



Marcos Bomfim do Nascimento

**Análise do Impacto do Aumento das Taxas de
Transmissão no Desempenho e na
Confiabilidade Sistemas de Comunicações
Ópticas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Marbey Manhães Mosso



Marcos Bomfim do Nascimento

**Análise do Impacto do Aumento das Taxas de
Transmissão no Desempenho e na
Confiabilidade Sistemas de Comunicações
Ópticas**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marbey Manhães Mosso
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Profa. Maria Cristina Ribeiro Carvalho

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Glaucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Antonio Dias de Macedo Filho

Alfadelta-Rio Desenvolvimento de Sistemas Ltda

Prof. Ricardo Guerra Pereira
UERJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de setembro de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcos Bomfim do Nascimento

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ) em 2002. Atuou nas empresas Embratel e Huawei, e desde 2009 desenvolve a função de Engenheiro de Suporte Técnico na empresa Alcatel-Lucent.

Ficha Catalográfica

Nascimento, Marcos Bomfim do

Análise do impacto do aumento das taxas de transmissão no desempenho e na confiabilidade sistemas de comunicação ópticas / Marcos Bomfim do Nascimento; orientador: Marbey Manhães Mosso. -2014.

91 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Metodologia digital. 3. Detecção digital. 4. Sistemas coerentes. 5. DWDM. 6. SDH. 7. OTN. 8. ASON. 9. GMPLS. 10. TCP/IP. I. Mosso, Marbey Manhães. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

À minha família e amigos pela compreensão e companheirismo nos momentos mais importantes do curso e principalmente na elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Marbey Manhães Mosso pela orientação, dedicação, paciência e confiança para a realização deste trabalho.

Aos professores e colegas do CETUC que me prepararam e me auxiliaram a realizar esse trabalho, em especial ao grupo do laboratório GSOM.

Aos colegas de trabalho na Alcatel-Lucent que me deram incentivo e suporte para que eu pudesse estar presente na PUC-Rio sempre que necessário.

Resumo

Nascimento, Marcos Bomfim do; Mosso, Marbey Manhães (Orientador). **Análise do impacto do aumento das taxas de transmissão no desempenho e na confiabilidade sistemas de comunicações ópticas**. Rio de Janeiro, 2014. 91p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo desta Dissertação é apresentar a análise do comportamento de protocolos e dos métodos de proteção em sistemas ópticos para as futuras redes de altas taxas de transmissão. A demanda por banda de transmissão em redes ópticas vem aumentando sobremaneira nas últimas décadas, principalmente, devido à disseminação do acesso e da utilização da Internet e aos novos tipos de aplicações que ela utiliza, com compartilhamento de vídeos e aplicações em nuvem. Esse aumento de tráfego tem impulsionado fortemente o desenvolvimento de tecnologias de sistemas ópticos que procuram garantir o atendimento a essa demanda. Várias frentes de estudos buscam obter taxas de transmissão de bits mais altas por canais (100Gbps, 400Gbps e 1Tbps), utilizando-se de tecnologias avançadas como o formato de modulação multinível, fibras com baixa perda e área de transmissão efetiva mais larga, amplificação híbrida EDFA/Raman e tecnologias de detecção digital coerente. A taxa máxima de transmissão em sistemas ópticos está saindo do atual 10Gbps e indo na direção dos 40Gbps e 100Gbps, já comercialmente oferecidos, e dos 400Gbps e 1Tbps ainda em desenvolvimento. E esse aumento na taxa de transmissão gera uma necessidade de avaliação do comportamento dos protocolos e métodos de proteção atuais quando aplicados a essas novas redes ultra-rápidas. A mudança para taxas de transmissão tão altas pode requerer diferentes estratégias de operação, e a razão é que os efeitos de retardo de propagação alteram significativamente o controle de fluxo do tráfego.

Palavras-chave

Modulação Digital; Detecção Digital; Sistemas Coerentes; DWDM; SDH; OTN; ASON; GMPLS; TCP/IP; Ethernet; 100G; Latência.

Abstract

Nascimento, Marcos Bomfim do; Mosso, Marbey Manhães (Advisor). **Impact of ultra high bit rate in the performance and confiability in optical systems.** Rio de Janeiro, 2014. 91p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this Dissertation is to present an analysis of the behavior of protocols and protection methods in optical communication systems for the ultra high bit rate networks. The demand for optical networking transmission bandwidth is increasing greatly in recent decades, mainly due to the spread of access to and the use of the Internet and new types of services, with video sharing and cloud applications. This increase in traffic has driven strongly the development of optical systems technologies that seek to ensure compliance with this demand. Several fronts of studies seeking to obtain rates from higher bits per channel (100Gbps, 400Gbps and 1Tbps), using advanced technologies such as multilevel modulation format, fibers with low loss and wider effective transmission area, hybrid EDFA/Raman amplification and digital coherent detection technologies. The maximum transmission rate in optical systems is coming out of the current 10Gbps and 40Gbps and going towards the 100Gbps, already commercially offered, and still developing 400Gbps and 1Tbps. This increase in transmission rate generates a need for evaluation of the behavior of current protection protocols and methods when applied to these new ultra-fast networks. The change to so high transmission rates may require different operating strategies, and the reason is that the effects of propagation delay alter significantly the control traffic flow.

Keywords

Digital Modulation; Digital Detecction; Coherent Systems; DWDM; SDH; OTN; ASON; GMPLS; TCP/IP; Ethernet; 100G; Latency.

Sumário

Introdução	13
2. Novas Tecnologias de Transmissão Óptica.....	14
2.1. Técnicas de Modulação e Detecção Digitais	17
2.2. Sistemas Coerentes	28
2.3. PDM	30
2.4. Amplificadores	31
2.5. FEC	34
2.6. Aumentando a Capacidade da Rede ⁷	35
2.7. Simulação de enlace DP-QPSK 100 Gbps	36
2.8. Exemplo de sistema 100G Alcatel-Lucent	38
2.8.1. Descrição de Equipamentos.....	39
2.8.2. Descrição de Aplicação na Rede	400
3. Funcionamento dos Protocolos de Rede	43
3.1. Funcionamento dos Protocolos TCP/IP ^{14 15 16}	454
3.1.1. Camada de Transporte	45
3.1.2. Camada de Rede	48
3.2. Funcionamento dos Protocolos de Transmissão.....	58
3.2.1. Rede OTN	58
3.2.2. ASON/GMPLS	65
4. Efeitos de Altas Taxas de Transmissão	711
4.1. Atrasos em redes de comutação de pacotes	711
4.2. Limitações por processamento ^{15 17}	722
4.3. Tamanho do número de sequência do TCP	744
4.4. Tamanho do MTU ²²	766
4.5. Latência e Taxa de Transmissão ^{23 24}	79
4.6. Perda de Pacotes durante interrupções	822
5. Conclusões	826
6. Referências bibliográficas	828
Anexo A. Códigos MATLAB	900
A1 – Modulações.....	900

Lista de tabelas

Tabela 1 - Taxa de Transmissão do OTN.....	59
Tabela 2 - Proteções em OTN	653
Tabela 3 - Padrões Ethernet e MTU	77
Tabela 4 - Cabeçalhos TCP/IP sobre GbEth	78
Tabela 5 - Tempo de recuperação de tráfego	85

Lista de figuras

Figura 1 - Taxa de Bits versus Km no período 1850 a 2000 ¹	14
Figure 2 - Crescimento da capacidade dos enlace ópticos ⁷	16
Figure 3 - Novas tecnologias aplicadas ao sistema de comunicação óptica..	17
Figure 4 - Formato dos sinais RZ e NRZ	18
Figure 5 - Modulações ASK, FSK e PSK	19
Figure 6 - Diagramas de Constelação: ASK, FSK e QPSK	20
Figure 7 - Formatos Avançados de Modulação.....	21
Figure 8 – Diagrama de Constelação do QPSK	22
Figure 9 – Modulação QPSK.....	22
Figure 10 – Demodulação QPSK	23
Figure 11 - Tx QPSK.....	24
Figure 12 - Rx DPSK	24
Figure 13 - Diagrama de Constelação QPSK	25
Figure 14 - Diagrama de Constelação 16QAM.....	26
Figure 15 – Tx 64QAM.....	27
Figure 16 - Rx 64QAM	27
Figure 17 - Diagrama de Constelação 64QAM.....	28
Figure 18 - Receptor Coerente.....	29
Figure 19 - PDM-QPSK	31
Figure 20 - Regeneração 3R.....	32
Figure 21 – Amplificador EDFA.....	33
Figure 22 - Amplificador Raman.....	34
Figure 23 - Tx DP-QPSK 100G	36
Figure 24 - Visualização do OSA de do OTDV	37
Figure 25 - Rx PD-QPSK 100G	37
Figure 26 - Diagrama de Constelação DP-QPSK.....	38
Figure 27 - Testes de modulação.....	38
Figure 28 - PDM-QPSK e Detecção Coerente	39
Figure 29 - Equipamentos 1830 PSS32 e 1626LM	39
Figure 30 - 1830 PSS64.....	40

Figure 31 - Aplicação na Rede	400
Figure 32 - Soluções de transmissão	411
Figure 33 - Interligação fim-a-fim.....	422
Figure 34 - Unidade TRBD	422
Figure 35 - 130SCUP	433
Figure 36 - Camadas TCP/IP.....	455
Figure 37 - Janela Deslizante TCP	48
Figure 38 - AS - Autonomous Systems	50
Figure 39 - Número de saltos do roteador de origem A	51
Figure 40 - BGP - Border Gateway Protocol	54
Figure 41 - Multiprotocol Label Switching	56
Figure 42 - Cabeçalho MPLS	57
Figure 43 - OTN – Camadas.....	59
Figure 44 - OTN – Seções	60
Figure 45 - Quadro OTN	61
Figure 46 - Multiplexação no OTN	62
Figure 47 - Comparação a) 1+1 OMS e b) 1+1 OCh	64
Figure 48 - Plano de Controle e Plano de Dados.....	67
Figure 49 - Nó GMPLS	69
Figure 50 - Atrasos em redes de comutação de pacotes	722
Figure 51 - Leitura e encaminhamento de pacotes	733
Figure 52 - Cabeçalho TCP	755
Figure 53 - Wireshark - HTTP GET.....	75
Figure 54 - Tempo de Transmissão	800
Figure 55 - Taxa de Tx, Distância e Tamanho de Pacote.....	811

Lista de abreviaturas

AM	Amplitude Modulation
ADM	Add-Drop Multiplexer
APD	Avalanche Photodiode
AS	Autonomous System
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASON	Automatic Switched Optical Networks
ASK	Amplitude Shift-Keying
BER	Bit Error Rate
BGPv4	Border Gateway Protocol, version 4
CAMs	Content Addressables Memories
CR-LDP	Constraint-Based Routing-Label Distribution Protocol
CRC	Cyclic Redundancy Check
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DPSK	Differential Phase-Shift Keying
DSP	Digital Signal Processing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DXC	Digital Cross Connect
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
FEC	Forward Error Correction
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift-Keying
IGRP	Enhanced Interior Gateway Routing Protocol
IETF	Internet Engineering Task Force
ION	Intelligent Optical Networks
IP	Internet Protocol
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunication Union
IS-IS	Intermediate System-to-Intermediate System
LAN	Local Area Networks
LDPC	Low Density Parity Check

LER	Label Edge Router
LSP	Label Switched Path
LSR	Label-Switched Router
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
MTU	Maximum Transmission Unit
NPU's	Network Process Units
NRZ	Non Return to Zero
Och	Optical Channel
OMS	Optical Multiplex Section
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OSPF	Open Shortest Path First
OTN	Optical Transport Network
OTS	Optical Transmission Section
OTU	Optical Transmission Unit
PDM	Polarization-Division Modulation
PM	Phase Modulation
PRBS	Pseudo-Random Bit Sequence
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAM	Random Access Memory
RIP	Routing Information Protocol
RPR	Resilient Packet Ring
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTT	Round Trip Time
RZ	Return to Zero
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SONET	Synchronous Optical Networking
TCP	Transmission Control Protocol
VLSI	Very-Large-Scale Integration
VOIP	Voice Over IP
WDM	Wavelegth Division Multiplexing

1

Introdução

O aumento da demanda de tráfego nas últimas décadas vem impulsionando também o aumento da taxa de transmissão das redes ópticas. Se faz necessário saber se o comportamento dos protocolos atuais será adequado a tais alterações, ou se há necessidade de ajustes. A necessidade desta análise foi a motivação principal deste trabalho, cujo objetivo é levantar principais pontos de ajustes e mudanças a serem executados para permitirem o melhor desempenho das redes ópticas de transmissão.

A dissertação está organizada da seguinte forma: além deste capítulo de introdução, está o Capítulo 2 que descreve as tecnologias empregadas nas redes de altas velocidades garantindo o aumento de taxa de transmissão nos meios de comunicações ópticas atualmente. É feita uma descrição teórica de conceitos e de modelos de modulação e detecção digitais, modulação por polarização, amplificação e sistemas coerentes. No último item é feita uma descrição dos sistemas de 100G utilizados pelas maiores empresas fabricantes de equipamentos de transmissão.

No capítulo 3 é feita uma descrição dos principais protocolos e conceitos de rede, onde são detalhados os protocolos no nível de rede TCP/IP e no tópico seguinte dos protocolos de transmissão.

Esses conceitos são utilizados no capítulo 4, onde será realizada a análise do comportamento desses protocolos em função do aumento da taxa de transmissão das redes ópticas. Neste capítulo são analisados os possíveis efeitos quanto ao retardo de transmissão, tamanho dos pacotes utilizados assim como a perda de pacotes durante interrupções. E no último capítulo são feitas algumas conclusões baseadas no trabalho apresentado.

2

Novas Tecnologias de Transmissão Óptica

O BL (*Bit Rate x Length*) é o produto da Taxa de Transmissão com a Distância, e é uma figura de mérito muito utilizada em Sistemas de Comunicações Ópticas¹. Na figura 1 pode-se ver que esse produto teve um aumento exponencial no período analisado e indica que haverá necessidade de aumento ainda maior por banda de transmissão nos próximos anos.

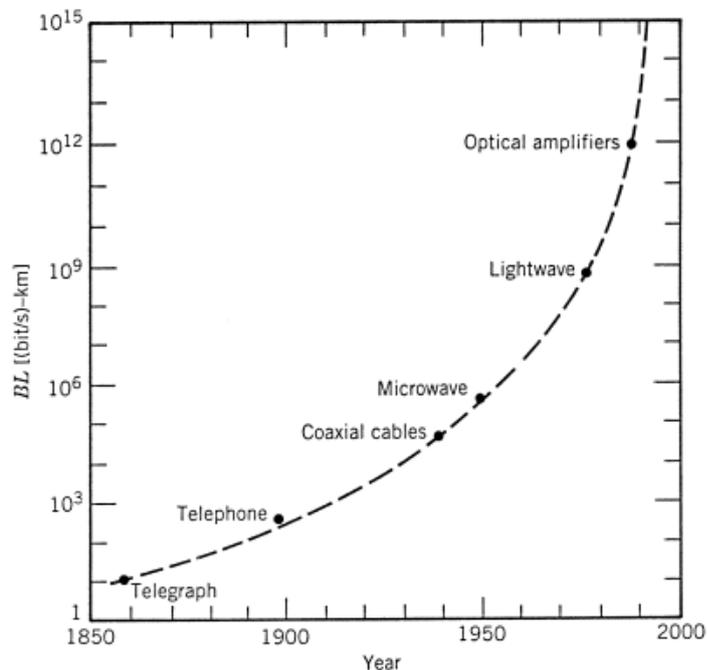


Figura 1 - Taxa de Bits versus km no período 1850 a 2000¹.

