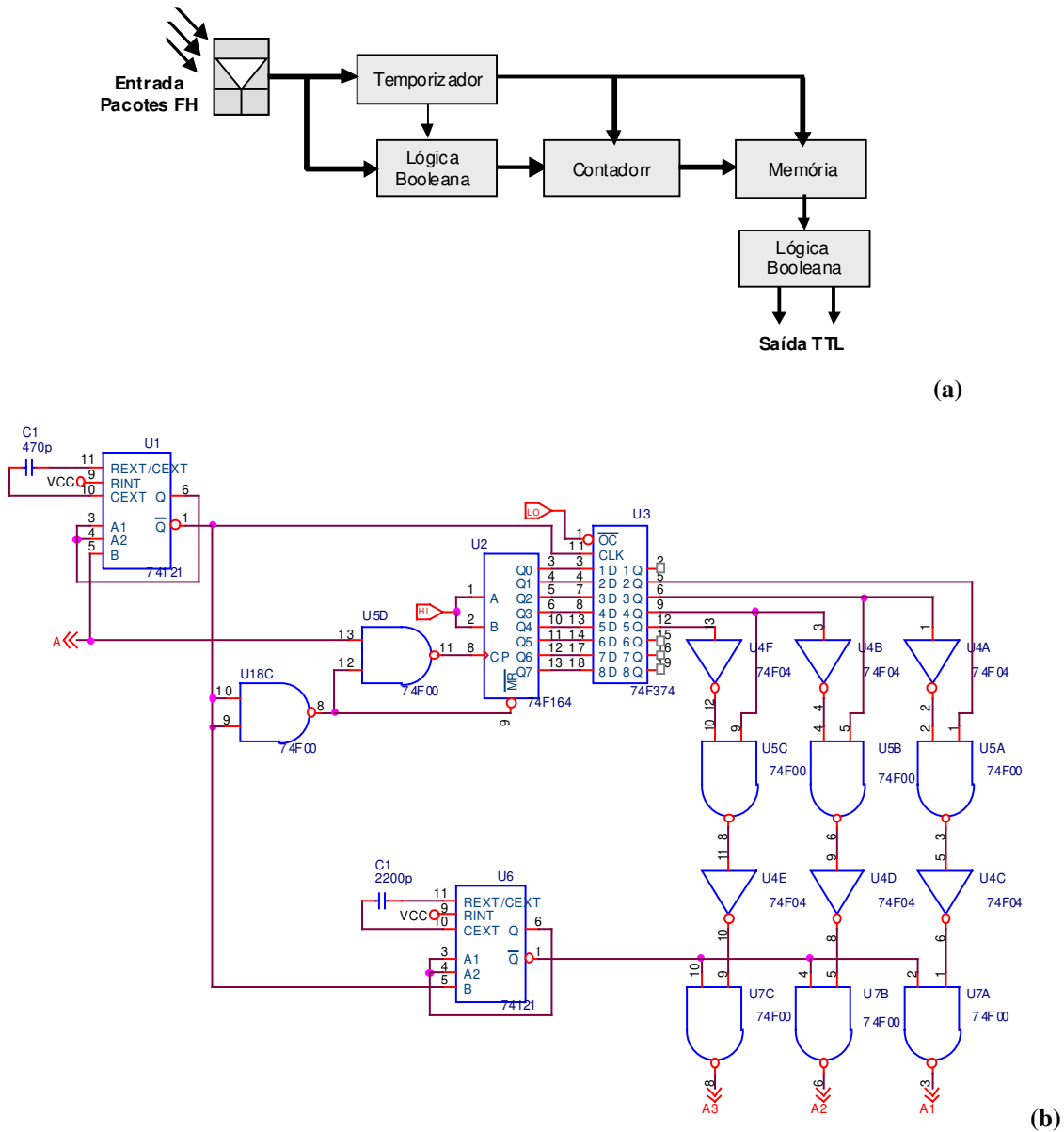


Fig. 28 – Circuito Reconhecimento HRC: a) Diagrama em blocos; b) Esquema Elétrico

O contador (U_1) é disparado pela transição de subida na chegada do pacote no nó e controla uma chave (U_5), e é responsável por determinar o tempo de gate referente ao cabeçalho e o temporizador (U_6) é responsável por determinar o tempo de gate referente ao payload através de uma constante de tempo (RC) determinada pelos capacitores C_1 e pela resistência interna destes circuitos; ambos os gates, cabeçalho e payload, são combinados por uma lógica booleana AND (U_7) e com duração mínima igual a duração do pacote óptico, garantindo que este não seja cortado. Cada transição de subida dentro do tempo de gate adiciona '1' para iniciar o contador (U_2). Ao término do período de cabeçalho, a contagem é transferida para uma simples memória (U_3), então os contadores e o temporizador são reiniciados, ficando disponível para uma nova contagem, ou seja, a chegada de um novo pacote. É importante ressaltar que as transições (PRBS) dentro do payload não interferem no processo de detecção, isto é, não iniciam o processo de detecção do cabeçalho ao longo de sua duração e, em relação a máxima sequência de símbolos iguais (1's ou 0's), implicando numa frequência menor que 400 MHz, devido a limitação de velocidade do circuito lógico (200 MHz). Como foi dito, uma simples combinação lógica (U_6 e U_7) fará a sinalização para a comutação da chave AOS, situação esta que abordaremos agora, e a seguir veremos a implementação de um circuito lógico de decisão - LDC, que fará a sinalização para a chave AOS fazer o roteamento correto dos pacotes, de acordo com uma tabela pré-definida de alocação frequências.

5.4 – Experimentos Práticos com Pacotes Ópticos FH

5.4.1 – Chaveamento de Pacotes FH com Chaves AO – Configuração 2x[1x2]

Após a geração e implementação do novo pacote, com campos distintos para cabeçalho e payload, que proporcionaria a não interferência no processo de detecção do tom de cabeçalho devido à presença do sinal digital, payload, e conseqüentemente não degradaria a taxa de erro no sinal digital, como requerido para sistemas práticos [34].

A figura 30 abaixo mostra o novo set-up para geração, detecção e chaveamento de pacotes ópticos FH usando duas chaves AOS onde o tráfego de pacotes entra apenas em uma de suas portas, ficando a outra nula, e podem sair por qualquer uma das portas, caracterizando a operação de chaveamento do experimento em $2 \times [1 \times 2]$. Os pacotes são construídos diretamente em um gerador de padrão e inseridos num modulador EO, onde junto com a luz, após passar por um controlador de polarização, formam o pacote óptico. O mesmo procedimento na geração dos pacotes ópticos SH são adotados aqui, no que diz respeito a geração, exceto o modo de sua construção, além de ser necessário um controle de polarização da luz devido a alta sensibilidade dos moduladores de LiNbO_3 , minimizando as perdas de potência devido a dispersão do modo de polarização; e por fim, é necessário sua amplificação através de um EDFA e sua filtragem óptica para eliminar a ASE.

Em comparação ao pacote SH sua geração é muito mais simples. Nesta nova configuração o laser opera em modo CW, com o envelope do pacote sendo criado pelo próprio modulador EO, isto poderia ser feito externamente através de uma modulação, o que poderia ter um impacto positivo no ponto de vista econômico, tornando o nó da rede mais barato, mais isso deve ser analisado cuidadosamente, pois a modulação externa do laser causa chirping e pode degradar o sistema [35].

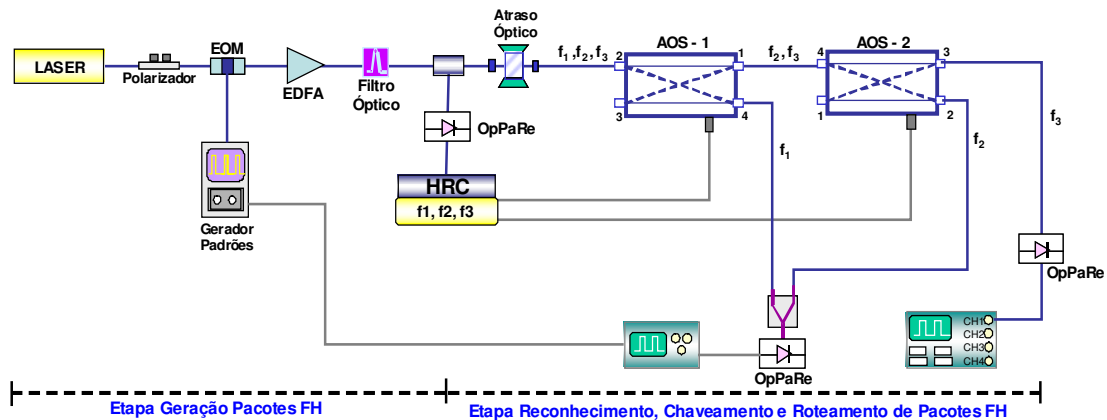


Fig. 29 – Set-Up Experimental: Pacotes FH usando AOS 2x2

Após a etapa de geração dos pacotes, é inserido um divisor óptico do qual é retirada uma amostra do sinal que será convertido em elétrico através do OpPaRe (Apêndice D), circuito que foi projetado e implementado visando sua utilização no estudo para minimizar custos e otimizar performance. O sinal principal é encaminhado para um atrasador óptico de aproximadamente 3 μ s (600 m de fibra óptica) que é tempo suficiente e necessário para todo processamento eletrônico, incluindo a conversão OE, o processo de detecção do tom de cabeçalho e o envio do gate que controlará a chave AOS, para que sua operação seja realizada de acordo com o endereço contido no cabeçalho do pacote que está sendo processado pelo HRC naquele instante. O HRC deve garantir que o gate enviado a chave seja suficientemente maior que a duração do pacote, com isso a chave atuará exatamente sobre o pacote em questão e fará seu chaveamento sem que haja perdas de informação por corte. O HRC processa os cabeçalhos de todos os pacotes, porém trabalharemos com os pacotes com cabeçalho f_1 e f_2 , dos quais serão provenientes os gates que farão com que as chaves adotem um de seus estados, paralelo ou cruzado, pré-definido pela tabela de alocação de frequências em cada nó, e assim, faça o chaveamento correto destes pacotes.

Para este set-up adotamos o princípio de chaveamento onde pacotes com cabeçalho f_1 devem ser retirados localmente na chave AOS-1 e pacotes f_2 na AOS-2, ficando f_3 transparente ao roteamento, o que fará que pacotes com este endereço de cabeçalho seja enviado para o nó seguinte da rede continuamente, aumentando seu *time-to-live*, o número de hops e degradando a latência desta, até que este pacote seja roteado em um nó que tenha em sua tabela de chaveamento sua frequência correspondente. Apesar do processo de geração e chaveamento destes pacotes ser similar ao pacote SH seu processo de detecção é muito mais simples e ordens de grandeza mais rápido. A figura 31 mostra os resultados de chaveamento destes pacotes com um tráfego padrão de pacotes gerados numa sequência continua f_1 , f_2 e f_3 , com duração típica de 2 μ s, relação payload-cabeçalho 0.5/0.5 e 1 μ s de separação entre pacotes.

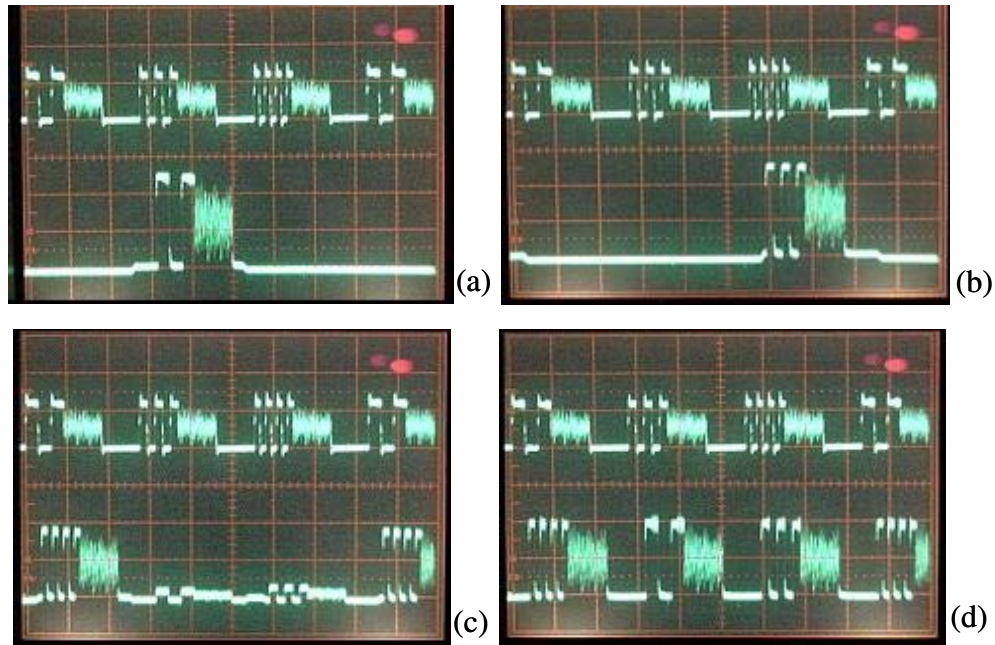


Fig. 30 – Resultados do Chaveamento Óptico de Pacotes FH. a) Retira f_1 – AOS 1; b) Retira f_2 – AOS 2; c) Segue f_3 – AOS 2; d) Segue Todos – AOS 2

Os resultados apresentados acima mostram o chaveamento de pacotes ópticos FH. O traço superior em todas as figuras é o modelo proposto do tráfego de pacotes na rede óptica e dos quais serão retiradas amostras para a conversão OE e o processamento eletrônico, pelo HRC que comandará a ação de chaveamento. O tráfego ao qual é imposta a rede e do qual é retirado uma amostra direta para o osciloscópio, tem como função servir como uma referência, nos permitindo dimensionar todos os tempos envolvidos no processo, desde a geração do pacote elétrico, sua conversão EO, os tempos de processamento, e a retirada destes pacotes da rede em uma das saídas da chave AO, do qual teríamos a latência da rede.

Neste set-up todos os pacotes têm como destino a entrada 2 da chave AOS-1, que quando sentir a presença destes pacotes em sua entrada já deve estar sinalizada pelo HRC para que ela assuma seu estado de operação adequado, paralelo ou cruzado, e faça o chaveamento correto dos pacotes. Em a), pacotes com cabeçalho $f_1 \approx 3\text{MHz}$ são retirados da rede, isto é, o HRC reconhece todos os cabeçalhos e manda um sinal TTL, referente ao pacote f_1 , para a chave AOS-, e esta chave por sua vez, quando receber este sinal já deve estar com o estado cruzado adotado, para que seja feita a remoção da rede de pacotes f_1

através da porta de saída 4. Enquanto os demais pacotes são direcionados a saída 1, ou seja, para o nó seguinte da rede, chave AOS-2. Isto confirma o princípio de operação baseado em deflexão [23][36] pois ao chegar os outros pacotes a chave estava atendendo uma requisição, retirar pacotes f_1 da rede, não podendo mudar seu estado de operação o que acarretaria em perda de pacotes, com isso os outros pacotes são encaminhados para a saída 1 da chave AO-1, única disponível naquele instante e que poderia ser a saída não preferencial destes pacotes.

Pacotes com cabeçalho f_2 e f_3 são direcionados a entrada 4 da chave AO-2, esta chave por sua vez, recebe um sinal TTL do HRC correspondente aos pacotes com cabeçalho f_2 , para que estes sejam retirados da rede. Detectando a presença destes pacotes o sinal referente a ele já sinalizou para que a chave AO-2 assuma o estado cruzado sempre que pacotes com este cabeçalho estejam passando pelo nó, como podemos ver em 31.b). A chave só não assumirá a posição cruzada quando detectar estes pacotes, caso já esteja atendendo uma outra situação em que sua posição é paralela, pois haveria corte em pacotes.

Pacotes com cabeçalho f_3 são tratados pelo HRC, contudo não há sinalização relacionada a estes pacotes para as chaves, logo estes seguirão para um próximo nó, saída 3 da chave AO-2, dando mais alguns hops na rede até serem chaveados em um nó remoto, como podemos ver em 31.c), que mostra sua passagem por ambas as chaves sem nenhuma alteração. Em 31.d) vemos o tráfego padrão de pacotes chegando na chave AO-1 e saindo pela AO-2 sem que haja nenhum chaveamento pois o HRC está desligado, não sinalizando para nenhuma das chaves.

Em 31.a) e b) notamos claramente o gate da chave pouco maior que a duração dos pacotes, garantindo a integridade do pacote durante o chaveamento. Notamos também uma taxa de extinção melhor quando a AOS-2 opera em seu estado cruzado do que no estado paralelo, que não acontece na AOS-1.

Com os resultados acima fica claro o atendimento de todas as **Regras de Ouro** proposta para este trabalho:

- ✓ *Seletividade em frequência;*
- ✓ *Chaveamento pacote-a-pacote;*
- ✓ *Estados on/off claramente definidos;*

Como os resultados acima foram satisfatórios e animadores, além de apresentarem operação respeitando algumas regras de ouro, partimos para a implementação de uma topologia 2x2, com um circuito lógico de decisão de contenda que comandará as ações de chaveamento através do sinal proveniente do HRC, permitindo que façamos o roteamento dos pacotes ópticos FH e obedecendo a última regra de ouro, *Integridade dos Pacotes*. As características de operação deste circuito serão mostradas com detalhes a seguir..

5.5 - Circuito Lógico de Decisão de Contendas - LDC

Depois de descrito os princípios de geração, detecção e chaveamento dentro de um nó óptico numa configuração 2x[1x2] migramos para uma configuração 2x2, onde temos apenas uma chave óptica operando com a possibilidade da chegada de pacotes simultaneamente em ambas entradas e disputando ou não, a mesma saída, o que pode caracterizar uma situação de contenda. Baseado em uma das propostas deste estudo, a rede óptica de acesso em questão é desprovida de buffer, tornando-a mais viável economicamente, portanto, torna-se necessário um circuito capaz de solucionar toda contenda possível, pois trabalhamos com um sistema assíncrono e não temos intervalos de tempo definido para a chegada dos pacotes, possibilitando que em qualquer instante possa ocorrer uma situação de contenda. Este circuito deve ser capaz de solucionar toda e qualquer contenda sem que haja corte ou perda nos pacotes, ao qual denominamos circuito lógico de decisão de contendas – LDC.

Para a operação correta do controle da chave óptica em um nó da rede, é necessário estabelecer critérios de decisão para solução de contendias entre pacotes em ambas portas da chave. Se dois pacotes chegam simultaneamente em ambas portas e têm o como destino a mesma porta de saída, é necessário estabelecer quem vence a contendia. O pacote que vence a contendia é direcionado para sua porta de saída preferencial.

Por se tratar de um sistema assíncrono pode-se ter um pacote chegando na chave enquanto outro estiver transitando por ela, isto é, sendo chaveado. Então se deve aplicar uma das premissas do estudo, nenhum pacote pode ser cortado; portanto, enquanto um pacote está passando pela chave e outro é detectado em sua entrada, este segundo pacote deve ser direcionado para a porta de saída disponível assegurando a integridade do pacote em trânsito. O LDC deve ser capaz de sentir o estado da chave a todo instante para que possa mudar seu estado somente quando não haja pacotes no interior da AOS, e deve garantir que todas espécies de contendias devam ser solucionadas sem que haja perda de pacotes e baseado na teoria de FIFO [37].

Projetamos e implementamos o LDC, de modo que este seja capaz de operar obtendo a performance descrita acima. Os primeiros testes foram simulações feitas através da plataforma P-SPICE v-9 e visaram sua implementação prática, isto é, trabalhar com os sinais de gate referentes aos pacotes f_1 e f_2 provenientes do HRC, e que antes eram responsáveis pela ação de chaveamento. Então o LDC processa os sinais através de circuitos lógicos enviando um gate TTL que irá comandar a ação de roteamento no nó da rede óptica. A passagem de um pacote pela chave faz com que o circuito se desabilite para mudança de seu estado de operação, que só é permitida quando ocorre o término da transferência do pacote e não há outro já sendo roteado pela saída disponível, que poderia ser enviado a sua saída não preferencial, DR [23][36], portanto ele seguiria para outros nós da rede, podendo causar novas contendias, até encontrar seu endereço final definido pelo cabeçalho [14]. Para que a chave se torne disponível novamente, é necessária que ela sinta o canal vazio, ausência de pacotes no interior e/ou em suas entradas, mesmo que este tempo de vazio seja muito pequeno, na ordem de centenas de ns. A figura 32 mostra o esquema elétrico do circuito projetado e seu respectivo resultado durante o processo de simulações.

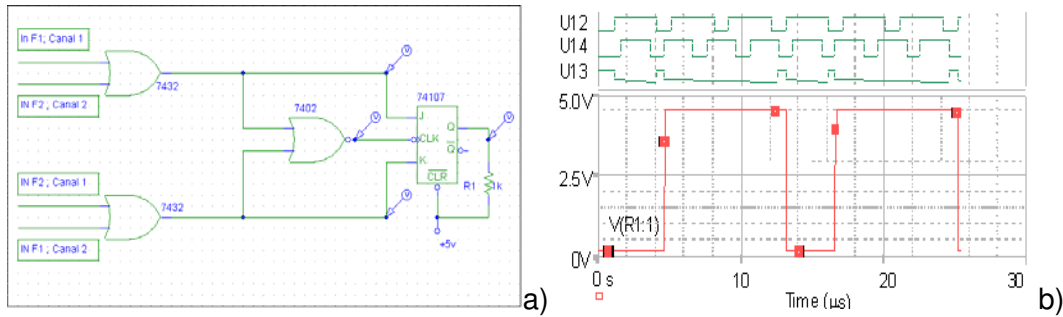


Fig. 31 – a) Esquema Elétrico LDC; b) Resultados Simulação

A possibilidade de contenda é mostrada na figura 33, através do diagrama de um nó óptico operando com 2 entradas e 2 saídas. As formas de onda mostradas acima representam:

- **U12:** representa pacotes f_1 chegando na entrada 1 da chave; para esta situação a chave atuaria em estado paralelo, nível lógico baixo, e este pacote seria retirado pela saída 2.
- **U14:** representa pacotes f_2 chegando na entrada 4 da chave; portanto, a chave atuaria em estado cruzado, nível lógico alto, e o pacote seria encaminhado para a saída 3 da AOS.
- **U13:** É o pulso de clock do flip-flop que atua em transição de descida. A chave estará habilitada a mudar seu estado lógico quando o sinal de clock estiver em nível alto. Ocorrendo a transição de descida, a chave adota um estado e o circuito a bloqueia até que ocorra um novo evento.
- **(VR1:1):** é o sinal de saída do LDC que permitirá a chave AO permanecer no mesmo estado lógico enquanto um pacote passa por ela. O estado lógico da chave é definido, como mencionado, a partir da teoria de FIFO em caso de haver contendas. Uma característica importante deste projeto foi usar o sinal de clock do flip-flop como sendo a qualificação do sinal que comandará o roteamento dos pacotes ópticos, assim ambas entradas do flip-flop JK podem compartilhar das informações.