Nesse período, o aumento do produto BL ocorreu sempre associado a algum tipo de mudança ou avanço tecnológico e atualmente essa associação não é diferente. As pesquisas em fontes ópticas, detectores coerentes, novos tipos de fibras, amplificadores ópticos e métodos de modulação têm impulsionado fortemente o desenvolvimento tecnológico e tem aumentado tanto a banda de transmissão por canal, como a distância entre nós, sem a necessidade de regeneração elétrica. Desta forma, o produto BL se mantém em crescimento acelerado.

E esse crescimento vem acompanhado, ou de certa forma impulsionado, por uma demanda de tráfego também cada vez maior. A disseminação do acesso à internet e a intensa utilização de diversas aplicações como o *video streaming*, acesso às redes sociais, VOIP, jogos *online* e o controle de atividades remotas, assim como a utilização de diversas aplicações em *smartphones* e *tablets* têm garantido o crescimento dessa demanda.

Nessa procura por novos métodos e novas tecnologias para aumentar a quantidade de bits transmitidos e a distância alcançada nessas transmissões, além de garantir a qualidade do sinal transmitido, diversos avanços estão sendo pesquisados e propostos desde o início das pesquisas em sistemas ópticos.

Costuma-se dividir a evolução das comunicações ópticas desde a década de 1970 até os dias atuais em quatro gerações bem distintas:

- **1ª Geração:** No final da década de 1970, com utilização comprimentos de onda de 850 nm, *lasers* semicondutores de GaAs. Os sistemas dessa geração operavam em 45Mbps e atingiam até 10Km sem regeneração. Mas a perda de sinal óptico nas fibras utilizadas nesses sistemas ainda era muito alta, chegando a 20 dB/km.
- **2ª Geração:** Na década de 1980, com comprimentos de onda na região de 1310 nm, garantindo uma perda de apenas 1 dB/km, os semicondutores utilizados foram entre outros o InGaAsP, operando com taxas de até 100Mbps. Inicialmente as fibras utilizadas foram as do tipo multimodo, mas foram substituídas pelas fibras monomodo e ao final da década, já existiam sistemas operando com até 1.7 Gbps com enlaces de até 50 km sem repetidores ou regeneradores.
- **3ª Geração:** Na década de 1990, com comprimentos de onda na faixa de frequências próximas à 1550 nm atingindo até 0.2 dB/km de perdas. Com a utilização de fibras DS (*Dispersion Shifted Fibers*), nas quais a dispersão mínima estava na faixa de 1550 nm, ou fazendo a limitação do espectro do *laser* para um modo longitudinal,

foi possível atingir taxas de 2.5 Gbps em enlaces de até 100 km sem repetidores ou regeneradores (valores para sistemas comerciais).

- **4ª Geração:** Duas grandes inovações da quarta geração foram a utilização de amplificadores ópticos para aumentar a distância entre os nós, diminuindo a necessidade de regeneradores e repetidores entre os enlaces e a utilização de multiplexação por frequências (WDM – *Wavelength-division multiplexing*). Neste último, o aumento da taxa de transmissão total foi impressionante, pois, a mesma fibra que carregava apenas um canal de 2.5 Gbps ou 10 Gbps, com o WDM, passou a transportar 8 ou 16 canais com os mesmos 2.5 Gbps ou 10 Gbps em cada canal.

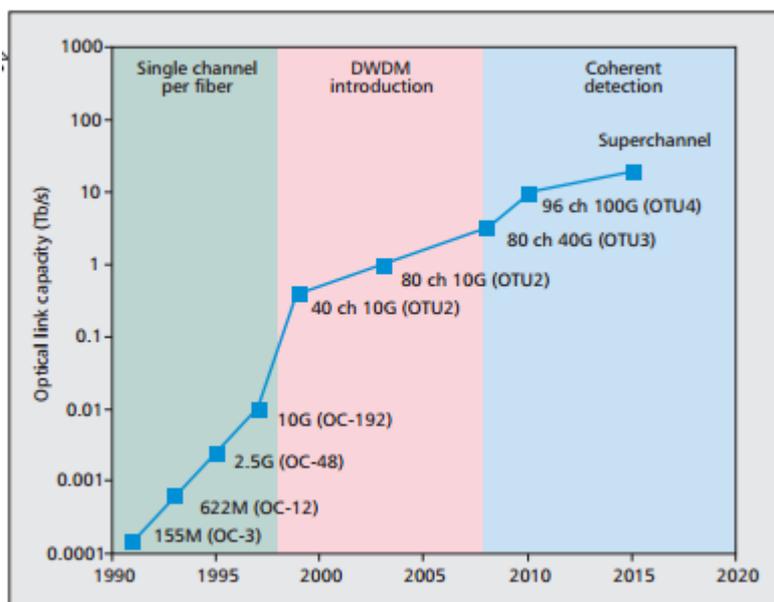


Figure 2 - Crescimento da capacidade dos enlaces ópticos ⁷.

Na figura 2 pode-se visualizar o aumento da capacidade de transmissão dos enlaces ópticos nos últimos anos. Podemos verificar o crescimento acentuado ocorrido com a utilização de sistemas DWDM, onde a multiplexação de frequências permitiu o aumento dos canais ópticos de 1 para 40 e os enlaces ópticos passaram de 10 Gbps para 400 Gbps.

Na figura 3 as novas tecnologias em redes de comunicação óptica foram divididas em três grupos: Transmissor, Meio de Transmissão e Receptor. Assim

pode-se ter uma ideia mais clara de qual fase do sistema óptico cada tecnologia é aplicada.

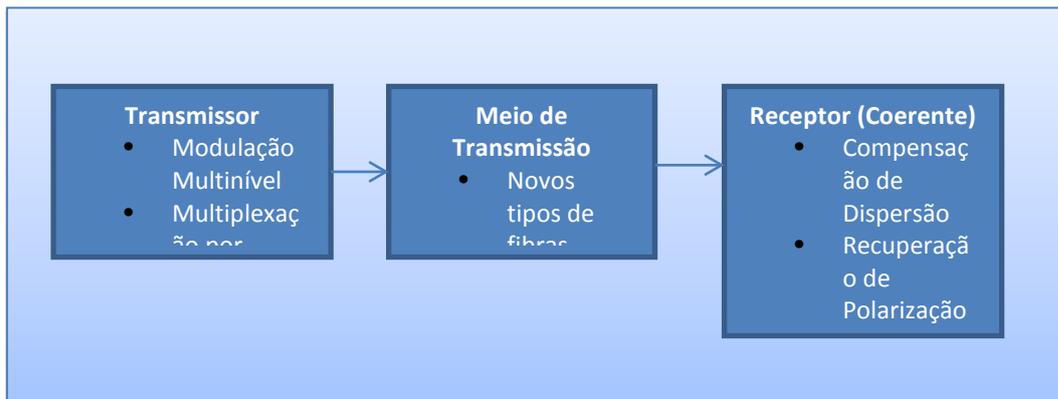


Figure 3 - Novas tecnologias aplicadas ao sistema de comunicação óptica.

Para expandir do comprimento dos enlaces, algumas tecnologias estão sendo utilizadas, como novas fibras com baixas perdas ou com área efetiva de transmissão maiores, sistemas avançados de amplificação como o Raman, principalmente para melhorar a relação sinal-ruído, OSNR (*Optical Signal-Noise Ratio*), e na recepção o uso de detecção coerente permitindo o uso de receptores universais para formatos de modulação diferencial. A tarefa de se monitorar fase e polarização passa a ser do domínio digital. O que trouxe uma simplificação para recepção multinível, sinais ópticos codificados de forma multidimensional. Dessa forma a detecção coerente digital também permite a compensação elétrica de deficiências ópticas lineares como a dispersão cromática e dispersão por modo de polarização.⁶

Nas seções a seguir, serão descritas algumas das principais técnicas e produtos que estão sob pesquisas e desenvolvimento em sistemas ópticos atualmente.

2.1

Técnicas de Modulação e Detecção Digitais

Antes de se fazer a modulação do sinal, há que se fazer a conversão eletro-óptica, que é a conversão dos bits 0s e 1s em formato de níveis de tensão provenientes de um equipamento cliente, para pulsos de potência óptica, que serão transmitidos na fibra. O trem de bits que é gerado após a conversão eletro-óptica

pode ter dois formatos: RZ (*Return to Zero*) ou NRZ (*Non Return to Zero*). No RZ, o pulso que representa o bit 1 é metade do *timeslot* destinado ao bit, dessa forma a amplitude retorna a zero antes do final do *timeslot*. No NRZ, não há transição da amplitude caso ocorra uma sucessão de bits 1. No formato NRZ a largura dos pulsos varia de acordo com a quantidade de bits 1 seguidos, o que não ocorre no formato RZ que tem largura de pulso bem definida. O NRZ foi amplamente utilizado por necessitar de uma largura de banda elétrica reduzida para os transmissores e receptores. Mas, para os sistemas DWDM, o RZ está se tornando mais utilizado, principalmente para sistemas de 40 Gbps e taxas superiores.

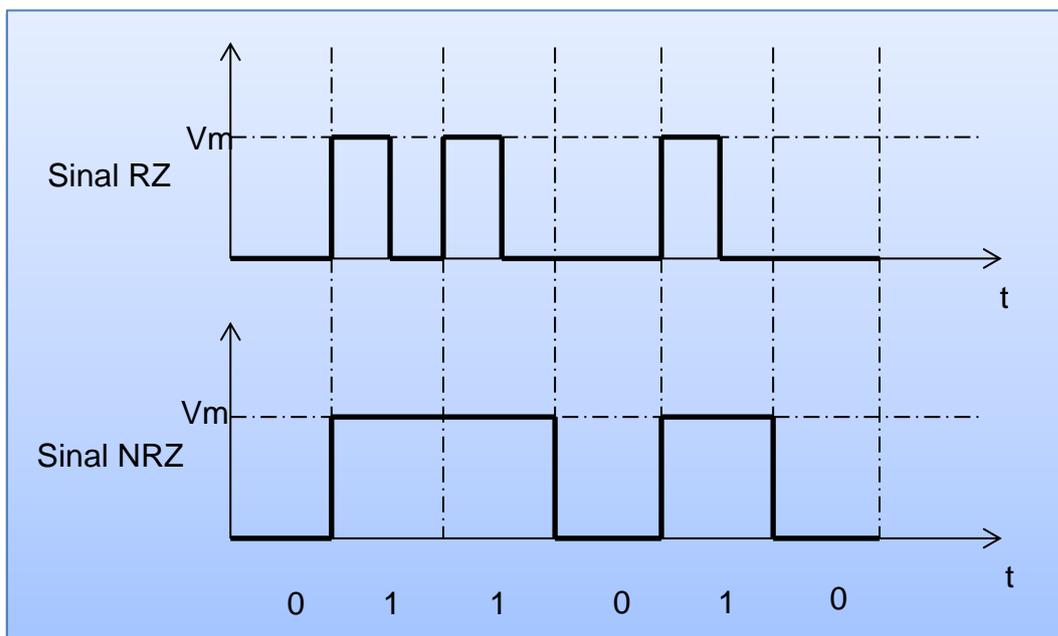


Figure 4 - Formato dos sinais RZ e NRZ.

Modulação consiste em fazer com que um parâmetro da onda portadora mude de valor de acordo com a variação do sinal modulante, que é a informação que se deseja transmitir. A portadora é enviada através da propagação do sinal em um canal de comunicação, que neste caso é a fibra óptica. E a informação é então decodificada (demodulada) do sinal recebido no equipamento remoto.

A equação da portadora antes de ser modulada é:

$$\vec{E}(t) = A(t) \cos(\omega_0 t - \varphi(t)) \vec{e}$$

A portadora pode sofrer alterações de amplitude $A(t)$, frequência (ω_0) ou fase (φ). Ao ser recebido na estação remota, o sinal original é então recuperado (demodulado) do sinal da portadora.

Dependendo do parâmetro sobre o qual se atue, temos os seguintes tipos de modulação: AM (*Amplitude Modulation*), FM (*Frequency Modulation*) ou PM (*Phase Modulation*), ASK (*Amplitude-Shift Keying*), FSK (*Frequency-Shift Keying*) e PSK (*Phase-Shift Keying*).

A figura a seguir mostra o como fica o sinal após serem aplicadas as modulações mencionadas acima.

Nos anos 1980 os formatos PSK e FSK foram amplamente estudados e utilizados, inclusive com o uso de sistemas coerentes, entretanto esses sistemas perderam a popularidade devido à complexidade de desenvolvimento dos receptores.⁵

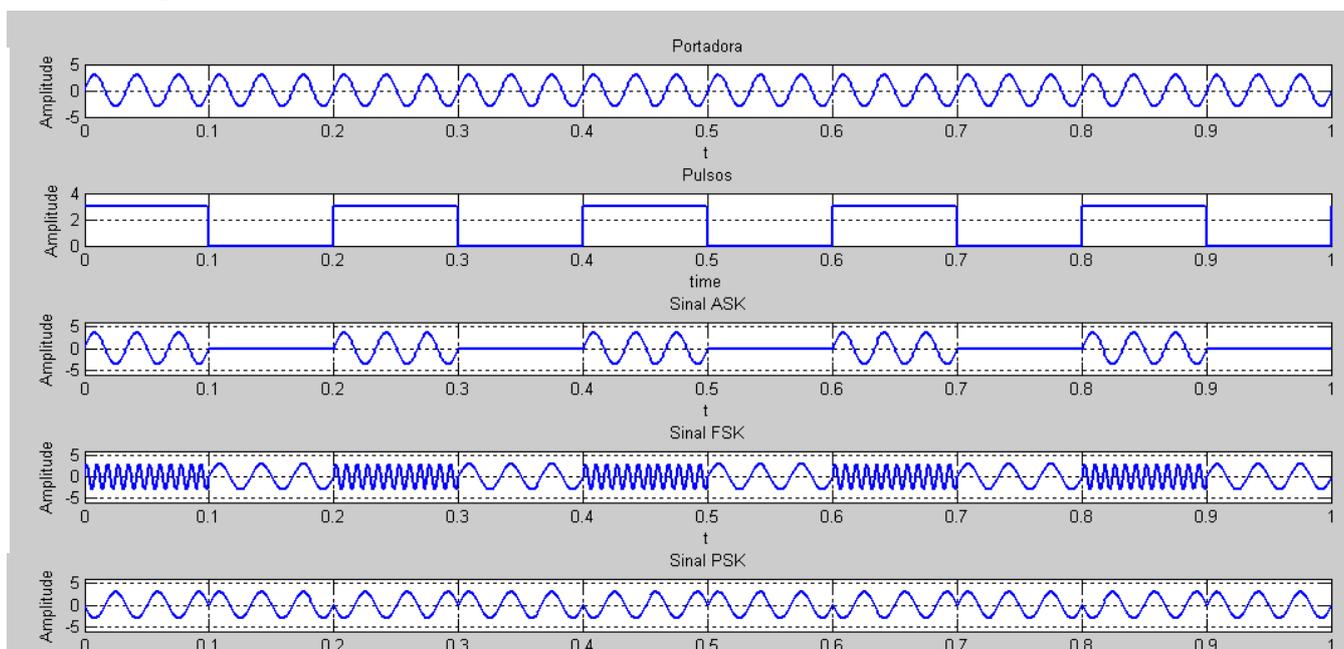


Figure 5 - Modulações ASK, FSK e PSK.