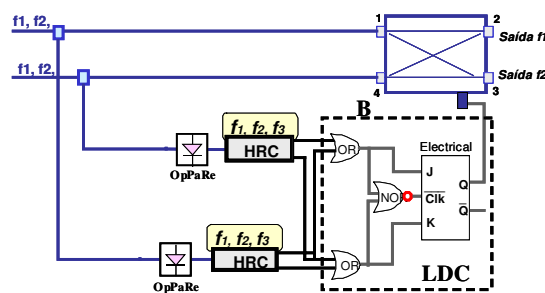


Fig. 32 – Set-up Experimental que oferece Contenda entre Pacotes

A principal dificuldade durante a etapa de simulação foi o software ser uma versão ‘student’, só trabalhando com componentes específicos, não sendo possível simular durante um tempo considerável e nem todos os possíveis tipos de tráfego que poderemos encontrar nesta proposta de rede óptica de acesso.

O sucesso no processo de simulação e a viabilidade de se ter um circuito compacto, de baixíssimo custo, com alta velocidade de resposta e operando em nível TTL nos levaram a sua implementação prática, idêntica ao esquema elétrico mostrado acima. É um circuito projetado para trabalhar em conjunto com o HRC e com o OpPaRe, formando toda a parte eletrônica do trabalho. É importante ressaltar que o esquema elétrico acima considera apenas duas entradas, justamente para trabalhar com o sinal proveniente dos pacotes tratados pelo HRC, f_1 e f_2 . Os primeiros testes foram realizados com pulsos elétricos simulando os pacotes ópticos e analisando seu comportamento através de um osciloscópio. A figura 34 mostra os resultados destes testes realizados em laboratório.

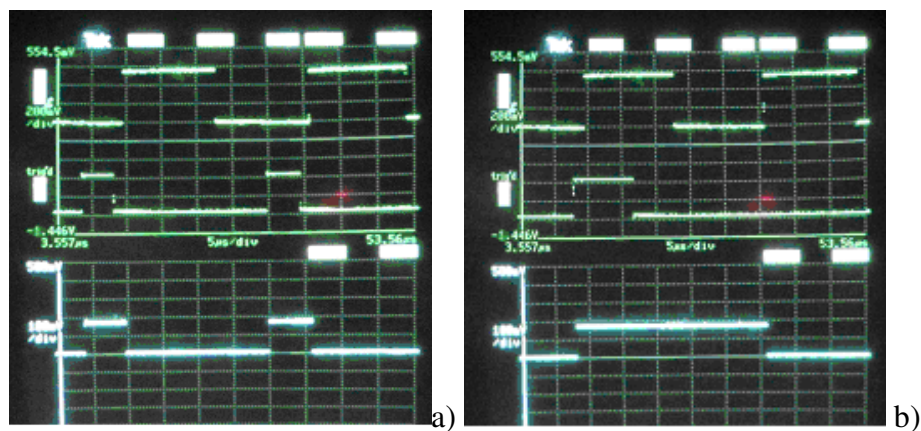


Fig. 33 – a) Ausência Contenda; b) Resolução Contenda

Para este teste consideramos os pulsos elétricos como sendo o tráfego de pacotes com tamanhos diferentes e com o mesmo endereço de cabeçalho, portanto devem ser encaminhados para a mesma porta de saída da chave AO. O pulso superior representa pacotes passando através da rede e que chegarão a entrada 1 da chave, o pulso mediano representa pacotes que chegarão na entrada 4 da chave, e ambos tem como porta preferencial a saída 2. O pulso inferior representa a situação da chave naquele instante,

sendo o sinal que será enviado a AOS pelo LDC. Em a) não temos uma situação de contenda, porém temos dois pacotes chegando com intervalo de tempo muito curto e requisitando a mesma porta de saída. Ao chegar um pacote na entrada 4, não há pacotes em 1 ou passando pela chave, então o LDC manda um pulso para a chave fazendo que esta assuma seu estado lógico cruzado, direcionando o pacote para a porta de saída 2, logo após terminada a transferência do pacote a chave torna-se habilitada para mudar de estado, porém permanece em seu estado atual até que ocorra um novo evento, que neste caso, é a chegada de um pacote na entrada 1. Este pacote sinaliza para que a chave mude para o estado paralelo e faça seu correto roteamento, enviando-o também para a saída 2. Este estado de ‘bloqueado’ da chave garante a integridade dos pacotes que trafegam na rede. É importante ressaltar, que a chave AO possui 2 estados lógicos, e o LDC possui 3 estados; paralelo, cruzado ou stand-by, terceiro estado este no qual a chave permanece em seu estado atual aguardando a sinalização da próxima requisição. Em b) temos uma situação de contenda onde um pacote está sendo roteado e durante este processo chega outro pacote requisitando a mudança de estado da chave para que este seja roteado para a mesma saída do primeiro. De acordo com a teoria de FIFO o pacote que chegou na entrada 4 é que decide a posição que a chave assumirá, portanto, o pacote que chegou na entrada 1 após ter iniciado a transmissão do outro pacote presente na entrada 4 será encaminhado para a sua saída não preferencial, aumentando seu número de hops na rede. Neste caso a chave continua no estado cruzado por um longo período de vazio, até quando chega outro pacote na entrada 1 e faz com que ela assuma o estado cruzado para seu roteamento.

O LDC mostrou-se capaz de fazer o correto roteamento dos pacotes ópticos FH, através de experimentos usando pulsos elétricos. Apresentaremos a seguir experimentos montados visando conseguir satisfazer todas as premissas do estudo unindo-se as funcionalidades dos circuitos de conversão OE, de reconhecimento de cabeçalho e de decisão lógica. Com isso teremos desenvolvido uma nova concepção de chaveamento de pacotes ópticos em redes de acesso, onde se consegue seletividade em frequência, clareza on/off; chaveamento pacote-a-pacote; integridade total do pacote e taxa de erro considerável.

5.6 – Experimentos adotando Topologia de Rede 2x2

Esta seção se dedica aos ajustes de tempo necessários para que o estudo se adeque as topologias de rede 2x2, através do uso das mesmas AOS operando com tráfego em ambas portas de entrada e usando o LDC para solucionar todas as possibilidades de contenda sem que haja cortes ou perdas nos pacotes. Junto com esta busca pelos ajustes de tempo iremos mostrar as situações de contenda e suas soluções através do uso do LDC, além de mostrar os resultados sem o uso do LDC.

5.6.1 - Chaveamento e Roteamento de Pacotes FH – Configuração 2x2

A figura 35 mostra o set-up experimental para uma rede óptica sem buffer com arquitetura 2x2, onde cada nó tem 2 portas de entrada e duas portas de saída, uma típica MS [23], possibilitando contenda entre pacotes [27], e que devem ser solucionadas pelo LDC.

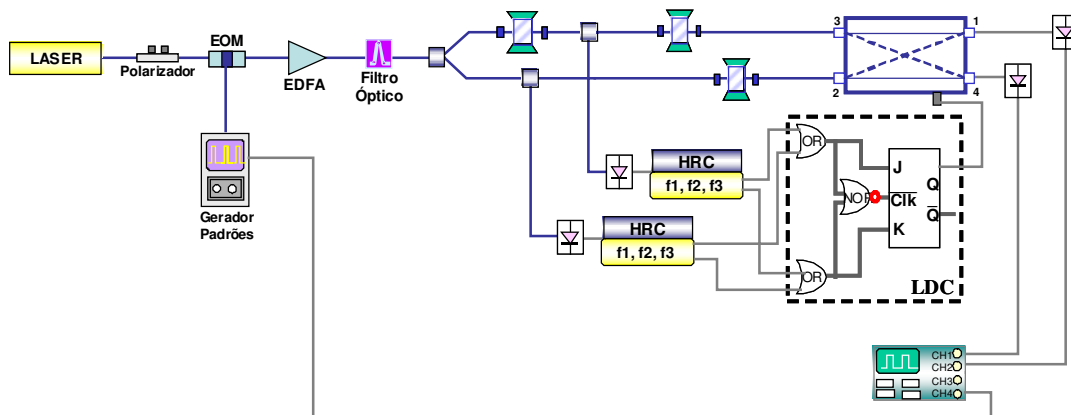


Fig. 34 - Set-up para Roteamento de Pacotes Ópticos

A geração dos pacotes é feita da mesma forma que na configuração 2x[1x2], a única diferença é o tráfego de pacotes em ambos canais que levam a entrada da chave. Os pacotes neste experimento apresentam duração de $2\mu\text{s}$, sendo 0.25/.75 a relação cabeçalho payload.

O processo de detecção ocorre de modo um pouco diferente do mostrado na seção anterior, porém, todos os princípios lá citados são aplicados nesta nova etapa. É retirado de cada canal óptico uma amostra do sinal a ser processado, faz-se sua conversão OE e então é entregue ao HRC, que por sua vez envia a sinalização para o LDC, que fará com que a chave assuma sua posição adequada e faça o roteamento do pacote que está sendo analisado.

Ambos os canais ópticos possuem uma linha de atraso que corresponde ao tempo de todo processamento eletrônico envolvido no estudo, $\tau_{el} = 3.0\ \mu\text{s}$, além de um outro atraso, $1\mu\text{s}$, inserido em um dos canais que levam o tráfego a entrada da AOS para que os pacotes não cheguem simultaneamente em ambas entradas, tentando simular um tráfego mais próximo do real. Os primeiros resultados que serão mostrados estaremos levando em consideração a utilização e não utilização do LDC nos resultados do chaveamento óptico.

Estaremos trabalhando somente no processamento eletrônico de pacotes f_2 . A figura 36 abaixo mostra a situação de um tráfego onde um pacote chega à chave sempre após outro ter chegado, situação a qual denominamos tráfego sobreposto.

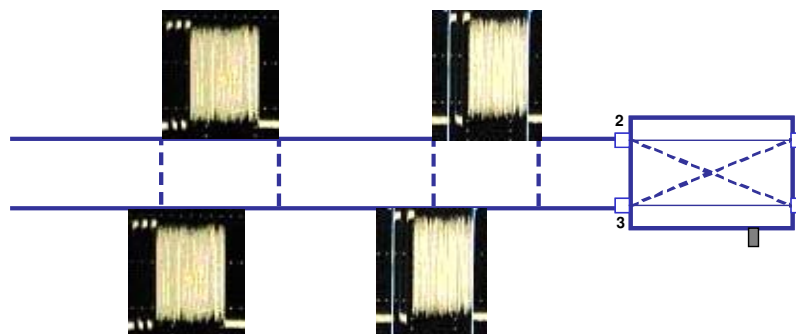


Fig. 35 – Tráfego Sobreposto

As figuras 37 mostram os resultados adotando este tipo de tráfego para se fazer o roteamento de pacotes com cabeçalho f_2 . O princípio de roteamento adotado para este tráfego é pacotes com cabeçalho $f_2 \rightarrow$ saída 4, $f_1, f_3 \rightarrow$ saída indiferente. Podemos notar que os pacotes que chegam na entrada 2, canal óptico mais curto, é que determinarão o estado que a chave irá assumir para fazer o roteamento, obedecendo a teoria FIFO.

Portanto em 37.a) vemos os pacotes através da saída 4 da AOS, pois, ao chegar pacotes na entrada 2 com o cabeçalho que está sendo identificado, a chave assume o estado cruzado e envia todos os pacotes que estão trafegando na rede para esta saída. Em 37.b), a situação é semelhante, os pacotes são provenientes do braço óptico mais longo, entrada 2, e só chegam a chave após ter outro pacote sendo roteado, então o LDC matem o estado da chave, e manda todos os pacotes para a saída óptica disponível, que é a não preferencial para os pacotes f_2 . Devido ao próximo evento, após um tempo de vazio, ser o mesmo do último ocorrido a chave não altera seu estado e todos os pacotes que na entrada 2, são transferidos para a saída 4, e pacotes na entrada 3 para a saída 1.