No início desse século as pesquisas em sistemas ópticos foram centralizadas nesses formatos de modulação, principalmente no desenvolvimento de sistemas WDM, para se projetar sistemas com melhor aproveitamento espectral. Nos últimos anos, o aumento da capacidade de processamento eletrônico dos dispositivos, associado ao desenvolvimento de *softwares* específicos, viabilizou a utilização das técnicas de detecção digitais e coerentes. Os sistemas WDM atuais utilizam sistemas de modulação avançados, com

utilização de codificação tanto em amplitude quanto em fase. Alguns sistemas de comunicações ópticas utilizam o DPSK (*Differential Phase-Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), ou o QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

Uma representação muito usual desses formatos de modulação é o Diagrama de Constelação. Para elaboração do diagrama pegamos o campo elétrico em forma complexa, da equação 1, temos então o fasor A:

$$A = e^{i\varphi}$$

O diagrama é desenhado a partir dos valores da parte real e imaginária do fasor A. Na figura abaixo podemos verificar as representações dos formatos ASK, PSK e QPSK, respectivamente.

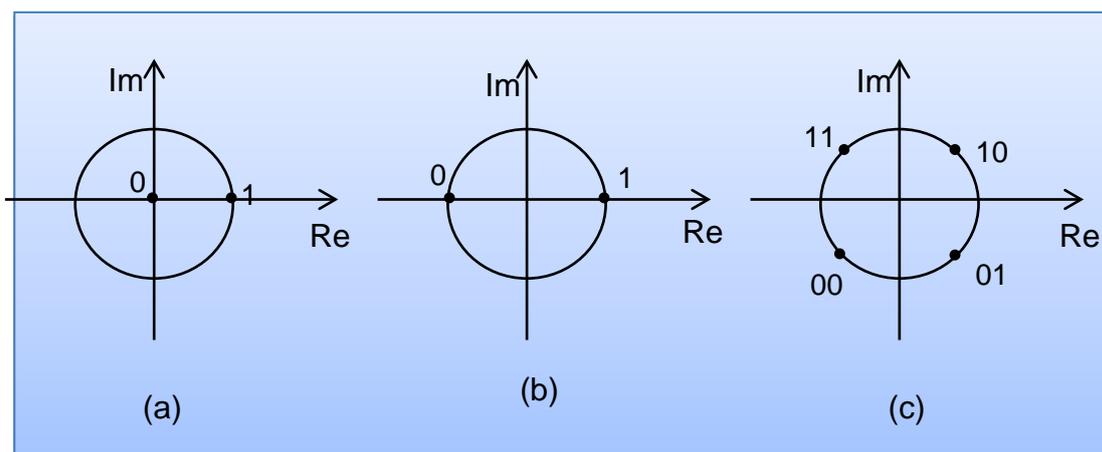


Figure 6 - Diagramas de Constelação: ASK, FSK e QPSK.

Detecção Direta

Até poucos anos, os sistemas de comunicações ópticas utilizavam em sua maioria a técnica de modulação OOK (*on-off keying*) com detecção direta³. Neste método a potência óptica lançada pelo *laser* na fibra é modulada com o liga/desliga do *laser*, associados aos bits 1s e 0s do sinal modulante, e no receptor a potência recebida, é então convertida novamente para sinais elétricos de bits 0s e 1s.

A forma mais utilizada de se modular a potência óptica do laser de forma direta é utilizar moduladores externos como o Mach-Zehnder e o IQ, nos quais o *laser* transmissor não sofre desligamentos e tem uma melhora significativa na sua vida útil. Neste tipo de modulação externa o sinal do laser é modulado de forma fotônica, com acopladores, divisores e refletores ópticos, em um sistema no qual o feixe do laser é dividido e recombinado com ou sem a mudança de fase, dependendo de qual bit deve ser transmitido.

Na modulação OOK o fator de maior importância para se fazer a decodificação do sinal é a amplitude da potência óptica, sendo o OOK classificado como 2-PAM (*Pulse Amplitude Modulation*), ou seja, modulação em amplitude de dois níveis. Mas, como dito anteriormente, os sistemas atuais tendem a utilizar modulações em amplitude e fase, em [6] verifica-se, por exemplo, a utilização de QPSK, 8PSK, 8QAM e 16QAM. A seguir serão descritos o QPSK, DPSK e o QAM, a título de exemplificação do funcionamento desses métodos, não cabendo aqui a descrição de todos os formatos empregados nos citados.

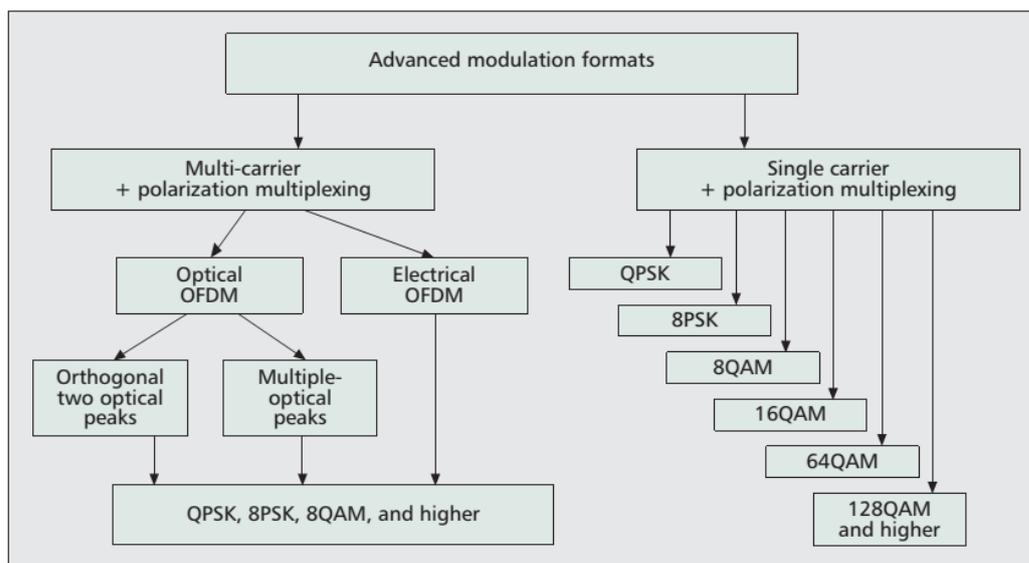


Figure 7 - Formatos Avançados de Modulação.

QPSK

No formato de modulação QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) são utilizadas quatro fases para caracterizar os diferentes símbolos. Utiliza-se a Codificação Gray para definir para cada fase a representação de um par de bits. Os

quatro pontos no diagrama, que representam cada fase, estão equidistantes em torno do círculo. Na figura 6 verificamos que com as quatro diferentes fases do QPSK podem codificar dois bits por símbolo.

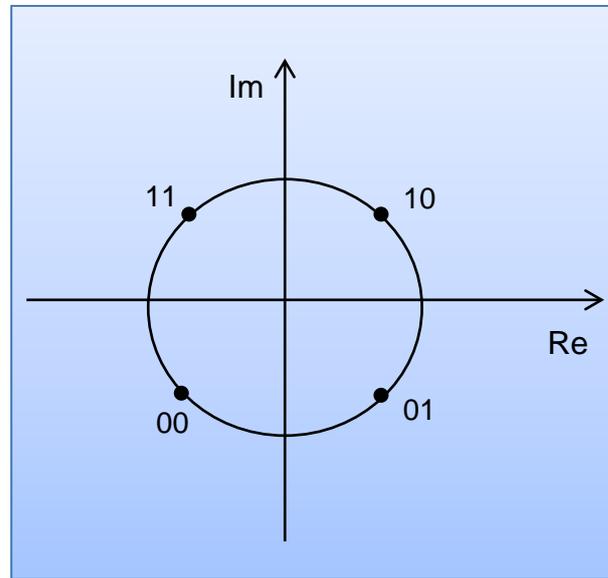


Figure 8 – Diagrama de Constelação do QPSK.

Nas duas figuras a seguir é possível verificar como é composto o sinal QPSK a partir de um conjunto de bits. No transmissor, os bits ordenados são demultiplexados e seguem por dois caminhos diferentes, são formatados pelo codificador NRZ e em seguida sofrem uma variação de fase e então são recombinados.

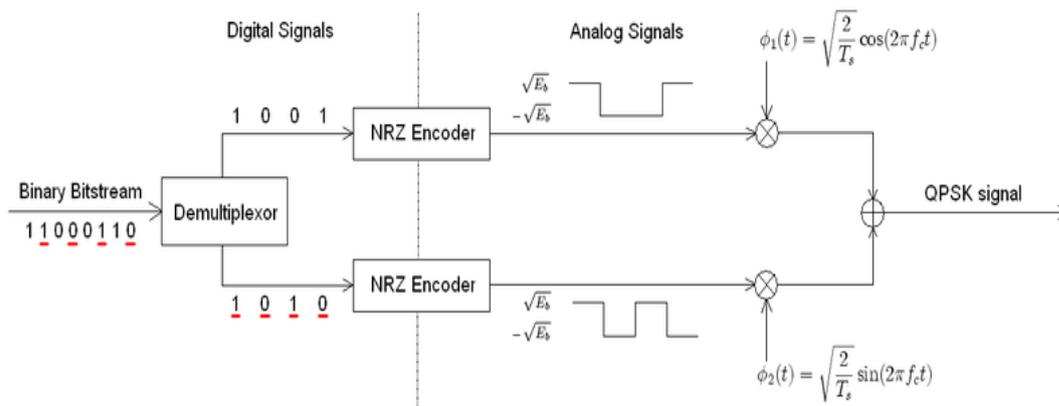


Figure 9 – Modulação QPSK.

Na recepção o sinal QPSK é espelhado e passa por filtros de fase e em seguida por uma amostragem e um dispositivo de decisão que irão reconstituir os bits de cada fase. Em sequência os dois grupos de bits são multiplexados compondo o sinal original.

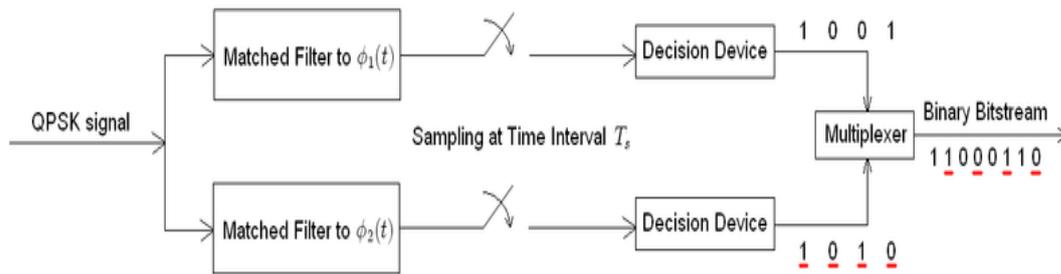


Figure 10 – Demodulação QPSK.

DPSK

Foi utilizado o software Optiwave 11 para realizar uma simulação de transmissão-recepção com modulação DPSK. Com este software é possível montar um projeto com módulos que simulam o comportamento de cada dispositivo de comunicação óptica.

O projeto montado foi de dois sistemas, um transmissor e outro receptor com modulação DPSK, utilizando 3 bits por cada símbolo. Conforme a figura a seguir, o bloco transmissor foi composto de um PRBS (*Pseudo-Random Bit Sequence*), módulo DPSK que faz a conversão do trem de bits em dois grupos independentes de bits que são então modulados em quadratura.

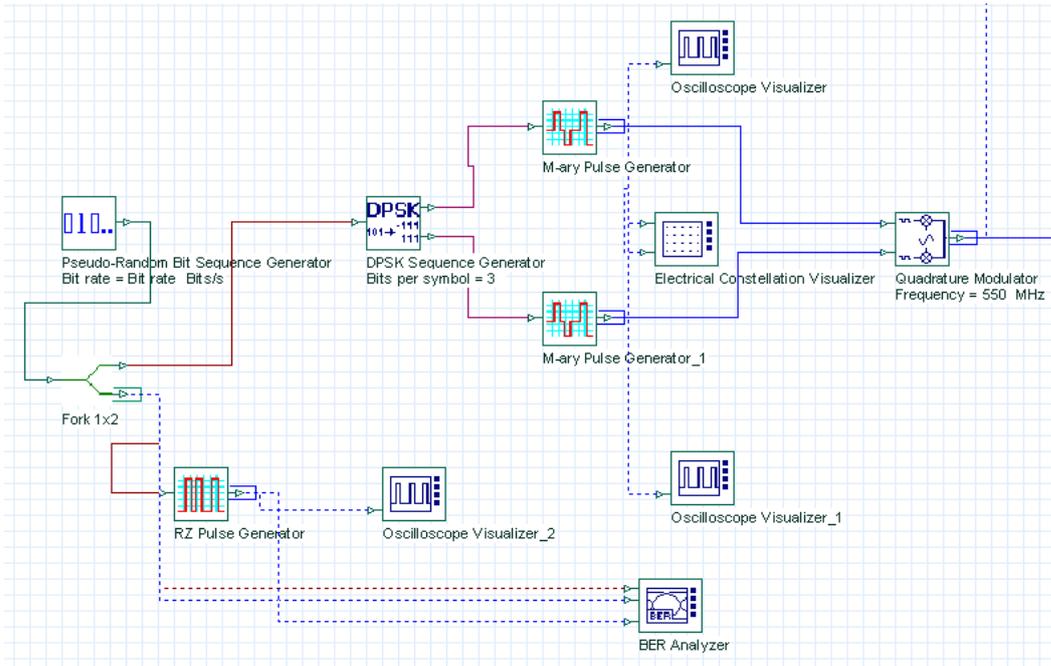


Figure 11 - Tx QPSK.