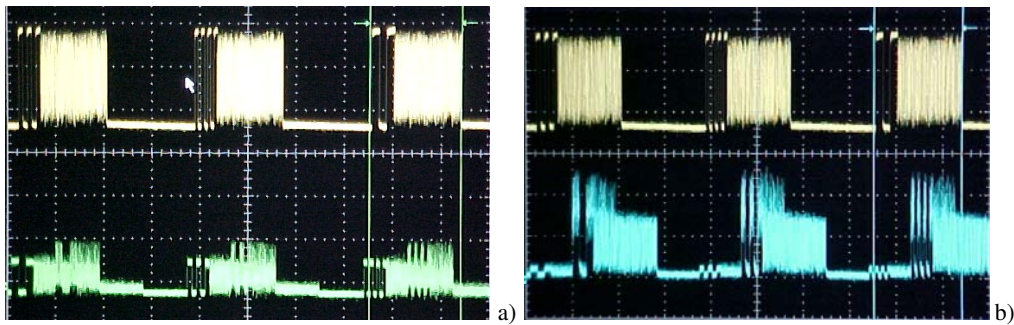


Fig. 36 – Roteamento de Pacotes FH com cabeçalho f_2 – Tráfego sobreposto; a) Roteamento dos pacotes com cabeçalho f_2 ; b) Roteamento de pacotes respeitando a condição de roteamento do nó.

Esta característica de tráfego sobreposto é claramente notada através do crosstalk das chaves que pode ser reparada através do cabeçalho dos pacotes mostrados nas figuras acima, isto ocorre devido a chave apresentar uma razão de extinção de 8 dB operando no estado cruzado.

A figura 38 confirmam que todo o processamento eletrônico é eficiente em relação a integridade dos pacotes, pois desligando-o conseguimos ver o resultado do tráfego sem que haja o circuito de resolução de contendás. Em ambas figuras o traço superior é o burst elétrico dos pacotes. Em 38.a) vemos os pacotes f_2 através da saída 1 da AOS, estes pacotes tem seu payload cortado pois são provenientes do canal óptico curto, e quando os pacotes com este cabeçalho chegam a chave eles fazem com que a AOS mude seu estado para atendê-los, transferindo-os para a saída 1. Em 38.b) temos a situação contrária, o cabeçalho do pacote é cortado, pois ele só chegou a chave após o gate ter sido aberto.

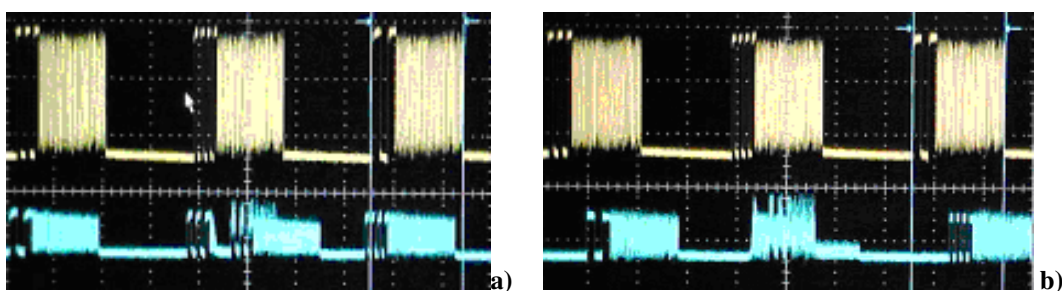


Fig. 37 – Roteamento de pacotes ainda sem a atuação do LDC – a) Payload Cortado; b) Cabeçalho Cortado

A solução para evitarmos este tráfego sobreposto é aumentar o tempo do atraso óptico adicionado em um dos canais, e assim, oferecermos realmente uma situação onde haja mudança entre os estados da AOS além de prover o roteamento dos pacotes e não somente a contenda como esta situação mostrada.

5.6.2 - Roteamento de Pacotes Ópticos.

Para alcançarmos a etapa de roteamento primeiramente alteramos o atraso adicional em um dos canais ópticos, fazendo-o igual a duração de um pacote, nos propiciando um tráfego interposto, onde um pacote chega a chave exatamente após o término de outro. As figuras 39 mostram os resultados obtidos através da atuação do LDC somente em pacotes com cabeçalho f_2 .

Nesta situação as frequências de cabeçalho são pré-estabelecidas na tabela de roteamento do nó como $f_2 \rightarrow$ saída 4, $f_1, f_3 \rightarrow$ saída indiferente. Portanto, todos pacotes com cabeçalho f_2 devem ser retirados pela sua saída preferencial, sem que haja perdas ou degradação dos pacotes. Os traços superiores são o burst elétrico dos pacotes, enquanto os traços do meio e inferior são as saídas 1 e 4 da AOS. Em 39.a), vemos a operação do LDC roteado os pacotes, na saída 1 temos somente pacotes, enquanto na saída 4, temos todos os pacotes f_2 , além dos pacotes f_1 e f_3 que trafegavam no canal de entrada 3, para os quais a chave volta ao estado paralelo. Em b) podemos ver o tráfego quando o LDC está desligado, logo todos pacotes que chegam na entrada da chave são transferidos para sua saída sem nenhuma alteração. Comprovado a operação do LDC de acordo com a tabela de alocação do nó.

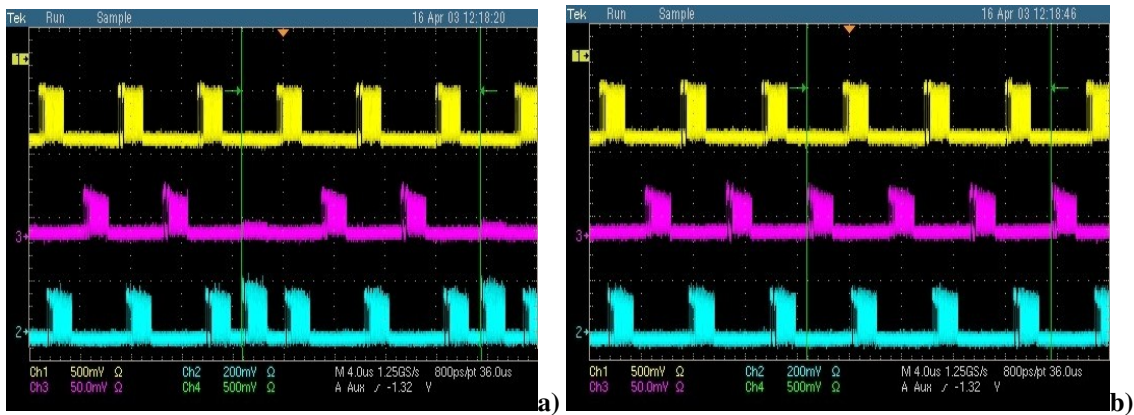


Fig. 38 - Roteamento de Pacotes FH com cabeçalho f_2 – a) LDC On; b) LDC Off

Após a verificação do correto funcionamento do LDC para rotear pacotes analisando apenas uma frequência de cabeçalho, f_2 , continuamos a inspecionar sua funcionalidade, analisando agora o seu funcionamento quando duas frequências de cabeçalho são inspecionadas simultaneamente. Nesta nova etapa, o sistema trabalha com pacotes ópticos que apresentam cabeçalhos f_2 e f_3 . Portanto, a nova tabela de alocação de frequências ficou pré-estabelecida como $f_1 \rightarrow$ Saídas C e D; $f_2 \rightarrow$ somente saída C; $f_3 \rightarrow$ somente saída D.

Na Fig. 40, podemos ver os resultados da atuação do LDC, quando este opera analisando duas frequências de cabeçalho de pacotes ópticos. Do mesmo modo, o traço superior representa o padrão elétrico dos pacotes, e o traço do meio e inferior representam as saídas ópticas 1 e 4 da chave AO, respectivamente. A Fig. 40.a) mostra o tráfego dos pacotes quando LDC está desligado, então, a chave AO mantém seu estado e os pacotes que chegam nas entradas da chave são transferidos para suas saídas sem tratamento da informação contida no cabeçalho. Na Fig. 40.b) podemos ver a atuação do LDC, fazendo o correto roteamento dos pacotes ópticos com cabeçalho f_2 e f_3 . Na saída C, podemos ver pacotes com cabeçalho f_1 e f_2 , enquanto pacotes com cabeçalho f_1 e f_3 são vistos na saída D da chave AO. Os pacotes com cabeçalho f_1 estão presentes em ambas saídas por se tratar de uma frequência que não está sendo inspecionada pelo LDC.

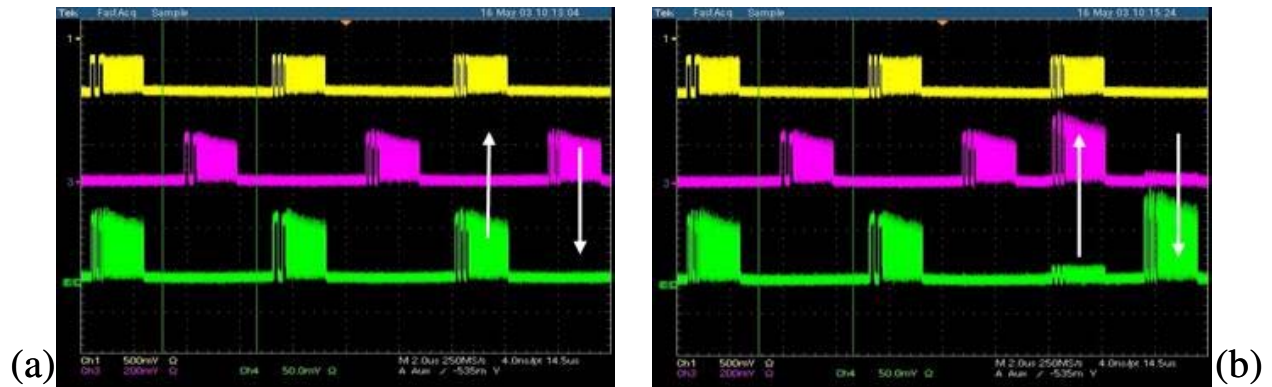


Fig. 39 – Roteamento de pacotes com cabeçalhos f_2 e f_3 – a) LDC off; b) LDC on

Um importante detalhe que podemos notar na figura acima: o cross-talk da chave AOS, (ou a taxa de extinção dos pacotes roteados) é insatisfatória, ficando em torno de -10 dB referente a saída $3 \rightarrow 4$, e -35 dB de $4 \rightarrow 3$, isto é uma característica intrínseca da AOS e confirmada em laboratório. Verificamos que a chave AO tem sua operação baseada na difração de ordem zero e de 1ª ordem de um cristal acusto-óptico, e que, a taxa de rejeição da ordem zero e de 1ª ordem não é a mesma como mencionada pelo fabricante. Outro aspecto relevante é que os pacotes que são realmente comutados apresentam uma potencia ligeiramente mais elevada se comparados aos pacotes que não foram comutados. Podemos relacionar este efeito aos diferentes caminhos ópticos percorridos pelos pacotes dentro da chave AO.

5.6.3 – Roteamento de Pacotes FH – Função Remoção de Pacotes

Este novo conceito foi abordado no intuito de se unir o experimento 2x2 com o 2x[1x2] apresentados anteriormente. Isto nos permitirá agregar ao nó da rede funcionalidades de chaveamento, roteamento e retirada dos pacotes ópticos em um único experimento. A implementação da função de retirada dos pacotes ópticos da rede na qual eles trafegam, se dá através da inserção de uma nova chave AO após a saída da outra, aliada a um HRC capaz que reconhecer o tom de cabeçalho ao qual está relacionado o pacote que deverá ser retirado. O processo de geração e reconhecimento dos pacotes é o mesmo citado anteriormente, e a figura 41 mostra o set-up deste experimento.