No módulo receptor o sinal é demultiplexado e o decoder DPSK faz a unificação dos dois conjuntos de bits em um sinal único.

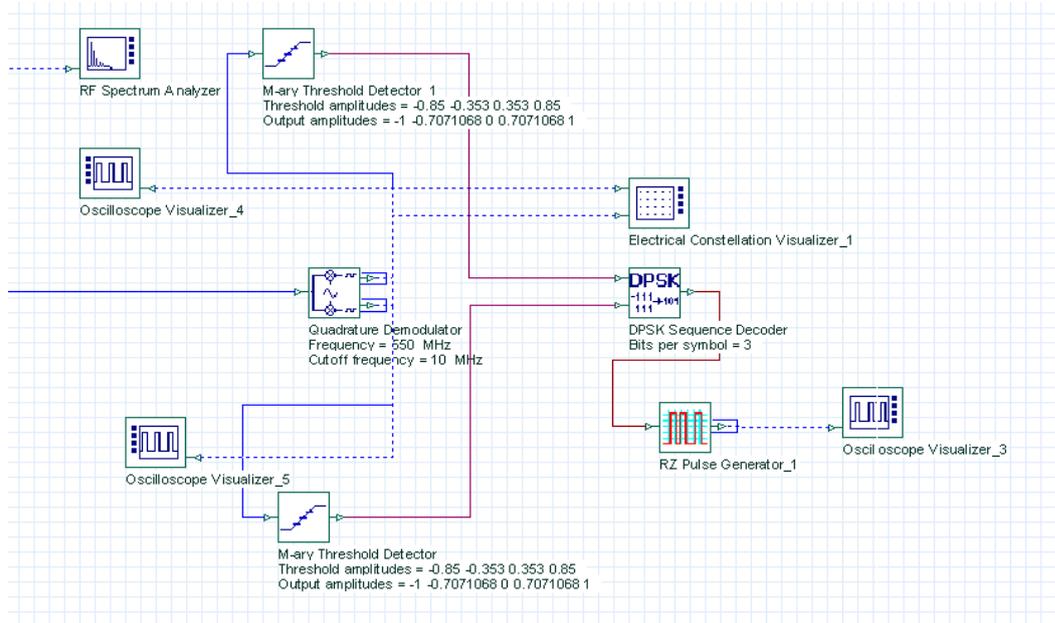


Figure 12 - Rx DPSK.

Na figura 13 pode ser visto o diagrama em constelação obtido do sinal DPSK. Como o gerador de sequência DPSK foi configurado para 3 bits por símbolo, o número de possíveis símbolos é 8.

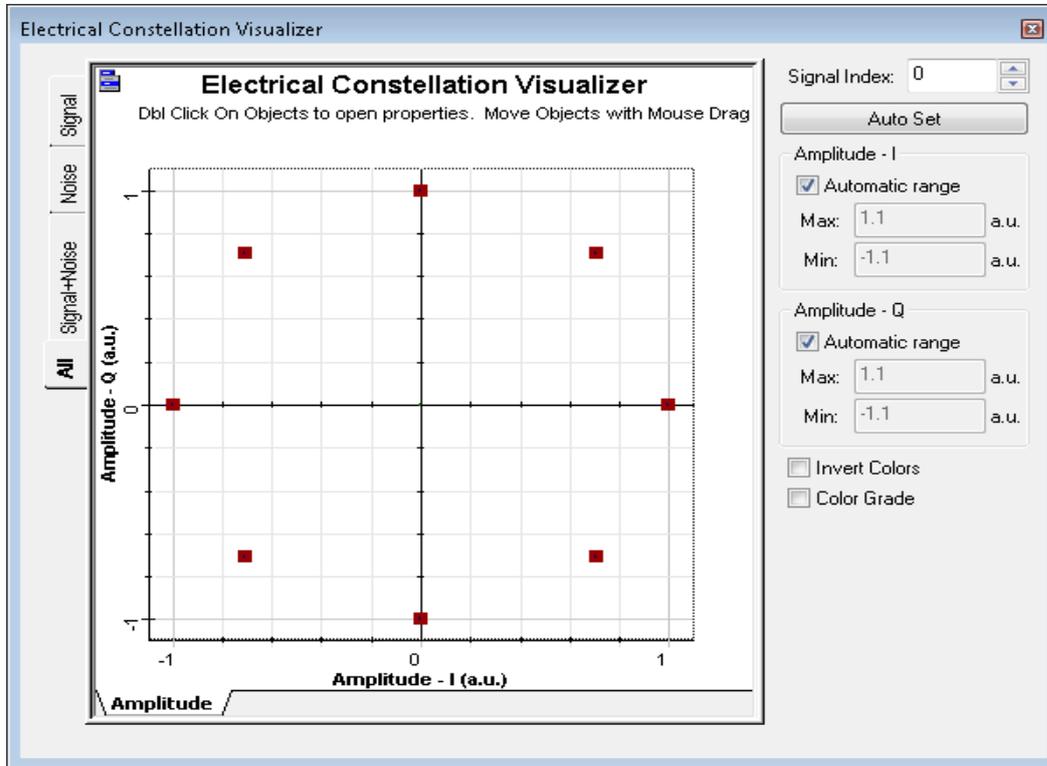


Figure 13 - Diagrama de Constelação QPSK.

QAM

QAM é um esquema de modulação que atende aos dois tipos de sinais, analógico e digital. O QAM faz a conversão de dois sinais analógicos ou dois trens de bits digitais fazendo mudanças na amplitude do sinal de duas portadoras, onde são utilizados o AM ou ASK, respectivamente. As duas portadoras senoidais, são defasadas de 90° e, portanto, o processo é chamado de quadratura. As duas portadoras são somadas e o sinal resultante é uma combinação dos dois formatos de modulação, ASK e PSK, no caso digital e AM e PM para o analógico.⁸

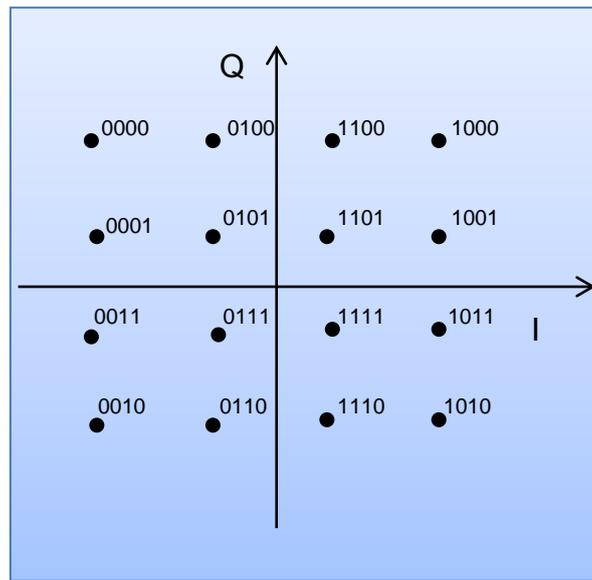


Figure 14 - Diagrama de Constelação 16QAM.

O formato de modulação QAM mais encontrado é o 16QAM, cujo diagrama de constelação pode ser visto na figura acima. Essa preferência pode ser justificada após uma breve verificação do 2QAM e do 4QAM, onde se verifica que são muito similares ao BPSK e ao QPSK, respectivamente. Além disso, a qualidade da taxa de erros do 8QAM é bem próxima ao 16QAM.

Outro projeto no Optiwave foi montado para simular o 64QAM. Nas figuras a seguir é possível ver a parte do transmissor e do receptor respectivamente. Assim como no exemplo do DPSK, o objetivo da simulação foi apenas de demonstrar o formato e as interligações dos módulos e identificar as alterações ocorridas com o sinal a ser transmitido.

A figura 15 mostra o diagrama de constelação para a modulação 64QAM, obtido com o gerador de sequência de bits configurado para 6 bits por símbolo.

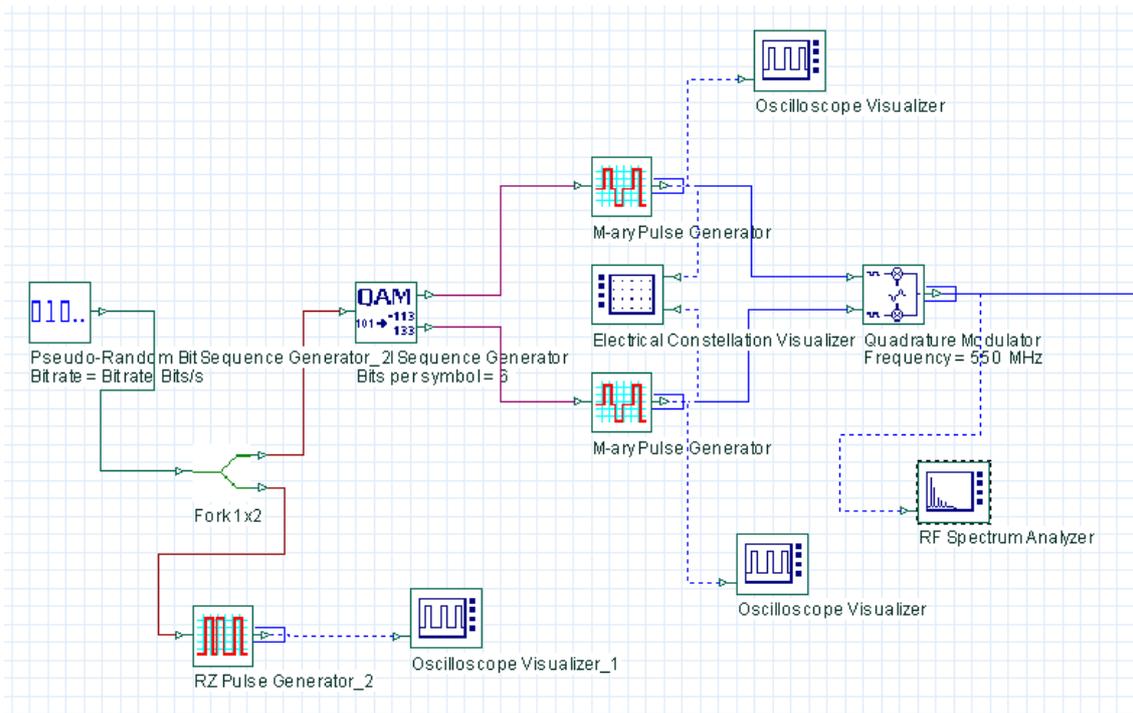


Figure 15 – Tx 64QAM.

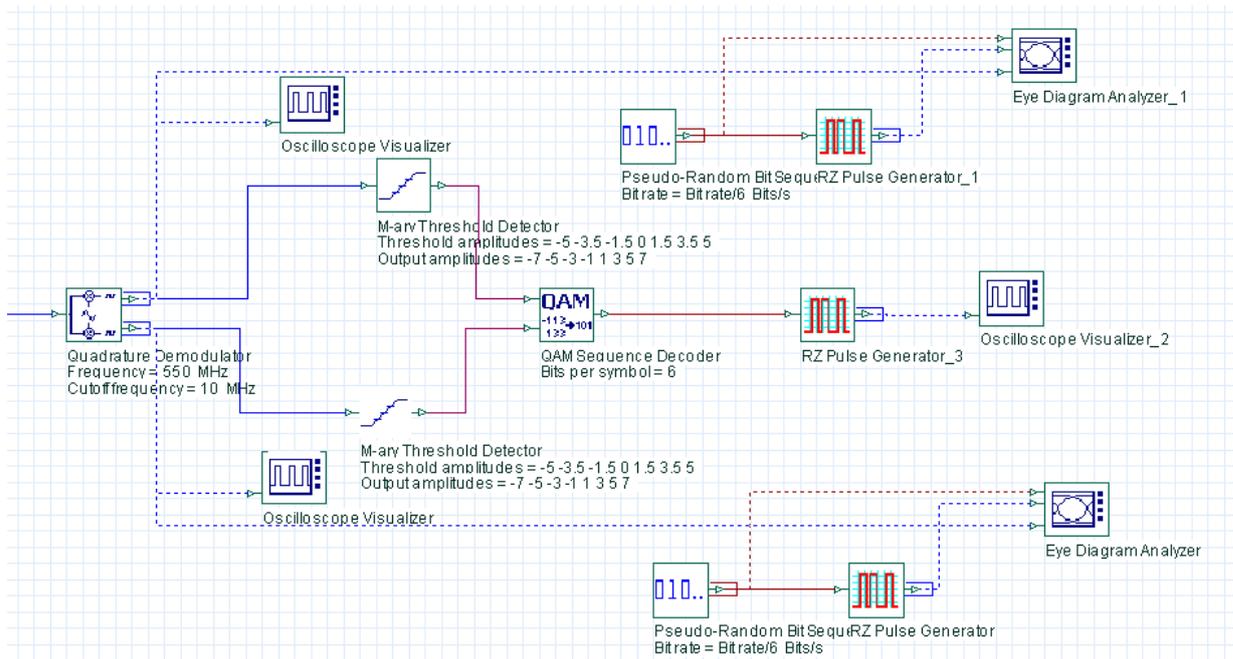


Figure 16 - Rx 64QAM.

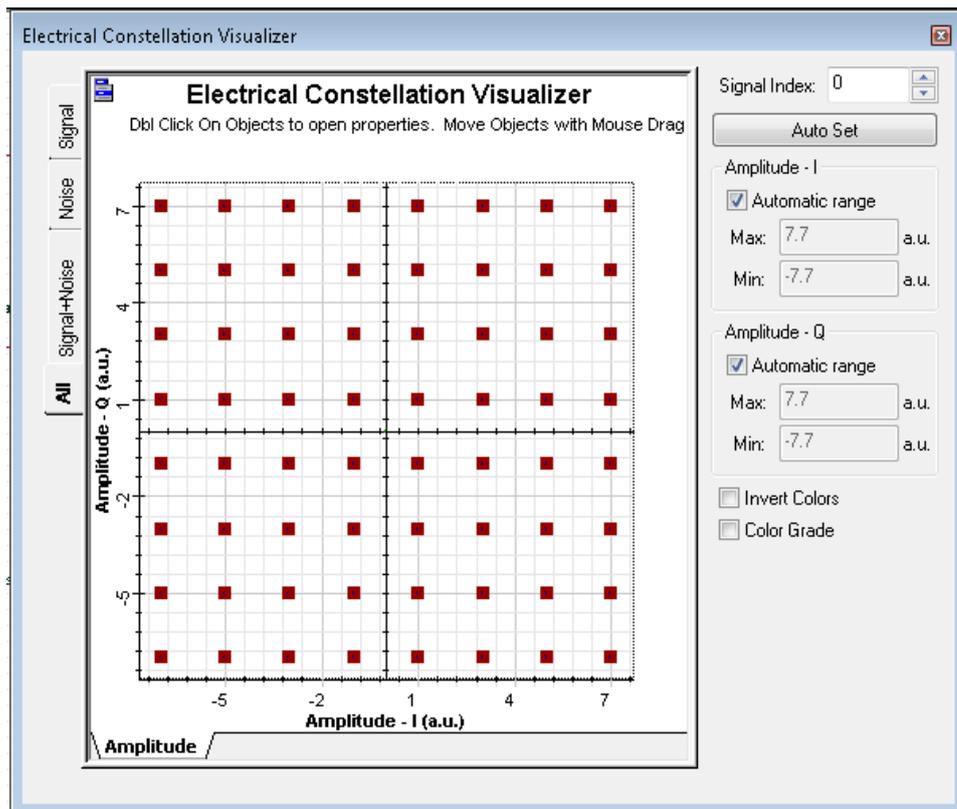


Figure 17 - Diagrama de Constelação 64QAM.