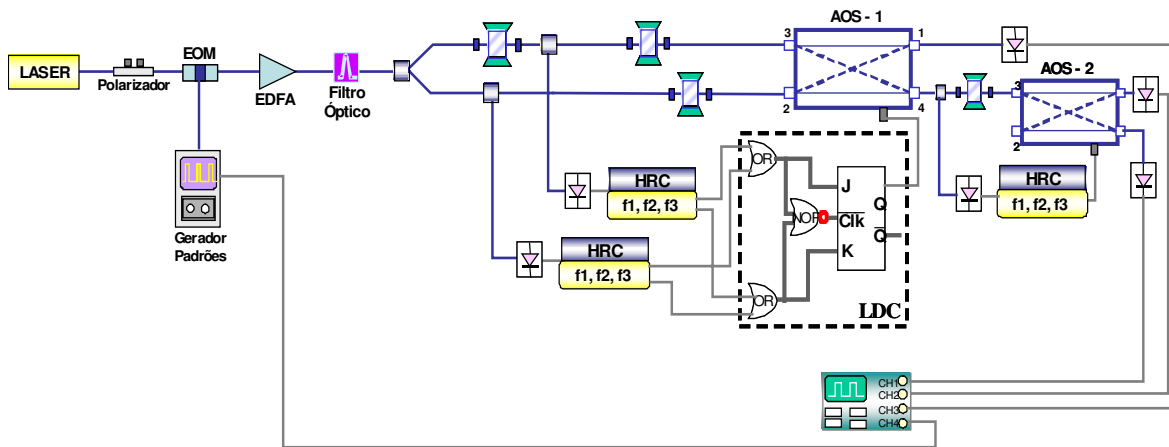
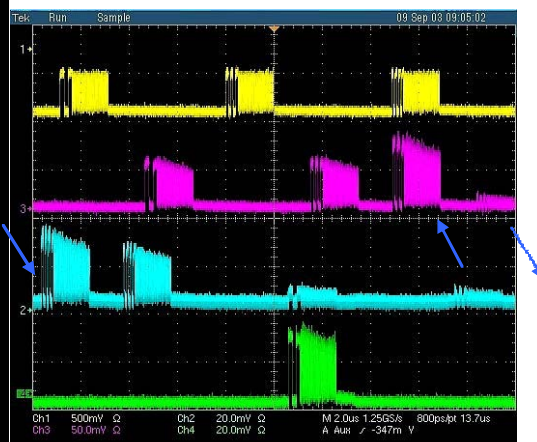


Fig. 40 – Experimento Prático para Roteamento e Retirada de Pacotes Ópticos

Neste caso, não precisamos do LDC, pois pacotes não chegarão a chave secundária sobrepostos, pois já foram roteados na chave principal, além de que o HRC implementado para esta chave, é capaz de reconhecer apenas pacotes com cabeçalho f_1 . Apesar de não precisar do LDC, o atraso óptico ainda é necessário para compensar o atraso de processamento do HRC, que é muito maior que o proporcionado pelo LDC. A figura 42 mostra os resultados alcançados através desta montagem experimental.

a)

Fi



b)

Ópticos FH a) AOS 1: HRC/LDC – ON; AOS 2:HRC –
LDC – ON; AOS 2: HRC – ON

Em 42.a) temos apenas o roteamento feito em AOS 1, como mostrado na seção anterior, onde pacotes com cabeçalho f_1 não são analisados. É importante ressaltar que a tabela de alocação de frequências, continua idêntica a descrita na seção anterior. Em b) temos os pacotes com cabeçalho f_1 sendo retirados da rede através da ação da AOS 2, que ao receber o sinal do HRC referente a este pacote, assume a posição cruzada para fazer a retirada da rede de todos estes pacotes.

Capítulo 6 - Conclusões

Desde o início o objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de soluções aplicáveis econômica e tecnicamente em redes ópticas metropolitanas de acesso baseadas em chaveamento de pacotes ópticos. Todas as etapas do desenvolvimento foram cruciais e contribuíram de forma significativa neste estudo. Até mesmo as soluções parciais tiveram suas contribuições, pois como vimos, despertaram novas oportunidades de implementações para superar as dificuldades e nos permitir no fim demonstrar todas as funcionalidades oferecidas por esta proposta.

O trabalho foi baseado na concepção de que nós ópticos para redes metropolitanas de acesso deve ser mantido o mais simples quanto possível, sem que se comprometa a performance do sistema, além de ser economicamente atrativo. Ao desenvolvimento desta rede metropolitana de acesso baseada em pacotes ópticos, demos o nome de LiMAN, que irá suprir o grande aumento na demanda de largura de banda de transmissão para o usuário final, do ponto de vista técnico, fazendo com este tipo de redes prevalece sobre as outras num futuro próximo. Também demonstramos que as funcionalidades apresentadas são compatíveis com redes WDM.

Trabalhando-se com pacotes SH e circuito de reconhecimento de cabeçalho com filtros de RF demonstramos experimentalmente a geração, detecção e chaveamento destes pacotes ópticos com poucos μ s de duração e espaçamento. Realizamos medidas de performance em relação a presença e ausência do tom de RF, relação de interdependência entre potencia de payload/cabeçalho e medidas de taxa de erro melhor que 10^{-12} , realizadas sucessivamente, para um ajuste adequado entre as potências mencionadas. Na outra proposta utilizando pacotes SH, apresenta como circuito de detecção filtros de frequência baseados em cristais osciladores, com o qual conseguimos uma clareza definida entre os estados de operação, on – off, o que não apresentava os circuitos com filtros de RF. O tempo de guarda posterior e anterior ao pacote é da ordem de $0,2\mu$ s, o que garante que nenhum pacote seja cortado. Esta implementação também sinalizou para a possibilidade de se gerar

pacotes diferentes através da inserção de tons de RF diferentes e alternados em cada um dos 2 braços ópticos proposto. O que posteriormente possibilitou a implementação do pacote FH. O processo de chaveamento é realizado muito rápido (poucos μ s), e a largura de faixa do circuito melhor que 0.2 KHz, o que possibilita a inserção de vários pacotes diferentes na rede. Apesar de apresentar uma independência entre o tom de RF e a carga útil, o tempo de oscilação do cristal é muito grande, o que faz com que pacotes passem pela chave, sendo que o gate que foi aberto para sua passagem é referente a outro pacote.

Apresentou-se também a operação e aplicabilidade de chaves EO e AOS 2x2 em redes ópticas chaveadas por pacotes, que apresentam uma dependência com o comprimento de onda do sinal de entrada e da alimentação aplicada. Para a chave EO observou-se uma razão de extinção muito sensível a pequenas variações do sinal de alimentação, pois variando-se poucos mV altera-se a potencia de forma considerável, apesar disso esta chave prove rápido chaveamento. A chave AOS, também apresentou rápido chaveamento, porém com operação muito estável, tendo sua operação dependente do sinal externo proveniente dos circuitos de processamento eletrônico, que são ativados pela simples chegada de um pacote ao nó, tornando o nó rede óptica totalmente transparente.

A definição da topologia de rede aliada aos resultados obtidos nas simulações de tráfego, a técnica de geração de pacotes FH e os experimentos práticos desenvolvidos com chaves AOS 2x2 possibilitou a demonstração do roteamento por deflexão de pacotes em redes em malha, MS ou SN, seja com 4, 9 ou 16 nós. A capacidade e carga da rede são variáveis significativas que devem ser consideradas. A técnica FH, permitiu chaveamento pacote-a-pacote com alta performance de chaveamento e roteamento usando pacotes com diversos cabeçalhos. Por outro lado, visando solucionar as possíveis contendas implementou-se um circuito capaz de prover tal benefício sem que haja cortes ou perdas de pacotes e sem nenhuma técnica de armazenagem óptica.

Assim, após demonstrada a performance adequada do roteamento por deflexão em redes LiMOPS sem armazenamento, sem perdas de pacotes e com funcionalidades de chaveamento, roteamento e remoção de pacotes ópticos

Também foi possível demonstrar a a função de retirada de pacotes do nó óptico, aliando-se as topologias experimentais $2 \times [1 \times 2]$ e 2×2 . Em todas implementações com pacotes FH a integridade do pacote foi preservada experimentalmente e suportada por simulações de diversos tipos de tráfego [27], sinalizando para perdas de pacotes muito baixa para carga de rede menor que 40% em redes MS com 16 nós. Além disso, o experimento apresentou compatibilidade com experimentos WDM, sendo roteado através de 60 Km, passando por 3 nós diferentes da rede Omega [38].

Capítulo 7 - Trabalhos Futuros

Entre os diversos trabalhos futuros, pretende-se implementar novas funcionalidades como a função de inserção de pacotes pelos usuários, um supervisionamento dos nós ópticos e a substituição das chaves AOS por amplificador óptico semiconductor – SOA, que tornará o nó óptico mais atrativo economicamente, pois se elimina a presença de EDFA ao longo da rede. A figura 43 mostra a proposta para a montagem destes novos nós ópticos.

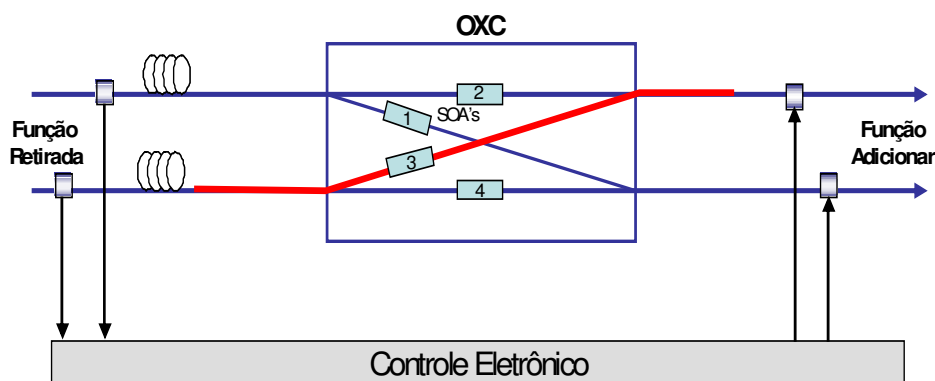


Fig. 42 – Proposta para Construção de Nós Ópticos a partir de SOA's

A montagem deste nó se dará com 4 SOA's. Não haverá necessidade de outro dispositivo para inserção ou retirada de pacotes da rede. A proposta para retirada será extrair uma cópia de todo sinal e deixar que a tecnologia do usuário final verifique o endereço local do pacote, além da verificação feita dentro do nó. Os estados possíveis para a chave não se restringem aos estados básicos de paralelo (ligar 2 e 4 e desligar 1 e 3) e cruzado (ligar 1 e 3 e desligar 2 e 4). Mas podemos estabelecer muitos outros estados conforme as funcionalidades que desejamos para o nó. A derivação dos pacotes com endereço local é feita a partir de parte do sinal já retirado para amostragem. Se o endereço do pacote entrando na porta E1 for local, desligamos os SOA's 1 e 2 para evitar a propagação do pacote pela rede. Os SOA's 3 e 4 serão posicionados convenientemente para atender o pacote chegando na porta E2. Se o pacote com endereço local chega pela porta E2 os SOA's 3 e 4 precisam ser fechados. Se houver pacote local nas duas portas os 4 SOA's

deverão ser fechados. Esta arquitetura permite também imaginar endereços multicast cujo pacote, chegando na porta E1, poderia ser duplicado pela abertura dos SOA's 1 e 2.