2.2

Sistemas Coerentes

Os sistemas coerentes baseiam-se em modulações em frequência ou em fase da portadora e visam uma melhora na sensibilidade do receptor. Na recepção desses sistemas podem ser utilizadas duas técnicas de detecção coerente: homódina ou heteródina.⁴

O ruído térmico é o ruído gerado pela agitação térmica de cargas no interior de um condutor elétrico em equilíbrio e o ruído de disparo consiste em flutuações de corrente adicionais que ocorrem quando uma corrente percorre um dispositivo eletrônico. Embora o ruído de disparo seja o limite fundamental, na prática, é o ruído térmico que limita um fotodetector. O uso de APDs (*Avalanche Photodiode*) ajuda na redução do impacto do ruído térmico até certo ponto, mas também aumenta o ruído de disparo. A maior vantagem na utilização da detecção coerente é que ela permite que o receptor seja limitado apenas pelo ruído de disparo.

A ideia central do sistema coerente é prover ganho ao sinal da portadora ao misturá-lo com o sinal de outra fonte de luz, de um laser oscilador local. No receptor o ruído dominante passa a ser o ruído de disparo devido ao oscilador local, permitindo que seja atingido o limite de sensibilidade do ruído de disparo.⁹

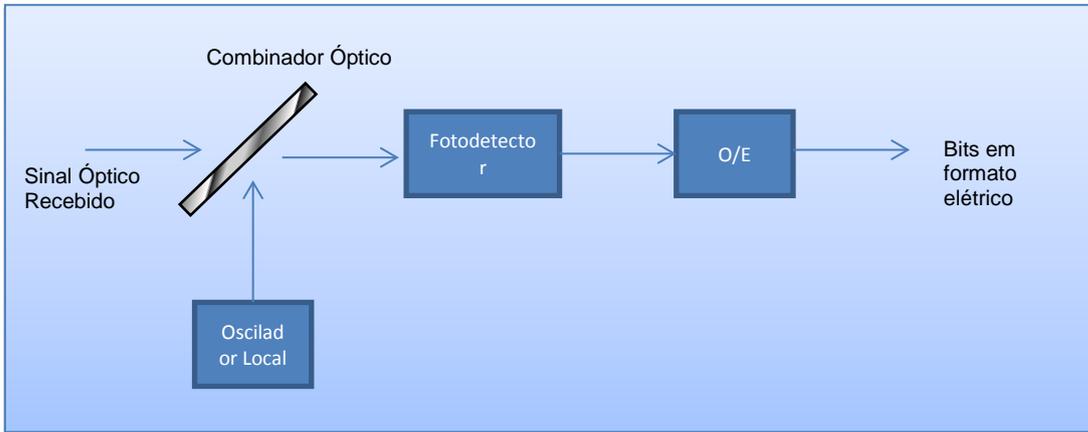


Figure 18 - Receptor Coerente.

A equação do sinal óptico recebido é:

$$\vec{E}(t) = A_s(t) \exp[-i(\omega_0 t + \varphi(t))] \vec{e} \quad (1)$$

E na equação abaixo vemos a equação do sinal do oscilador local.

$$\vec{E}_{LO}(t) = A_{LO}(t) \exp[-i(\omega_{LO} t + \varphi_{LO}(t))] \vec{e} \quad (2)$$

Após a junção dos dois sinais, o fotodetector irá receber a potência óptica dada por $P = |E_s + E_{LO}|^2$, e portanto:

$$P(t) = P_s + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}} \cos(\omega_{IF} t + \varphi_s - \varphi_{LO}), \quad (3)$$

$$P_s = A_s^2, \quad P_{LO} = A_{LO}^2, \quad \omega_{IF} = \omega_{IF} = \omega_0 - \omega_{LO} \quad (4)$$

Detecção Homódina

Na detecção Homódina a frequência angular do oscilador local é igual à frequência angular do sinal recebido, $\omega_0 = \omega_{LO}$.

O sinal recebido pelo receptor homódino é então:

$$I = R_d P \quad (5)$$

$$I(t) = R_d (P_s + P_{LO}) + 2R_d \sqrt{P_s(t) P_{LO}} \cos(\varphi_s - \varphi_{LO}) \quad (6)$$

Da equação 6, um circuito de decisão filtra apenas a segunda parte da equação (que contém o sinal $P_s(t)$). E a fase do oscilador é forçada a coincidir com a fase do sinal, portanto,

$$I_p(t) = 2R_d\sqrt{P_s(t)P_{LO}} \quad (7)$$

A equação do sinal recebido por detecção direta é

$$I_{dd}(t) = R_dP_s(t)$$

(8)

E comparando as duas equações, 7 e 8, pode-se notar que o sinal do receptor homódino tem um ganho de $\frac{4P_{LO}}{\bar{P}_s}$, sendo \bar{P}_s a média da potência $P_s(t)$.

Detecção Heteródina

Na detecção heteródina a frequência angular do oscilador é seleccionada de tal forma que a frequência intermediária fique na banda de Microondas ($f_{IF} \sim 1GHz$). A corrente no fotodetector será então:

$$I(t) = R_d(P_s + P_{LO}) + 2R_d\sqrt{P_s(t)P_{LO}}\cos(\omega_{IF} + \varphi_s - \varphi_{LO})$$

E após aplicação do filtro,

$$I(t) = 2R_d\sqrt{P_s(t)P_{LO}}\cos(\omega_{IF} + \varphi_s - \varphi_{LO})$$

Uma grande vantagem dos sistemas coerentes, homódino e heteródino é que o sinal recebido pelo detector mantém a fase e a frequência, portanto, permite a aplicação de modulação de fase e frequência nos sinais transmitidos.

2.3

PDM

O PDM (*Polarization-Division Multiplexing*) é mais uma técnica herdada pelos sistemas ópticos dos sistemas Rádio. Esse tipo de modulação, utilizado em VHF, está sendo introduzido em sistemas ópticos, em conjunto com outros, como as variantes do PSK e FSK, e QAM, para compor os novos enlaces de 100 Gbps.

PDM é a multiplexação em polarização do sinal da portadora, dividindo o sinal original, e enviando uma parte em polarização (horizontal) e outra parte do sinal é enviada em outra polarização, ortogonal (vertical).

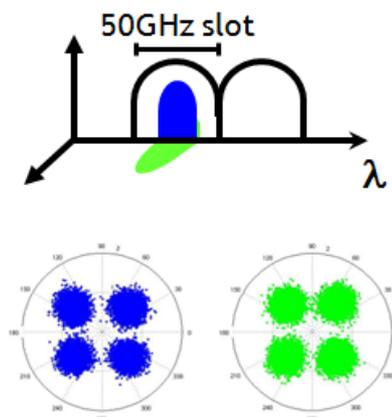


Figure 19 - PDM-QPSK.

Em [10] e [11] pode ser verificado que os grandes fabricantes de equipamento de transmissão óptica estão utilizando o PDM para atingir a taxa de 100 Gbps atualmente.

2.4

Amplificadores

A potência dos lasers não é suficientemente forte para enviar sinais através da fibra por muitas dezenas de quilômetros, a atenuação da fibra faz com que essa potência seja diminuída, 0,2 dB/km nas fibras atuais¹. Então, quando é necessário fazer o envio de sinais por enlaces muito longos, na ordem de centenas de quilômetros é necessário fazer a amplificação do sinal. Os amplificadores ópticos são dispositivos que reforçam a intensidade do sinal de forma totalmente óptica, sem que seja necessário fazer conversão para a forma elétrica. Com isso, o sinal óptico tem uma sobrevida e consegue atingir distâncias maiores nos enlaces. Entretanto, esse ganho realizado pelo amplificador não é isento de penalidades, pois, no processo de amplificação, além do sinal original também é amplificado o ruído. O sinal após passar por uma série de amplificadores pode conter um nível muito grande ruído e sofrer o efeito de outras penalidades como a dispersão e os efeitos não lineares, sendo então, necessária a regeneração do sinal.

Regeneradores de sinal realizam conversão do tipo O-E-O (óptico-elétrico-óptico) para recuperar o sinal. Os regeneradores fazem três níveis de recuperação do sinal e são assim chamados 3R: amplificação, re-formatação, re-temporização.

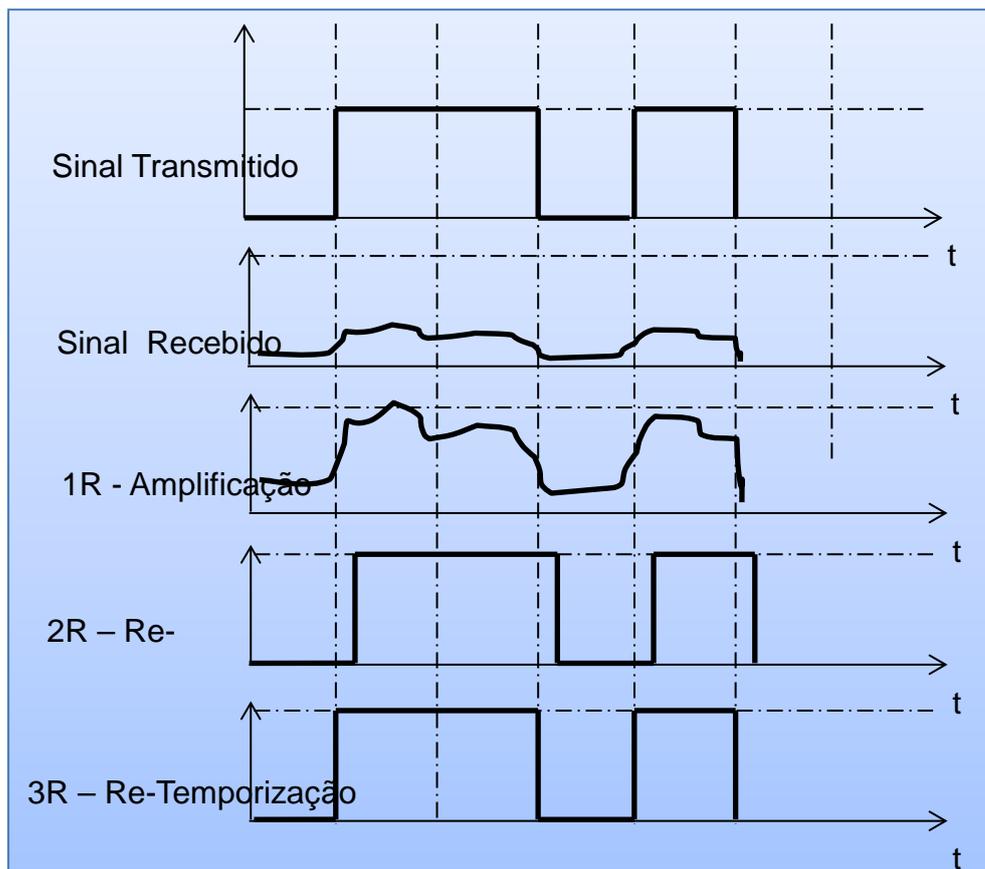


Figure 20 - Regeneração 3R.

Com a utilização de amplificadores ópticos diminuiu a necessidade de se projetar regeneradores 3R e 2R entre os enlaces, diminuindo o custo de implementação de novos enlaces. Entretanto essa função regenerativa 3R continua a ser empregada agora apenas nos nós terminais.

Os dois tipos de amplificação mais comuns nas redes de alta velocidade atuais são o EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*) e o RAMAN, que serão descritos a seguir.

EDFA¹⁹

Os amplificadores EDFA são do tipo amplificadores por fibra dopada. Um segmento de fibra, dopada durante sua fabricação, com elementos raros como Erbium, é utilizada no processo de amplificação. Esse tipo de amplificação requer um laser de bombeamento (normalmente entre 980 nm e 1480 nm), que irá

fornecer energia e excitar os íons de Erbium formando fótons. Na interação do sinal a ser amplificado com os fótons do Erbium ocorre uma transferência de energia e por consequência uma amplificação do sinal óptico.

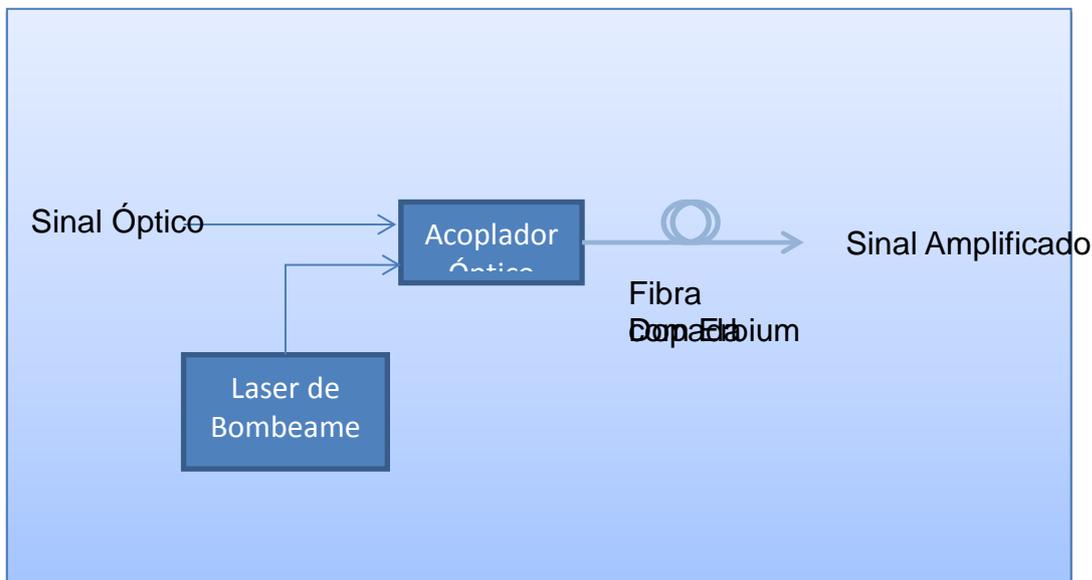


Figure 21 – Amplificador EDFA.

Esse tipo de amplificação é realizado no sentido de transmissão do sinal óptico. A banda de frequências que são amplificadas pelo EDFA está em torno de $1,5 \mu\text{m}$.