Outro trabalho futuro, será a inserção de tráfego com carga real, através do uso de tecnologia GbE, além de verificar a adaptabilidade ao protocolo de transporte IP, o que confirmaria a transparência da rede a taxa e formato da carga.

A rede LiMOPS pode ser considerada como uma evolução natural das redes locais, com reduzida latência, provendo flexibilidade e transparência a taxa e formato dos dados.

Referências Bibliográficas

1. N. Ghani, S. Dixit, T. S. Wang, "On IP-over-WDM Integration", *IEEE Communications Magazine* pp 84-94, Fevereiro de 2000.
2. S. Yao, B. Mukherjee, "Advances in Photonic Packet Switching: an overview" *IEEE Communications Magazine*, pp. 84-94, Fevereiro de 2000.
3. A. Pattavina, M. Martinelli, G. Maier; "Techniques and Technologies towards All-Optical Switching" *Optical Networks Magazine*, pp. 75-93, Abril 2000.
4. D. Carballal, et al, "Access Network Evolution", *Alcatel Telecom Rev.*, September 1996
5. J. Bannister, M. Gerla, G. Maier, P. Boffi, "Routing in Optical Networks" *Edit by M. Steenstrup*, Prentice Hall, 1995.
6. R.Ramaswami and K.N.Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publishers Ed. D.Clark, (1998).
7. N. Ghani, "Lambda-Labeling: A frame-work for IP-over-WDM using MPLS", *Optical Networks Magazine*, Abril de 2000.
8. R. S. Tucker, W. D. Zhong, "Photonic Packet Switching: an Overview", *IEICE Transactions on Communications*, vol.E82-B, n.º.2, pp 254-264, 1999.
9. D. J. Blumenthal, P.R.Prucnal and J.R.Sauer, "Photonic packet switches: architectures and experimental implementations", *Proceedings of the IEEE* vol.82, no.11, pp.1650-1667, 1994
10. D. J. Blumenthal, P.R.Prucnal, L.Thylen and P.Granestrand, "Performance of an 8x8 LiNbO3 switch matrix as a gigahertz self routing switching node", *Electronic Letters* vol.23, no.25, pp.1359-1360, 1997.
11. I. Daeki, S.Nishi and K.Murakami, "All optical code division multiplexing switching network based on self routing principle", *IEICE Transactions on Communications* vol.E82-B, no.2, pp.239-245, 1999.
12. K. Kitayama, "Code division multiplexing lightwave networks based upon optical code conversion", *IEEE Journal of Selected areas in Communications* vol.16, no.7, pp.1309-1319, 1998.
13. N. Yada, K.Kitayama, "Photonic IP routing using optical codes: 10 Gbit/s optical packet transfer experiment", *Proceedings OFC 2000*, paper WM51.
14. F. R. Barbosa, A.C.Sachs, M.T.Furtado, J.B. Rosolem, "Optical Packet Switching: a transmission and recovery demonstration using an SCM header", *SBrT'2001*, Fortaleza, Brasil, Sept. 2001; and Special Issue, *Rev.Soc.Bras.Telecom.*, June 2002.
15. W.D.Zhong, M.Tsukada, K.Yukimatsu and Y.Shimazu, "Terahypas: a modular and expandable terabit/second hierarchically multiplexing photonic ATM switch architecture", *Journal of Lightwave Technology* vol.12, no.7, pp.1307-1315, 1994.
16. K.Sasayama, Y.Yamada, K.Habara and K.Yukimatsu, "FRONTIERNET: frequency routing type time division interconnection network", *Journal of Lightwave Technology* vol.15, no.3, pp.417-429, 1997.
17. A. Carena, M.D.Vaughn, R.Gaudino, M.Shell and D.J.Blumenthal, "OPERA: an optical packet experimental routing architecture with label swapping capability", *Journal of Lightwave Technology* vol.16, no.12, pp.2135-2145, 1998.

18. C. Guillemot, M.Renaud, P.Gambini, C.Janz, I.Andonovic, R.Bauknecht, B.Bostica, M.Burzio, F.Callegati, M.Casoni, D.Chiaroni, F.Clerot, S.L.Danielsen, F.Dorgeuille, A.Dupas, A.Frenzen, P.B.Hansen, D.K.Hunter, A.Kloch, R.Krahenbuhl, B.Lavigne, A.L.Corre, C.Raffaelli, M.Schilling, J.C.Simon and L.Zucchelli, "Transparent optical packet switching: the European ACTS KEOPS project approach", *Journal of Lightwave Technology* vol.16, no.12, pp.2117-2134, 1998 .
19. D. Wonglumsom, I.M.white, S.M.Gemelos, K.Shrikhande and L.G.Kazovsky, "HORNET - a packet switched WDM network: optical packet transmission and recovery", *IEEE Photonics Technology Letters* vol.11, no.12 pp.1692-1694, 1999.
20. L. Dittman, " The European IST Project DAVID: A Viable Approach towards Optical Packet Switching", *JSAC* – 2002.
21. P. Baran, "On distributed communications networks", *IEEE Transactions on Communications Systems* vol.12, pp.1-9, 1964.
22. A. S. Acampora, S.I.A.Shah, "Multihop lightwave network: a comparison of store-and forward and hot potato routing", *IEEE Transactions on Communications* vol.40, no.6, pp.1082-1090, 1992.
23. A. Bonani, P.R.Prucnal, "Analytical evaluation of improved access techniques in deflection routing networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking* vol.4, no.5, pp.726-730, 1996.
24. C. Qiao, M. Yoo, " Optiucal Burst Switching (OBS) – A new Paradigme for an Optical Internet", *Journal High Speed Networks*, vol. 8, n°.1, Janeiro de 1999.
25. D. Chiaronni, "Status and Applications of Optical Packet Switching", paper WeM.1, *ECOC'2001*, Amsterdam, Setembro de 2001.
26. Ericsson Telecom AB, International Patent Application PCT/BR02/00015, "Apparatus, Method and System for Optical Packet Switching using Frequency Headers", Munich, Fevereiro de 2002.
27. L. H. Bonani, A. C. Sachs, M. T. Furtado, E. Moschim, A. Yamakami, " Non-uniformly, Distributed Traffic Analysis with Optical Packet Switching Functionalities", *X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica – SBMO'2002*, paper ST7.2, pp. 163-167, Recife-PE, Agosto de 2003.
28. . H. Bonani, A. C. Sachs, M. T. Furtado, E. Moschim, A. Yamakami, " Optical Network Analysis under Non-uniform Traffic Distribution" *IEEE International Telecommunications Symposium – ITS'2002*, Natal-RN, Setembro de 2002.
29. . H. Bonani, M. T. Furtado, E. Moschim, F. R. Barbosa, "Analysis of Optical Packet Switching Performance with Spatial Contention Resolution for Optical Access Network" *International Association of Science and Technology for Development IASTED*, Espanha, Setembro de 2003.
30. F. R. Barbosa, A. SACHS, "Transparent Optical Packet Switching Node based on Bottom-up Organization Network", *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBT'2004*, pp 258, Belém-PA, Setembro de 2004.
31. A. S. Acampora, "A Multichannel Multihop Local lightwave networks", in *Proceedings IEEE GLOBECOM'87*, pp 1459-1467, Novembro 1987.
32. I. Chamlact, A.Fumagalli, "An Optical Switch Architecture for Manhattan Street Networks", *IEEE J. Select. Areas Comm.* 11 (4), 550-559, Maio de 1993.
33. Z. Haas, R.Gitlin, "Optical Distribution Channel: an almost all-optical LAN based on field-coding technique", *Proc. Infocom'92*, Florence,Italy, Abril de 1992.
34. D. J. Blumenthal, "Photonic packet and All-optical label switching techniques and technologies", paper WO3, *OFC'2002* , Anaheim , USA.
35. Govind P. Agrawal, "Fiber Optic Communications Systems" 2º Edition 1997.

36. S. J. B. Yoo, et al, "Optical-label based Packet routing System with contention resolution in Wavelength, time and Space domains", paper WO2, OFC'2002, Anaheim CA, USA.
37. M. G. Hluchyj, M. J. Karol, "Queueing in High Performance Packet Switching", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 6, nº.9, pp 1587-1597, 1998.
38. M. L. Rocha, M. Rossi, M.X. Barros, L. Pezzolo, J.B. Rosolem, A. Paradisi, "Experimental Performance Evaluation of 5-node IP over WDM laboratory test-bed", Electron. Lett. Vol.38 (2002)
39. L. H. Bonani, "Contribuição ao Estudo de Redes Fotônicas de Pacotes", Dissertação de Mestrado, FEEC/UNICAMP, Fevereiro de 2003

Trabalhos Publicados

1. F.R. Barbosa, A. C. Sachs, M.Remy, D. Maia Jr, R. S. Ferreira, “Optical Packet Switching Using 2x2 eletro-optic and acousto-optic switches.”, Published SBMO’2002, paper ST12.5. Recife, Brasil, August 2002.
2. F.R. Barbosa, D. Maia Jr, A. C. Sachs, Leonardo Pezzolo, E. Moschim , “Optical Packet Switching and Routing using RF frequency header labeling for Application in Metropolitan Access Networks”. Published ITCom’2003 – SPIE, paper 5247-20. Orlando, FL – EUA, September 2003.
3. F.R. Barbosa, D. Maia Jr, A. C. Sachs, Leonardo Pezzolo, “Optical Packet Switching Node for Metro-Access Networks”. Published ECOC’2003, paper We4.P.160. Rimini – Italy, September 2003
4. D. Maia Jr, L. Pezzolo, F.R. Barbosa, E. Moschim, “Electronic Interfaces for Optical Packet Switching and Routing”. Published at IMOC’2003. Foz Iguaçu, Pr – Brasil, Setembro 2003. Published at Revista Telecomunicações – Inatel, January 2004
5. F.R. Barbosa, D. Maia Jr, A. C. Sachs, Leonardo Pezzolo, E. Moschim, “Optical Packet Switching System for Optical Nodes in Next-Generation Metropolitan and Access Networks”. Published at Revista Telecomunicações – Inatel, January 2004.
6. D. Maia Jr, L. Pezzolo, A. C. Sachs, F.R. Barbosa, E. Moschim, “Optical Packet Switching and Routing using in-band frequency header labeling”. Published at Proceedings IMOC’2003. Foz Iguaçu, Pr – Brasil, September 2003.