RAMAN^{19 11}

O efeito de espalhamento do tipo Raman é não linear e é atribuído à constituição da própria fibra. Os fótons do sinal óptico ao passarem através da fibra podem sofrer um desvio de seu caminho ao colidir com moléculas de materiais constituintes da fibra, por isso, recebendo o nome de espalhamento. Esse efeito foi descoberto por dois físicos indianos C. V. Raman e K. S. Krishina, sendo então atribuído o nome de um de seus descobridores.

Mas o efeito de espalhamento Raman pode e é utilizado de forma a amplificar o sinal óptico. Nos amplificadores do tipo Raman esse espalhamento é estimulado, colocando-se uma fonte de laser de alta potência que além de causar um espalhamento de sinal, também excita as moléculas com as quais colide, aumentando a probabilidade de surgimento de fótons que estarão no comprimento de onda do sinal a ser amplificado.

Diferentemente do amplificador EDFA, o amplificador Raman não utiliza fibras dopadas. O amplificador utiliza a própria fibra de transmissão para fazer o efeito de espalhamento. Esse tipo de método pode ser empregado em todas as fibras atualmente em utilização comercial, entretanto alguns requerimentos quanto às condições de funcionamento devem ser atendidos, por exemplo, há que se respeitar uma distância mínima entre o laser de bombeio e os pontos de emenda de fibra.

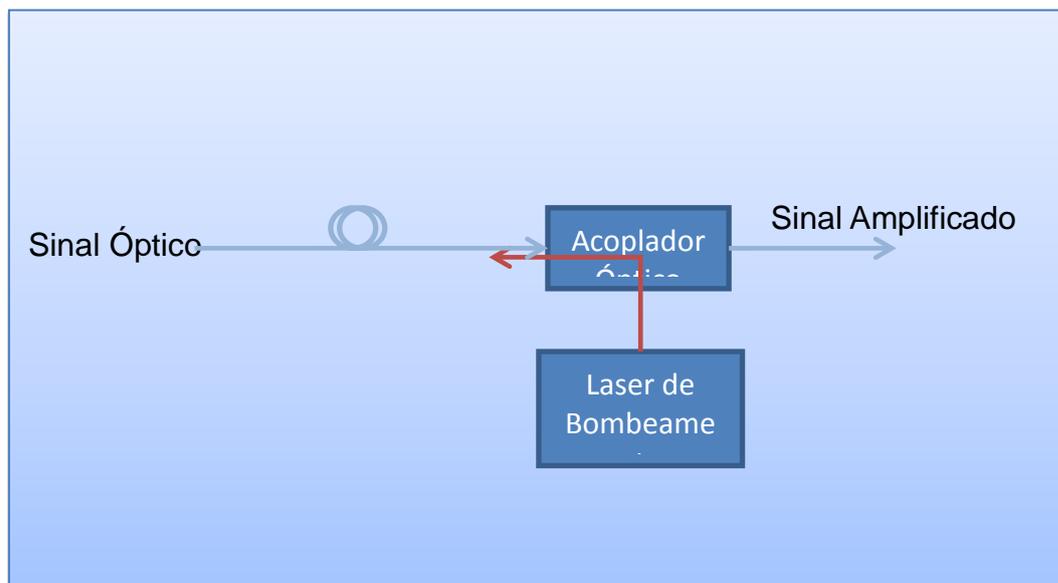


Figure 22 - Amplificador Raman.

Nos sistemas de comunicações ópticas os dois tipos de amplificação, EDFA e Raman são amplamente utilizados e em muitos casos fazendo parte de um mesmo sistema de amplificação.⁶

2.5 FEC

O FEC (*Forward Error Correction*) é um método de processamento digital de análise dos quadros ou datagramas transmitidos sobre um canal de transmissão e sua possível correção em caso de erros detectados, atribuindo maior confiabilidade aos dados transmitidos.

Nas redes SDH/SONET existem áreas do quadro destinadas ao controle da qualidade do quadro transmitido. Um algoritmo gera um código a partir do quadro a ser transmitido, esse valor é então inserido no quadro seguinte. Quando o nó

remoto recebe os dois quadros ele executa o mesmo algoritmo e verifica que se há paridade com o valor enviado no segundo quadro, caso os valores sejam diferentes há uma indicação de erro. Dessa forma, há apenas uma detecção de erros, mas não há qualquer ação de correção desses valores errados a não ser a retransmissão da informação. Nos protocolos SDH/SONET não se emprega a retransmissão, sendo necessário ser feito o reenvio de pacotes ou datagramas por protocolos de camadas superiores.

Foram desenvolvidos diferentes tipos de códigos de correção de, dentre os quais os mais utilizados são o CRC (*Cyclic Redundancy Check*), Hamming, Reed-Solomon (RS), *convolutional*, *product* e *turbo codes*. Entre esses, o código Reed-Solomon tem atraído mais a atenção para aplicação aos sistemas ópticos. Outras formas de se aumentar o ganho provido pelo código como a aplicação de LDPC (*Low Density Parity Check*) estão em desenvolvimento.³

O código Reed-Solomon é escrito da forma $RS(n, k)$, onde k é o tamanho do pacote de bits que é convertido através do código em um pacote maior de n bits. O valor de n bits é escolhido de tal forma que $n=2^m-1$, onde m é um valor inteiro. O RS recomendado pela ITU para aplicações ópticas submarinas usa $m=8$, portanto, $RS(255,239)$. O cabeçalho FEC para esse código é de apenas 6,7%. Outros códigos RS podem usar um cabeçalho maior, por exemplo, o código $RS(255,207)$ tem um cabeçalho de 23,2%, isso torna o controle de correção mais robusto. A escolha do código depende do nível de melhora do BER que o sistema requer.¹

2.6

Aumentando a Capacidade da Rede⁷

Para garantir o crescimento de tráfego, as redes ópticas estão evoluindo atualmente para as taxas de canais de 100 Gbps com o objetivo de manter níveis de qualidade similares aos canais de 10 Gbps. Enquanto o design de canais 10 Gbps é relativamente simples utilizando OOK com detecção direta e FEC Reed-Solomon padrão. Os canais de 100 Gbps utilizam modulação de fase em quadratura, multiplexação em polarização, detecção coerente, DSP (*Digital Signal Processing*) para recuperação de sinal e FEC de alta performance. Com esses avanços tecnológicos, sistemas operando com canais de 100 Gbps com formato de

modulação PM-QPSK estão habilitados a suportar até 10Tbps com a mesma infraestrutura de fibras utilizadas para os canais 10 Gbps. Cada canal de 100 Gbps utiliza 40 GHz do espectro tornando compatível com o padrão de canalização de 50 GHz.⁷

Um canal de 100 Gbps normalmente contém dados, cabeçalho do protocolo e cabeçalho de FEC. O tamanho do cabeçalho de FEC pode variar de 7 a 20 por cento do total do canal, e é sempre incluído no cálculo da taxa do canal, entretanto, esse valor tem se tornado significativo nesse cálculo. Com FEC mais largos, com 20 a 30 por cento do canal, há que se fazer distinção da taxa real de dados trafegados. Por exemplo, a taxa bruta de transmissão de um canal OTU4 é de 111,81 Gbps e a taxa de informação é de 104,79 Gbps, no qual o FEC tem um cabeçalho de 7 por cento (Reed Solomon FEC). Com a utilização de um FEC com cabeçalho de 20 por cento (Soft Decision FEC), a taxa bruta passa para 125 Gbps.

2.7

Simulação de enlace DP-QPSK 100 Gbps Coerente

O software Optiwave foi utilizado para realizar uma simulação de enlace óptico de 100 Gbps utilizando DP-QPSK como formato de modulação. Na figura 23 pode-se ver o sistema montado, composto pelo transmissor DP-QPSK, o enlace de fibra e amplificadores, um receptor DP-QPSK coerente e pela seção de detecção e decodificação.

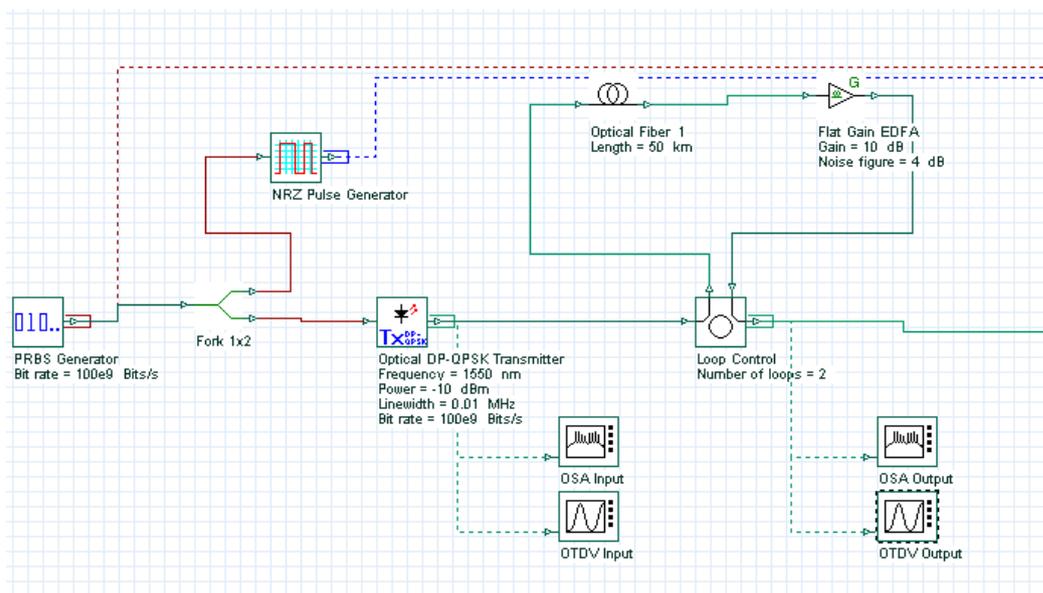


Figure 23 - Tx DP-QPSK 100G.

Na figura 24, o sinal é gerado pelo transmissor óptico DP-QPSK, propagado através do loop de fibra e amplificação, no total de 100 km.

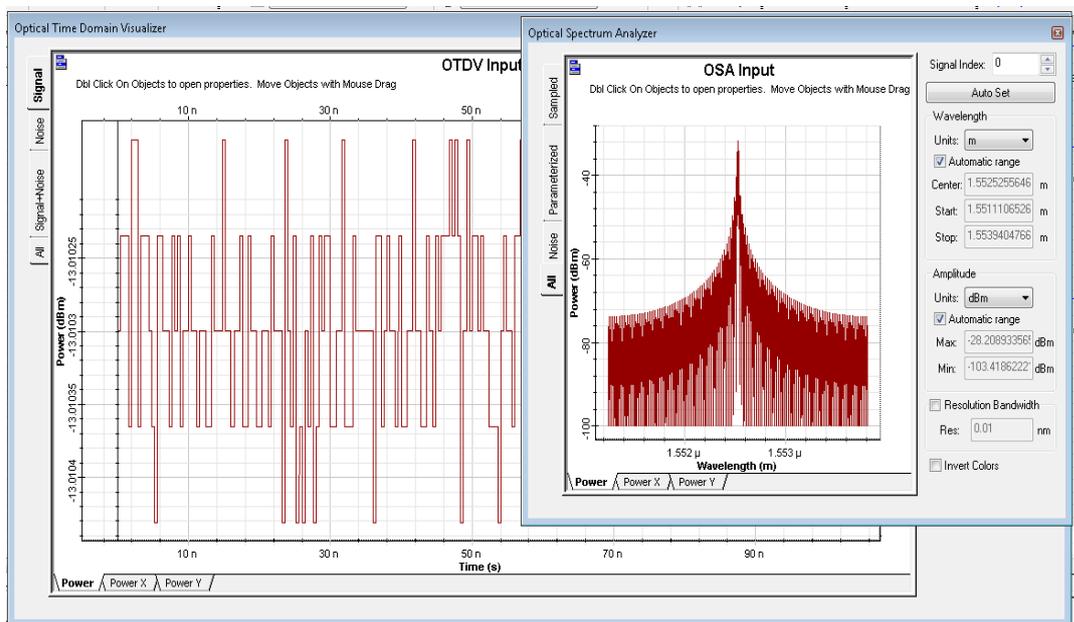


Figure 24 - Visualização do OSA de do OTDV.

A figura 25 mostra o esquema de recepção. O sinal é então recebido pelo receptor coerente e enviado para a seção de detecção e decodificação.

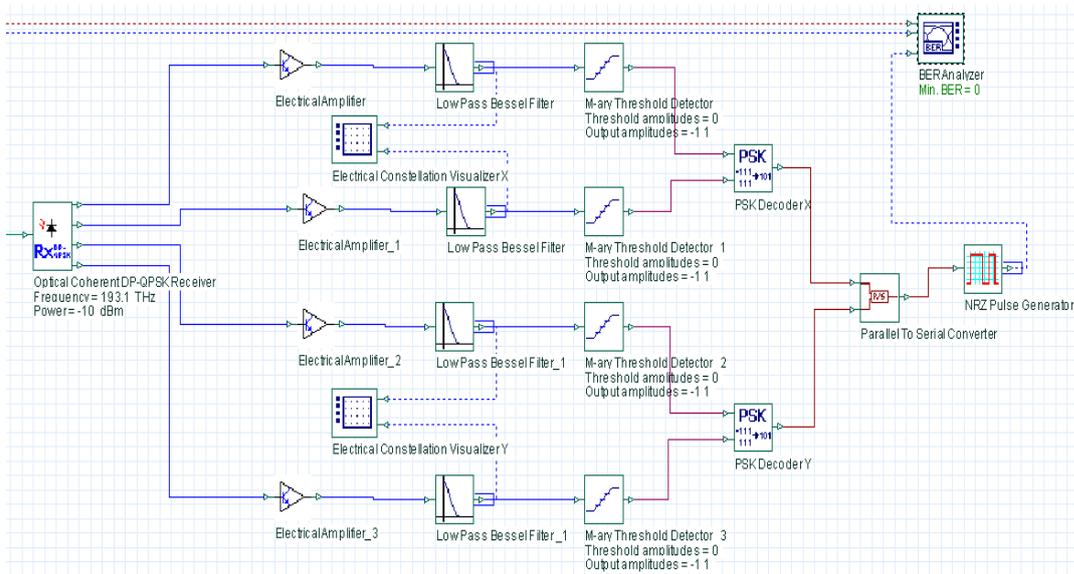


Figure 25 - Rx PD-QPSK 100G.

Na figura 26, são exibidos os diagramas de constelação para as polarizações X e Y, antes de serem decodificadas.

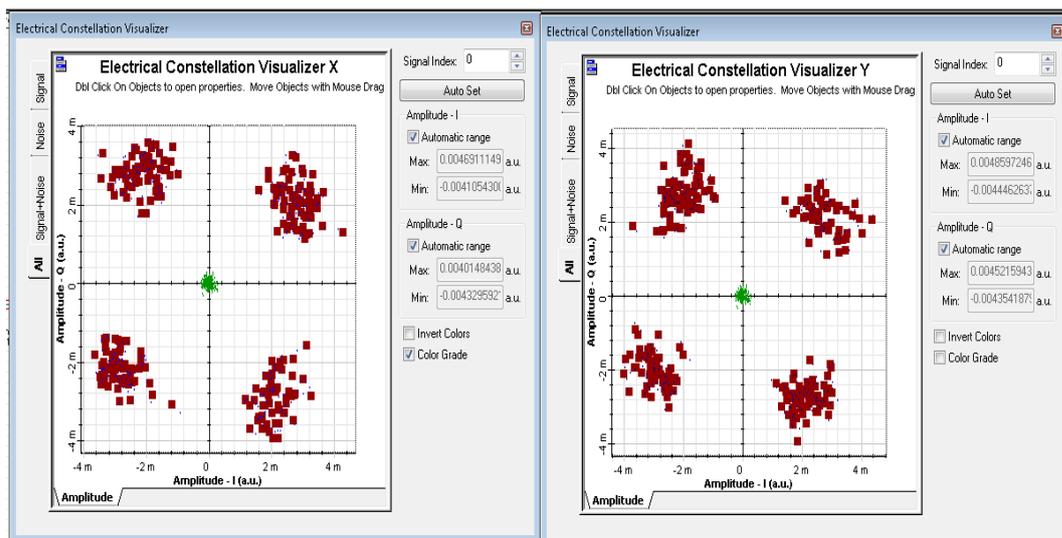


Figure 26 - Diagrama de Constelação DP-QPSK.

2.8

Exemplo de sistema 100G Alcatel-Lucent

A Alcatel-Lucent, fez pesquisas e testes com diversos métodos de modulação, e conforme a tabela abaixo realizou também apresentações desses testes em congressos conferências. Por fim, a combinação das duas modulações PDM-QPSK com Detecção Coerente foi escolhida para ser utilizada.

When	Experiment	Reach	Author
ECOC 2005	107-Gb/s binary ETDM Tx & OTDM Rx	—	Lucent Bell Labs
OFC 2006	10x107-Gb/s NRZ transmission (0.7 b/s/Hz)	400 km	Lucent Bell Labs
ECOC 2006	100-Gb/s binary OOK ETDM Tx and ETDM Rx	—	Alcatel R&I
	10x107-Gb/s RZ-DQPSK transmission (0.7 b/s/Hz)	2.000 km	Lucent Bell Labs
OFC 2007	10x107-Gb/s NRZ-DQPSK transmission (1.0 b/s/Hz)	1,200 km	Alcatel-Lucent Bell Labs
	10x107-Gb/s NRZ transmission (0.5 b/s/Hz)	480 km	Alcatel-Lucent R&I
	107-Gb/s O/E Rx (photodetector & electrical demux)	—	Alcatel-Lucent Bell Labs
ECOC 2007	8x107-Gb/s NRZ-VSB transmission (1.0 b/s/Hz)	480 km	Alcatel-Lucent R&I
OFC 2008	164x100-Gb/s PDM-QPSK transmission (2.0 b/s/Hz)	2.550 km	Alcatel-Lucent Bell Labs
ECOC 2008	10x112Gb/s PDM-16QAM (4.0 b/s/Hz)	315 km	Alcatel-Lucent Bell Labs
OFC 2009	72x112Gb/s PDM-QPSK transmission (2.0 b/s/Hz)	7.040 km	Alcatel-Lucent Bell Labs
	10x112-Gb/s PDM-16QAM transmission (6.2 b/s/Hz)	630 km	Alcatel-Lucent Bell Labs
	1.2-Tb/s continuous waveband PDM-OFDM-FDM (3.3 b/s/Hz)	400 km	Alcatel-Lucent Bell Labs
ECOC 2009	155x112Gb/s PDM-QPSK transmission (2.0 b/s/Hz)	7.200 km	Alcatel-Lucent Bell Labs
	1.2-Tb/s continuous waveband PDM-OFDM-FDM (3.7 b/s/Hz)	7.200 km	Alcatel-Lucent Bell Labs

Figure 27 - Testes de modulação.

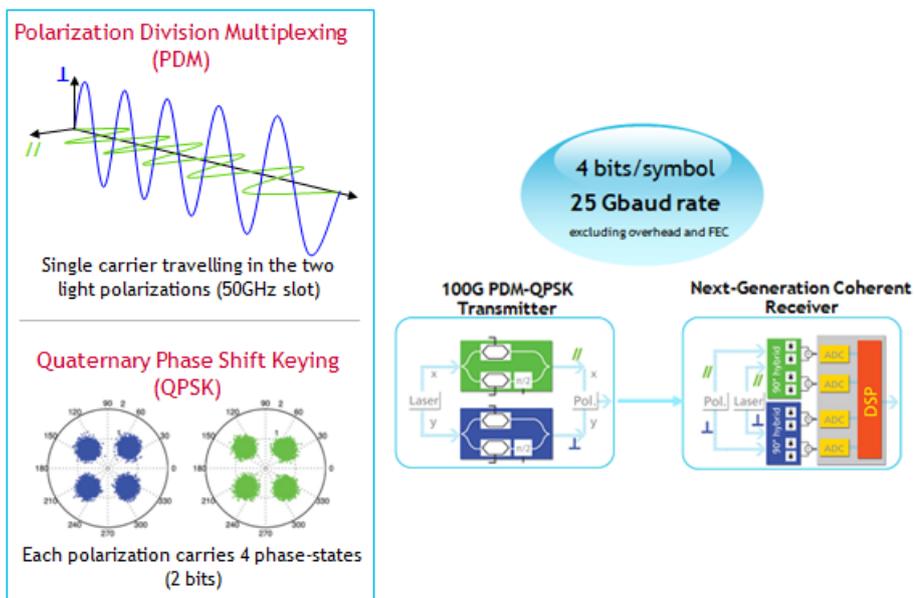


Figure 28 - PDM-QPSK e Detecção Coerente.

2.8.1

Descrição de Equipamentos

A Alcatel-Lucent, desenvolveu interfaces de 40 Gbps e 100 Gbps para vários tipos de seus equipamentos ópticos.

Nas figuras 29 e 30 são mostrados o 1626LM e o 1830 PSS32, que são equipamentos que fazem transmissão em DWDM e possuem interfaces clientes de 40 GbEth e 100 GbEth e *transponders* de 40 Gbps e 100 Gbps.

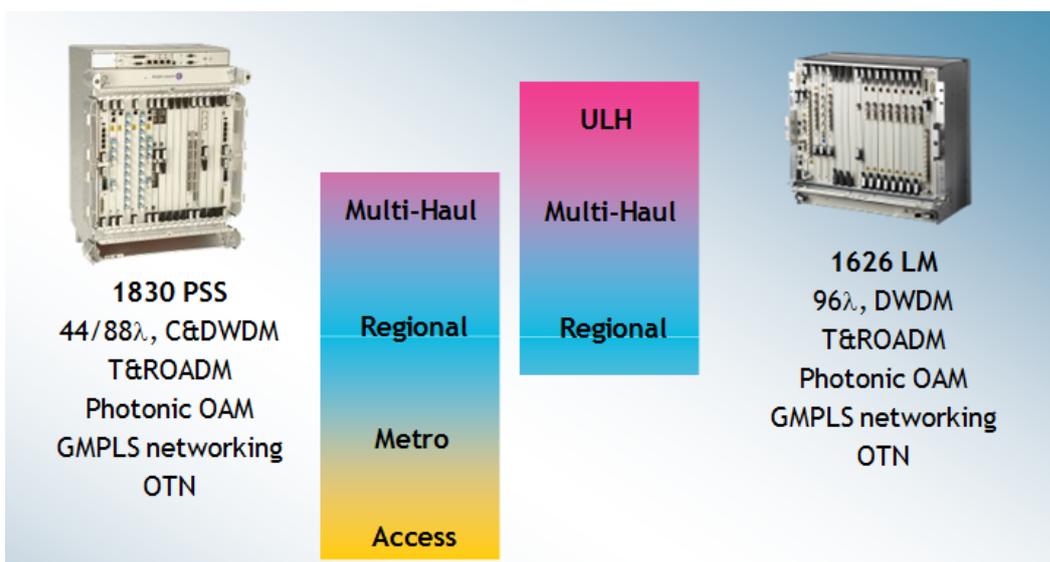


Figure 29 - Equipamentos 1830 PSS32 e 1626LM.



Figure 30 - 1830 PSS64.

O 1626LM pode transmitir até 96 canais de 40 Gbps simultâneos, enquanto o 1830 PSS32 pode transmitir 44 ou 88 canais de até 100 Gbps dependendo do tipo de espaçamento entre canais que será utilizado, 100 GHz ou 50 GHz.

2.8.2

Descrição de Aplicação na Rede

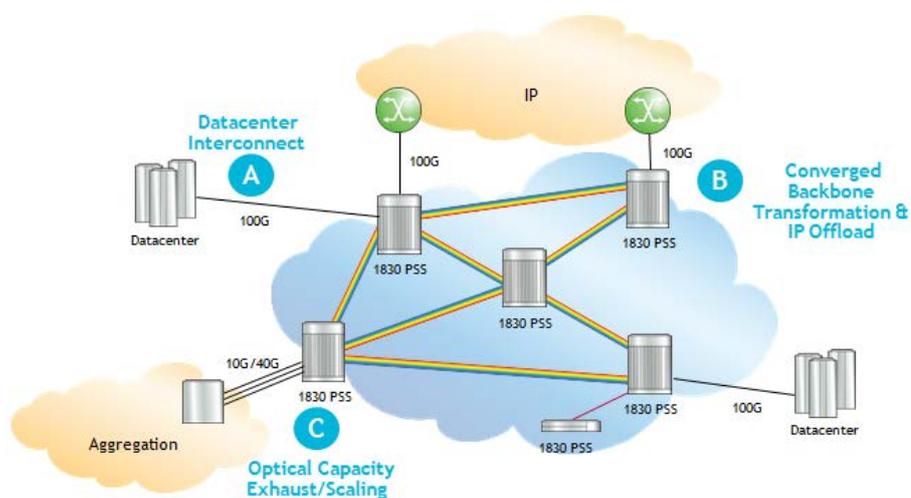


Figure 31 - Aplicação na Rede.

Os equipamentos 1626LM e o 1830PSS32 são empregados, mais frequentemente, na construção das redes *Backbone* das operadoras de telecomunicações. E fazem a transmissão de sinal por grandes distâncias, normalmente entre cidades de diferentes estados. Interligam equipamentos de grande porte de processamento e troca de dados, roteadores, centrais telefônicas e também integração de diferentes locais contradores de informação. Fazem também a interligação de equipamentos 1830 PSS64, que são grandes concentradores de tráfego, esses por sua vez dão a resiliência necessária à rede DWDM ao utilizar proteção com OTN e GMPLS.

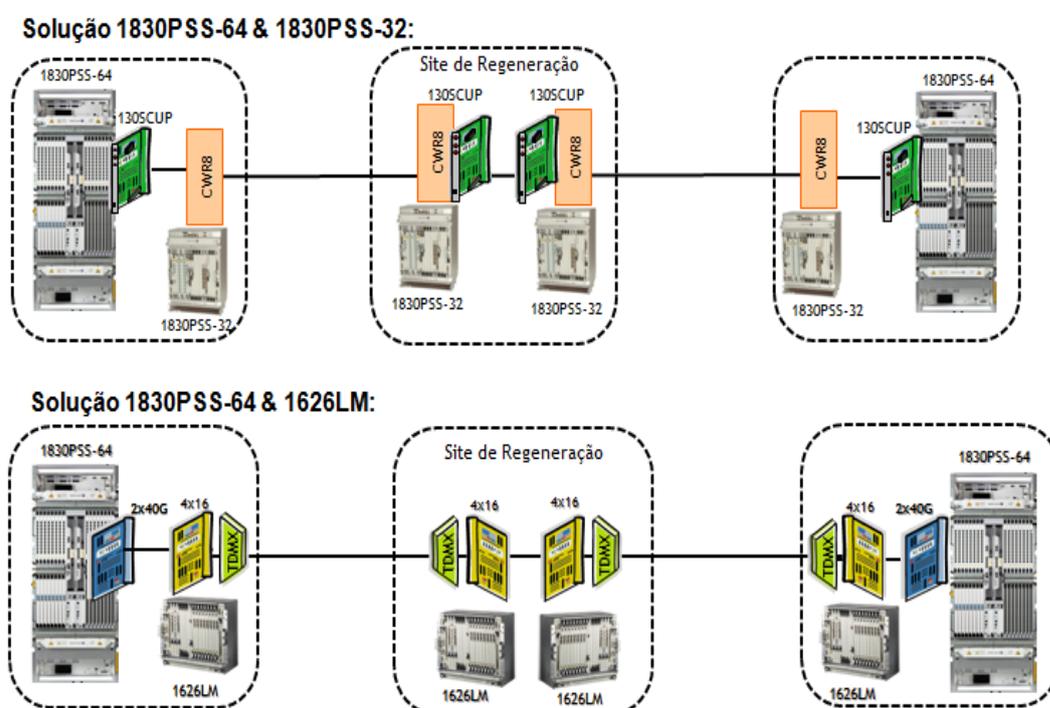


Figure 32 - Soluções de transmissão.

Na figura 32 são mostrados dois exemplos de como a Alcatel-Lucent implementa seus equipamentos como soluções de transmissão DWDM. No primeiro sistema é apresentado um enlace de 100 Gbps entre dois equipamentos 1830 PSS64 através de uma rede de equipamentos 1830 PSS32. Este sistema é totalmente gerenciável por um sistema de supervisão da própria Alcatel-Lucent, no qual é possível criar, modificar e apagar enlaces, elementos e dispositivos além de monitorar alarmes e desempenho. No segundo sistema o enlace é de 40 Gbps e o encaminhamento óptico é realizado pela rede de equipamentos 1626LM.

E a figura 33 mostra um exemplo de sistema 100 Gbps fim-a-fim, entre dois roteadores 7750R da Alcatel-Lucent. Utilizando módulos 100 GbE para se comunicar com esses roteadores clientes. Esses módulos são para transmissão a curta distância, tendo como alcance de 100m a 10 km.