Apêndice A - Código MATLAB – Exemplo Rede MS com 9 Nós

Os gráficos apresentados no capítulo 2 são resultados da implementação do código descrito abaixo na ferramenta matemática MatLab.

```

n=9;                %número de nós da rede
for fator=1:50
    Ppq=1*(fator*2/100); %taxa de ocupação do link (prob. de chegar um pacote qualquer)
    Ppl=1/n;          %PROBABILIDADE DE PACOTE SER LOCAL=(n-1)/[n(n-1)]
    Pop = 0.5;         %Probabilidade do competidor desejar outra porta
    Pnc=(1-Ppq)+(Ppq*Ppl)+Ppq*Pop*(1-Ppl); %PROBABILIDADE DE NÃO CONTENDA
    Pc=1-Pnc;          %PROBABILIDADE DE CONTENDA
    Ppp=Pnc;           %PROBABILIDADE DE SAIR pela porta PREFERENCIAL
    Pd=Pc;             %PROBABILIDADE DE DEFLEXÃO
    % MONTAGEM DA MATRIZ
    T=zeros(n);
    T(1,2)=Ppp;        T(5,2)=Pd;
    T(2,3)=Ppp;        T(9,3)=Pd;
    T(1,4)=Ppp;        T(5,4)=Pd;
    T(8,5)=Ppp;        T(6,5)=Pd;
    T(4,6)=Ppp;        T(3,6)=Pd;
    T(4,7)=Ppp;        T(9,7)=Pd;
    T(2,8)=Ppp;        T(7,8)=Pd;
    T(6,9)=Ppp;        T(8,9)=Pd;
    Pk0=(1/n)*ones(n,1); %vetor das probabilidades em cada nó no instante inicial
    Pk0(1)=0; %no instante inicial não tem pacote teste no nó de destino
    kmax=1000;
    Pk=Pk0;
    Ehops=0.0;
    Ek2=0.0;
    for k=1:kmax
        Pk=T*Pk; %vetor das probabilidades de pacotes no instante k
        %Pk(1) é a probabilidade de chegar em 1 no instante k
        if Ppq==0.4
            v_d_p(k)=Pk(1); %vetor densidade de probabilidade
        end
        Ehops=Ehops+k*Pk(1);
        Ek2=Ek2+k^2*Pk(1);
    end;
    sig2=Ek2-Ehops^2;
    vetor_de_saida(fator)=Ehops;

```

```
desv_padrao(fator)=sig2;
end;
fideh=fopen('eh_ms9.dat','w'); %ABRE ARQUIVO "eh_ms9.dat"
    fprintf(fideh,'%g\n',vetor_de_saida);
    fclose(fideh);
fidvar=fopen('var_ms9.dat','w'); %ABRE ARQUIVO "var_ms9.dat"
    fprintf(fidvar,'%g\n',desv_padrao);
    fclose(fidvar);
fidvdp=fopen('vdp40ms9.dat','w'); %ABRE ARQUIVO "vdp40ms9.dat"
    fprintf(fidvdp,'%g\n',v_d_p);
    fclose(fidvdp);
```

Apêndice B - Caracterização Chave Eletro-Óptica

O objetivo deste apêndice é apresentar o método utilizado para a caracterização da chave eletro-óptica 2x2 visando seu emprego no estudo apresentado como sendo o nó óptico que fará o roteamento dos pacotes que trafegam na rede óptica de acesso através de um sinal de controle proveniente do circuito de reconhecimento de cabeçalho. Este modelo de nó foi adotado pela similaridade com redes ópticas em malha e sem buffer, atendendo perfeitamente as necessidades do estudo, como detalharemos a seguir.

B.1 – Características da Chave 2x2

A chave eletro-óptica apresenta 2 entradas x 2 saídas, é construída com LiNbO_3 e apresenta entradas elétricas com conectores tipo SMA e ópticos FC/APC, além de máxima perda por retorno igual a 50 dB e por inserção igual a 5 dB, apresenta variação de temperatura de operação entre 0° e 70° C. Apresenta alta velocidade de comutação na ordem de nano-segundos, alta extinção de polarização e baixa perda por inserção fiber-to-fiber. Apresenta duas entradas elétricas, de alimentação e RF. A entrada de RF seria usada para roteamento de pacotes baseado em comprimento de onda, através do princípio do Interferômetro de Mach-Zender, onde uma interferência construtiva viabilizaria o roteamento.

A chave em questão opera em dois estados, paralelo ou cruzado, através da aplicação de uma tensão de alimentação V_S . Por seu princípio de operação ser baseado no interferômetro de Mack-Zender, espera-se que a intensidade da corrente de saída siga a relação:

$$I = I_0 \cos^2 \rho V_S;$$

Onde ρ é uma constante e V_S a tensão aplicada.

A figura 44 abaixo mostra o diagrama funcional da chave eletro-óptica, com seus estados de operação, seus conectores ópticos e suas entradas elétricas.

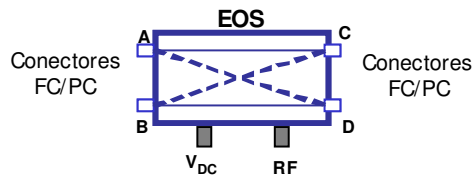


Fig. 43 – Diagrama Funcional da chave eletro-óptica

O experimento montado para inspecionar as características de funcionamento da chave 2x2 teve como principais objetivos validar o princípio de que quando uma de suas saídas permite a passagem da informação a outra rejeita esta informação. Os equipamentos utilizados para tal estudo foram um laser monomodo sintonizável, com o qual inspecionamos sua operação dentro da janela óptica de 3ª geração, 1530-1560nm em passos de 10nm, visando obter em qual comprimento de onda sua operação é mais satisfatória. Um controlador de polarização foi incluído para minimizar a alta sensibilidade a polarização da luz em equipamentos fabricados com LiNbO_3 ; adicionamos uma cápsula acrílica como proteção as variações de temperatura dentro do laboratório, pois estas pequenas variações causavam mudanças no ponto de operação do equipamento; usamos uma fonte de alimentação DC varrendo desde -5V até +5V, em passos de 0.5V, uma faixa maior de inspeção poderia danificar o cristal que faz com que equipamento comute entre seus estados de operação. Analisamos o comportamento da chave para suas duas entradas, jogando luz em somente em uma das entradas por vez, e medindo o nível de potência em ambas saídas simultaneamente. A figura 45 abaixo mostra o set-up experimental montado para a caracterização da chave eletro-óptica 2x2.

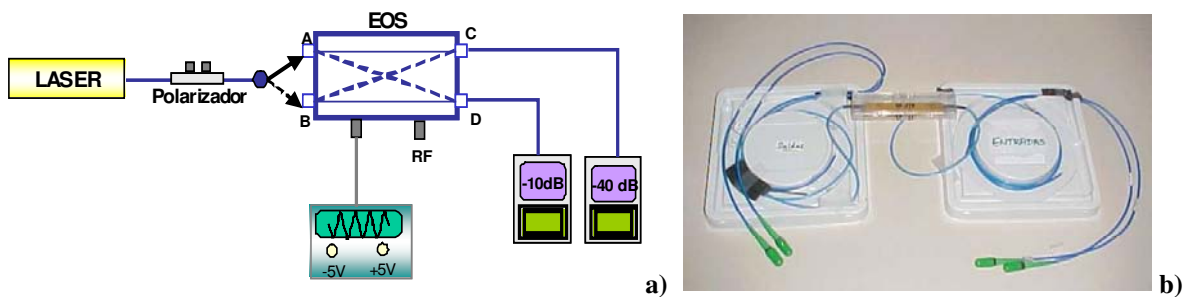


Fig. 44 – a) Set-up Experimental para Caracterização da Chave EO; b) Foto chave EO LiNbO_3

Os resultados obtidos através da aplicação dos procedimentos descritos acima, são muito similares para ambas entradas e comprovam a viabilidade de se usar este equipamento neste estudo. Estes resultados são mostrados na figura 46 e 47 abaixo, respectivamente para as entradas A e B, e depois é mostrado na figura 48 a sobreposição das curvas de operação para cada entrada dentro da janela inspecionada, comprovando a similaridade de sua operação para qualquer comprimento de onda dentro desta janela.

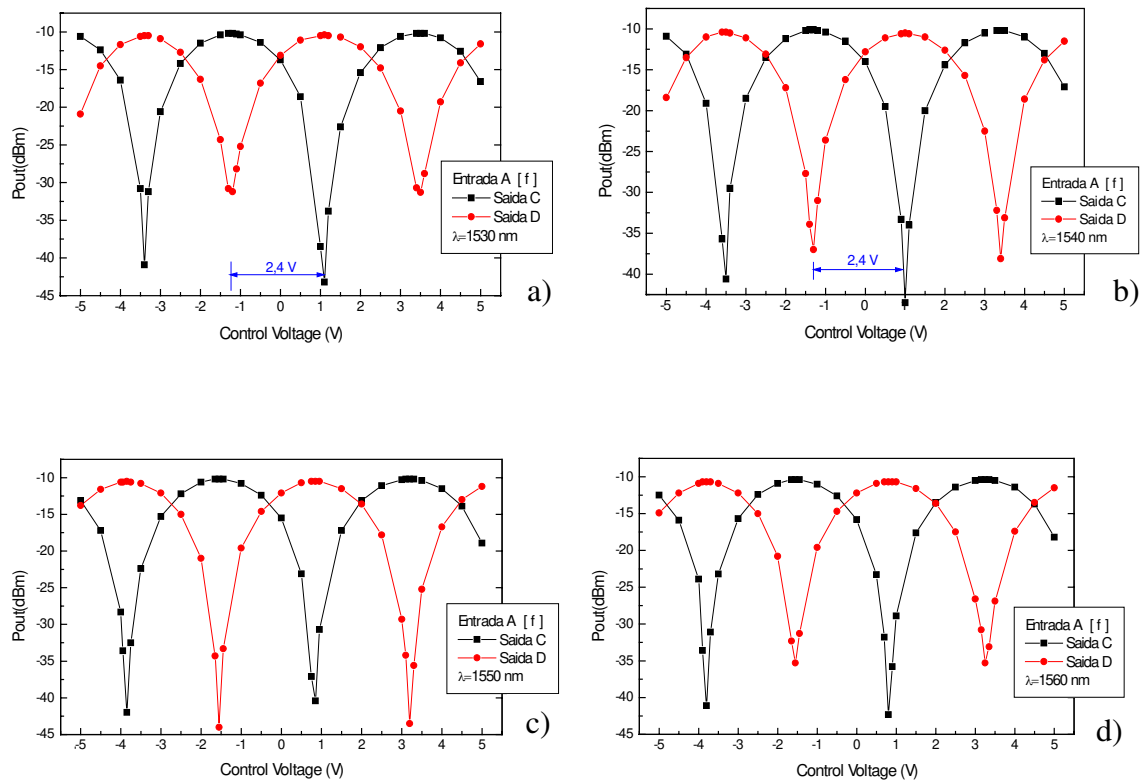


Fig. 45 – Características de Transmissão da Chave Eletro-Óptica 2x2 operando com informação na entrada A. a) 1530nm; b) 1540nm; c) 1550nm; d) 1560nm

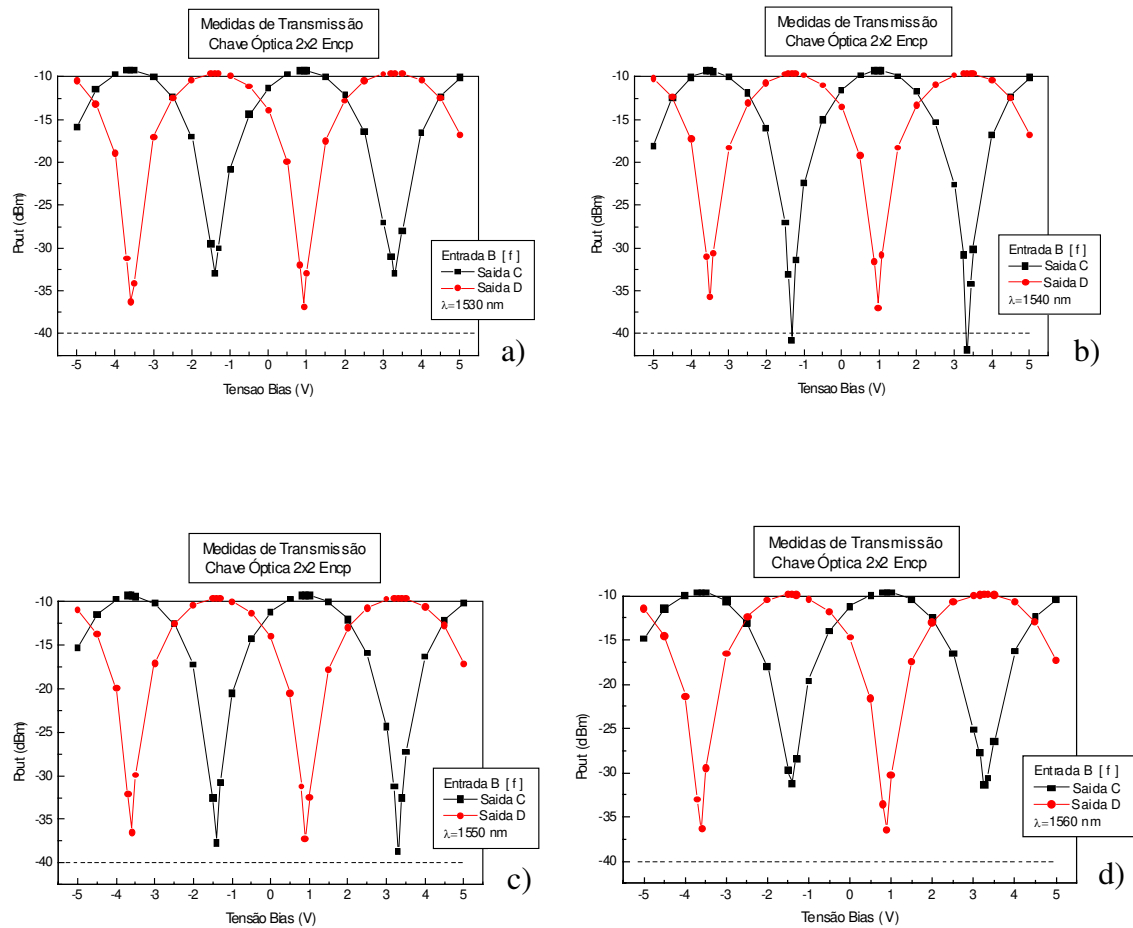


Fig. 46 – Características de Transmissão da Chave Eletro-Óptica 2x2 operando com informação na entrada B. a) 1530nm; b) 1540nm; c) 1550nm; d) 1560nm

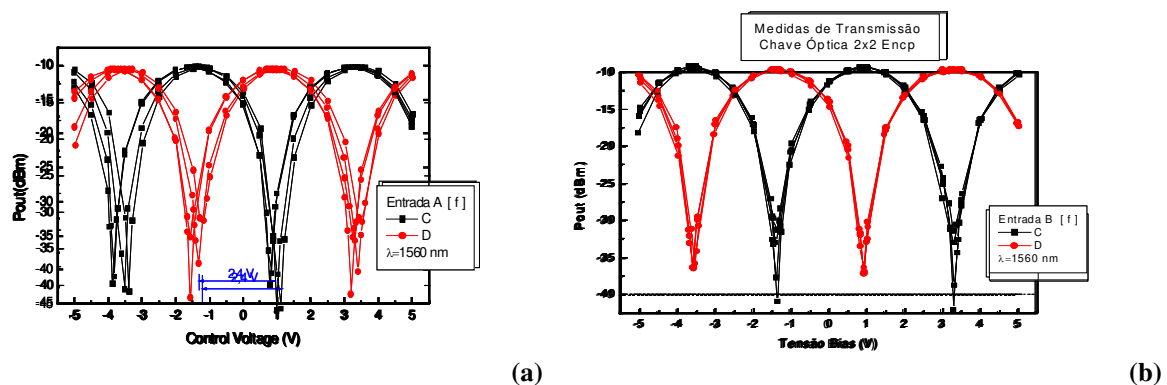


Fig. 47 – Sobreposição das curvas de caracterização da Chave EO; (a) Entrada A; (b) Entrada B

Os resultados apresentados acima ratificam a operação da chave em função de $\cos^2$; alta velocidade de comutação da chave, pois, modulando-se o laser com pulsos retangulares confirmamos que ‘rise/fall time’ é igual a 1 ns; alta taxa de extinção, em torno de 30 dB; similaridade entre pontos de operação nas duas entradas, além de apresentar dimensões físicas reduzidas tornando possível sua utilização no estudo. Entre suas principais desvantagens estava o alto custo do material (LiNbO₃); sua sensibilidade à temperatura; seu estado de rejeição crítico, variando 20 mV perde-se 3 dB, o que tornaria necessário implementar um CAG para fazer a varredura em tensão na sua faixa de operação para que a chave possa operar em todos seus pontos, otimizando sua utilização, porém isto tiraria o foco do estudo, que é um nó de uma rede óptica de acesso totalmente do domínio óptico.

Apêndice C - Caracterização Chave Acusto-Óptica

Esta seção dedica-se a mostrar os valores obtidos durante a caracterização da chave empregada em grande parte dos estudos experimentais apresentados no capítulo 3, assim como suas características intrínsecas. A chave AOS, opera com o princípio de difração através de um cristal oscilador que encaminha a luz para a porta de saída de acordo com a sinalização proveniente dos circuitos eletrônicos. Especificada para operar em 1550 nm numa frequência de 55 MHz, porém mantém suas funcionalidades desde 1540 até 1570 nm. Apresenta tempo de resposta de 100ns e conectores ópticos tipo FC/PC. A figura 49 mostra os valores considerados na caracterização e faz um comparativo com os dados fornecidos pelo fabricante, para tal caracterização trabalhamos com $\lambda \approx 1550$ nm e um laser com potencia em -6 dBm.

AOS - Modo CW				
Portas		Pout (dBm)	Atenuação	STATUS
IN	OUT			
1	2	-16,4	-10,4	Cross-Talk
1	3	-10,9	-4,9	Principal
1	4	-33	-27	Reflexão

AOS - Modo Pulsado				
Portas		Pout (dBm)	Atenuação	STATUS
IN	OUT			
1	2	-8,4	-2,4	Principal
1	3	-58,1	-52,1	Cross-Talk
1	4	-57,7	-51,7	Reflexão

AOS - Modo CW				
Portas		Pout (dBm)	Atenuação	STATUS
IN	OUT			
2	1	-17,6	-11,6	Cross-Talk
2	4	-8,8	-2,8	Principal
2	3	-37,2	-31,2	Reflexão

AOS - Modo Pulsado				
Portas		Pout (dBm)	Atenuação	STATUS
IN	OUT			
2	1	-9,1	-3,1	Principal
2	4	-58	-52	Cross-Talk
2	3	-57,9	-51,9	Reflexão

AOS - Modo CW				
Portas		Pout (dBm)	Atenuação	STATUS
IN	OUT			
3	1	-9,3	-3,3	Principal
3	4	-17,2	-11,2	Cross-Talk
3	2	-36,8	-30,8	Reflexão

AOS - Modo Pulsado				
Portas		Pout (dBm)	Atenuação	STATUS
IN	OUT			
3	1	-57,6	-51,6	Cross-Talk
3	4	-10,3	-4,3	Principal
3	2	-57,9	-51,9	Reflexão

AOS - Modo CW				
Portas		Pout (dBm)	Atenuação	STATUS
IN	OUT			
4	2	-9,3	-3,3	Principal
4	3	-17,5	-11,5	Cross-Talk
4	1	-34,7	-28,7	Reflexão

AOS - Modo Pulsado				
Portas		Pout (dBm)	Atenuação	STATUS
IN	OUT			
4	2	-58,1	-52,1	Cross-Talk
4	3	-10,6	-4,6	Principal
4	1	-57,9	-51,9	Reflexão

Fig. 48 - Resultados da caracterização da Chave AO

Apêndice D - Receptor de Pacotes Ópticos

Os conversores OE disponíveis no mercado, além de apresentarem alto custo, desviando de uma das propostas deste estudo, apresentam operação linear a potencia óptica de entrada e não operam com níveis de saída TTL. Essas oscilações na entrada dos receptores ópticos podem ser devidas a mudança no estado de polarização da luz ao longo da fibra, por micro e/ou macro curvaturas, entre outras coisas. Visando integrar toda a parte eletrônica do estudo, desde a conversão OE, que será feita pelo OpPaRe, a unidade HRC e o LDC, que juntos desempenham todas as funções necessárias para detecção, reconhecimento e roteamento de pacotes ópticos em redes ópticas de acesso com topologia em malha desenvolvemos este circuito capaz de converter os pacotes ópticos em elétricos do modo fácil, barato e que opere com sinais em níveis compatíveis com as outras unidades eletrônicas. A figura 50 mostra o esquema elétrico deste equipamento e suas principais características serão descritas a seguir.

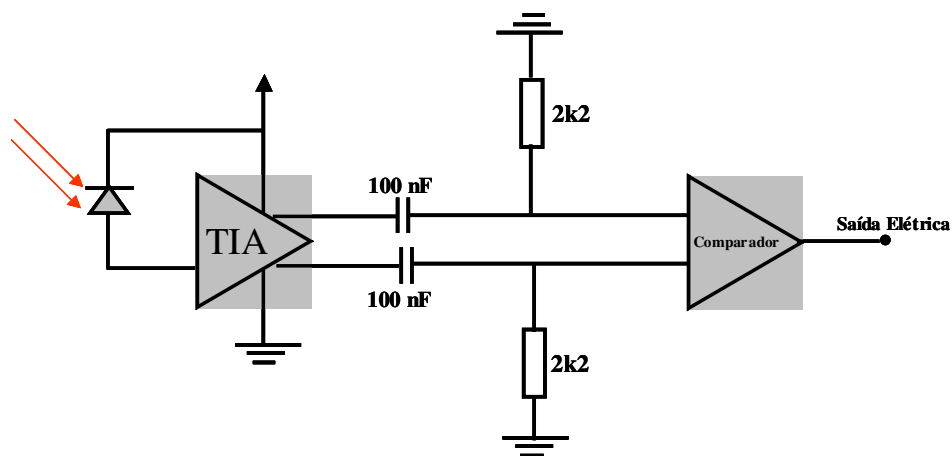


Fig. 49 – Esquema Elétrico do OpPaRe

Este equipamento usa um fotodetector TIA InGaAs com saída elétrica diferencial. Opera com alimentação DC +5V, numa taxa STM-1, com encapsulamento integrado com 4 pinos coaxiais, e com possibilidade de montagem em painel ou PCB, além disso apresenta sensibilidade igual a -38.5 dBm, largura de banda 200 MHz e ganho típico de 35 V/mW.

O fato de termos a largura de banda do fotodiodo igual a 200 MHz foi determinante para sua aplicação neste estudo, pois além de fazer a conversão OE ele já atuava como um filtro natural, para que, quando o sinal chega ao HRC, que opera analisando as transições do cabeçalho do pacote, e suas frequências nunca serão maiores que o valor típico do fotodiodo, auxiliando na não intervenção das transições do sinal digital no processo de reconhecimento de cabeçalho. As saídas diferenciais do fotodiodo são conectadas as entradas de um comparador diferencial de alta velocidade, LM 360. as principais características deste comparador é a garantia de alta velocidade de resposta, max 20ns; , saídas complementares em nível TTL; Alta impedância de entrada; e encapsulado de modo dual-in-line, com alimentação simétrica.

As principais vantagens propiciadas por este conversor OE, para que seja implementado nas redes ópticas de acesso proposta neste estudo são:

- ✓ Alta facilidade de Implementação;
- ✓ Baixo Custo dos componentes envolvidos e conseqüentemente do projeto final;
- ✓ Compatibilizarão de todos os níveis de sinal elétrico envolvidos na parte eletrônica do estudo;
- ✓ Possibilidade de se integrar em um único circuito, todas as funções necessárias para conversão, detecção e roteamento de pacotes ópticos, diminuindo custos e minimizando as dimensões físicas do nó óptico;
- ✓ Garantia de interpretação correta das informações de endereço contidas em cada cabeçalho.