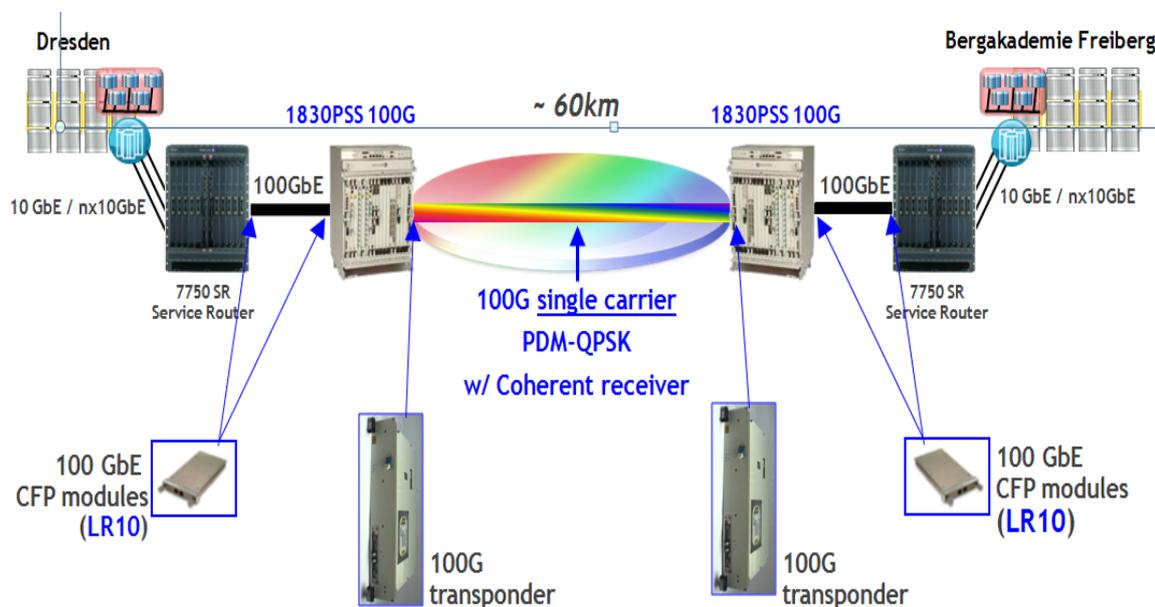


Figure 33 - Interligação fim-a-fim.

Exemplos de placas desenvolvidas para atender às taxas de 100 Gbps e 40 Gbps são as TRBD e 130SCUP, que seguem nas figuras 34 e 35.



Figure 34 - Unidade TRBD.

130SCUP – 1 x 100G Swtichponder

Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • OTU4 Coerente Sintonizável com acesso direto à matriz de comutação e com SDFEC
Tamanho	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupação de 2 slots
Portas Físicas	<ul style="list-style-type: none"> • OUT-4
Backplane	<ul style="list-style-type: none"> • OTH: ODU-4, ODU-3, ODU-2E, ODU-1, ODU-0 ODU-flex
Tipos de bastidor	<ul style="list-style-type: none"> • PSS-32, PSS-36, PSS-64
Desempenho	<ul style="list-style-type: none"> • Modulação PDM-NRZ-QPSK com Receptor Coerente • Tolerância 120ps DGD, CD tolerance 50000ps/nm



Figure 35 - 130SCUP.

3

Funcionamento dos Protocolos de Rede

3.1

Funcionamento dos Protocolos TCP/IP ^{14 15 16}

Os protocolos de comunicação responsáveis pelo tráfego de dados na Internet são divididos em camadas bem definidas. A aplicação de camadas de protocolos permite a conexão de diversos tipos de redes de maneira uniforme e integrada. Cada camada se utiliza de serviços das camadas inferiores e por sua parte provê serviços às camadas superiores.

As entidades que ocupam as camadas correspondentes em diferentes máquinas são chamadas pares. Os pares podem ser processos, dispositivos de hardware ou mesmo seres humanos. Em outras palavras, são os pares que se comunicam utilizando o protocolo.

Os dados não são transferidos diretamente da camada n de uma máquina para a camada n de outra máquina. Em vez disso, cada camada transfere os dados e as informações de controle para a camada imediatamente abaixo dela, até ser alcançada a camada mais baixa e então transmitidos pelo meio físico, como pode ser visto na figura 36.

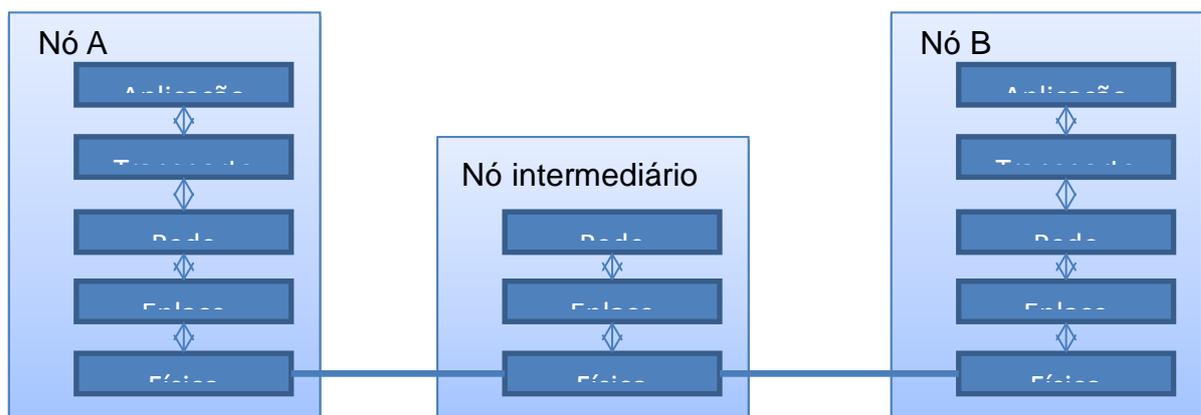


Figure 36 - Camadas TCP/IP.

O modelo TCP/IP de comunicação de dados é dividido em 5 camadas de protocolos: camada de aplicação, camada de transporte, camada de enlace e camada física.

A camada de aplicação é responsável pelo suporte das aplicações de rede. Ela inclui muitos protocolos, dentre eles o HTTP, o SMTP e o FTP. A camada de enlace tem como principais funções a delimitação de quadros e controle de erros.

Dois camadas do modelo TCP/IP, que formam o cerne do modelo, serão descritas abaixo para que seja possível a análise do comportamento de seus protocolos quando a comunicação se der por enlaces de alta velocidade.

3.1.1

Camada de Transporte

Fornece comunicação lógica entre processos da camada de aplicação de hospedeiros diferentes.

A Camada de Transporte disponibiliza dois tipos de protocolo distintos, o UDP (*User Datagram Protocol*), que provê à aplicação solicitante um serviço não confiável, não orientado para a conexão; e o TCP (*Transmission Control Protocol*), que provê à camada de aplicação um serviço confiável, orientado para conexão. Ao projetar uma aplicação de rede, o criador da aplicação deve especificar um desses dois protocolos de transporte.

O UDP e o TCP também fornecem verificação e integridade ao incluir campos de detecção de erros nos cabeçalhos de seus segmentos. Esses dois serviços mínimos de camada de transporte - entrega de dados processo a processo e verificação de erros - são os únicos que o UDP fornece. O UDP é um serviço não confiável, ele não garante que os dados enviados por um processo cheguem intactos ao processo destinatário.

O TCP, por outro lado, oferece vários serviços adicionais às aplicações. Ele provê transferência confiável de dados. Usando controle de fluxo, números de sequência, reconhecimentos e temporizadores, o protocolo assegura que os dados sejam entregues do processo remetente ao processo destinatário corretamente e em ordem. Assim o TCP converte o serviço não confiável do IP em sistemas finais em um serviço confiável de transporte de dados entre processos. Ele também provê controle de congestionamento. O controle de congestionamento

evita que qualquer outra conexão TCP abarrote os enlaces e comutadores entre hospedeiros comunicantes com uma quantidade excessiva de tráfego. Em princípio, o TCP permite que conexões trafegando por um enlace de rede congestionado compartilhem em pé de igualdade a largura de banda daquele enlace. Isso é feito pela regulação da taxa com a qual o lado remetente do TCP pode enviar tráfego para dentro da rede. O tráfego UDP, por outro lado, não é regulado. Uma aplicação que usa transporte UDP pode enviar tráfego à taxa que quiser, pelo tempo que quiser.

3.1.1.1

Controle de Congestionamento TCP ^{15 16}

Quando as aplicações enviam quantidades de pacotes maiores do que a rede pode transmitir ocorre um tipo de congestionamento de dados. O tratamento desse tipo de limitação fica a cargo do protocolo TCP, apesar de na camada de transporte ser utilizadas técnicas que reduzem esse congestionamento, a solução verdadeira para o congestionamento é diminuir a taxa de transmissão de dados.

O TCP utiliza um mecanismo de controle de congestionamento conhecido como Janela Deslizante. Em um protocolo com o reconhecimento de entrega padrão, para cada pacote que chega um reconhecimento é enviado de volta à origem, mas o TCP pode permitir que uma quantidade de pacotes seja enviada sem aguardar o seu reconhecimento para enviar o próximo pacote. Assim, temos uma Janela de pacotes que serão enviados até que se aguarde pelo reconhecimento. Essa Janela não tem tamanho fixo, na verdade, ela é dinamicamente alterada, de acordo com o congestionamento encontrado na rede. Quanto maior o congestionamento menor será o tamanho da janela e por consequência, menor o número de pacotes enviados, e dessa forma o TCP exerce um controle de quantidade de pacotes enviados à rede.

Na figura 37 pode ser visto um exemplo de Janela Deslizante.

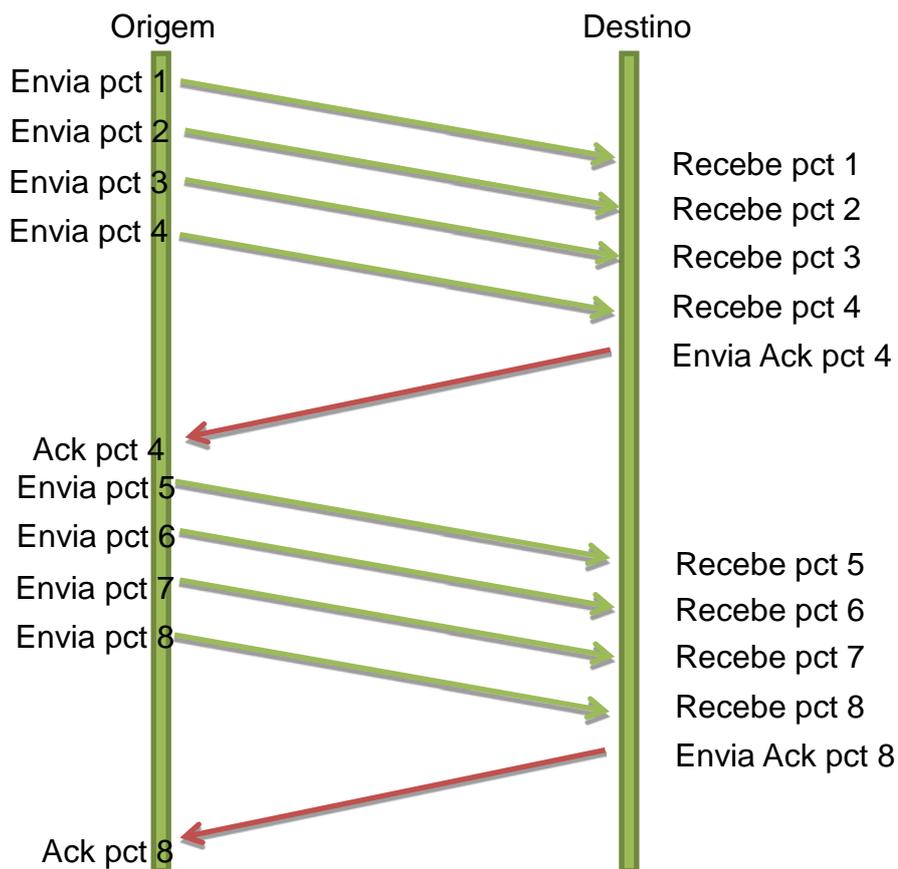


Figure 37 - Janela Deslizante TCP.

A perda de pacotes devido a erros de transmissão é mais rara nos dias de hoje, pois os enlaces de longa distância utilizam sistemas de DWDM, com FEC e possivelmente outros protocolos como OTN ou SDH que fazem a detecção desses erros. Portanto, esses enlaces podem ser considerados mais confiáveis em termos de qualidade de transmissão de dados.

Portanto, quando se trata de congestionamento em TCP, o tempo limite dos pacotes e por consequência, a sua perda tem como causador principal o congestionamento nos roteadores.¹⁵

Entretanto, há casos em que circuitos nos protocolos de transmissão, em momento de falha da rota principal, são encaminhados por uma rota alternativa, que podem ser mais longas. E nesse caso haverá um retardo muito maior na transmissão desses pacotes.

O congestionamento é medido através da análise do RTT (*Round Trip Time*), que é o tempo que um pacote leva para ir ao nó destino e para que o nó origem receba o seu reconhecimento. Existem vários métodos (temporizadores)

para se estimar um valor de tempo limite para os pacotes, todos tendo como referência o RTT. Basicamente, o RTT é expresso pela equação à seguir:

$$RTT = \alpha RTT + (1 - \alpha)M$$

Onde α é um fator de suavização que determina o peso que é dado ao antigo valor de RTT (estimado). E M é o valor de RTT medido na prática.

3.1.2

Camada de Rede

O protocolo da camada de rede na Internet é o IP (*Internet Protocol*), e provê comunicação lógica entre os diversos *hosts* da rede. O modelo de serviço do IP é um serviço de entrega de melhor esforço, o que significa que o IP faz o que estiver ao seu alcance para levar os segmentos (da camada de transporte) entre *hosts* comunicantes, mas não dá nenhum tipo de garantia de que esses segmentos serão corretamente entregues.

O IP não garante a entrega de segmentos, a entrega ordenada de segmentos e tampouco a integridade dos dados nos segmentos. Por essas razões, ele é denominado um serviço não confiável. Esse tipo de tratamento dos dados fica a cargo das camadas superiores, como o TCP, por exemplo.

A camada de rede faz a transferência de pacotes do nó origem ao nó destino, e para executar esse serviço, pode ser necessário passar os pacotes por vários nós intermediários ao longo do percurso. Portanto, é necessário conhecer a topologia da sub-rede e escolher os caminhos mais apropriados através dela. Essa escolha deve levar em consideração diversos fatores como o menor caminho, a distribuição do tráfego pelos enlaces para não sobrecarregar um enlace específico, etc. Os roteadores são utilizados para executar essa transferência de pacotes.

A camada de rede utiliza protocolos e algoritmos específicos para atualizar as tabelas de roteamento dos roteadores, assim como para calcular as rotas dos pacotes antes de enviá-los.

3.1.2.1

Protocolos de Roteamento

A função dos protocolos de roteamento é determinar o caminho tomado por um pacote entre a fonte e o destino. E eles podem ser divididos em duas funções: intra-AS (*Autonomous System*) e inter-AS.

A arquitetura do roteamento na Internet é estruturada em dois níveis de hierarquia. O primeiro nível pode ser chamado de AS ou Domínio, e nesse ambiente utiliza-se protocolos de roteamento intra-AS, ou seja, protocolos de roteamento internos ao domínio que mantêm um mapeamento da atual topologia interna do domínio e cálculos de rotas. Os protocolos mais utilizados para roteamento interno de domínios são o RIP (*Routing Information Protocol*), OSPF (*Open Shortest Path First*) e IS-IS (*Intermediate System-to-Intermediate System*).

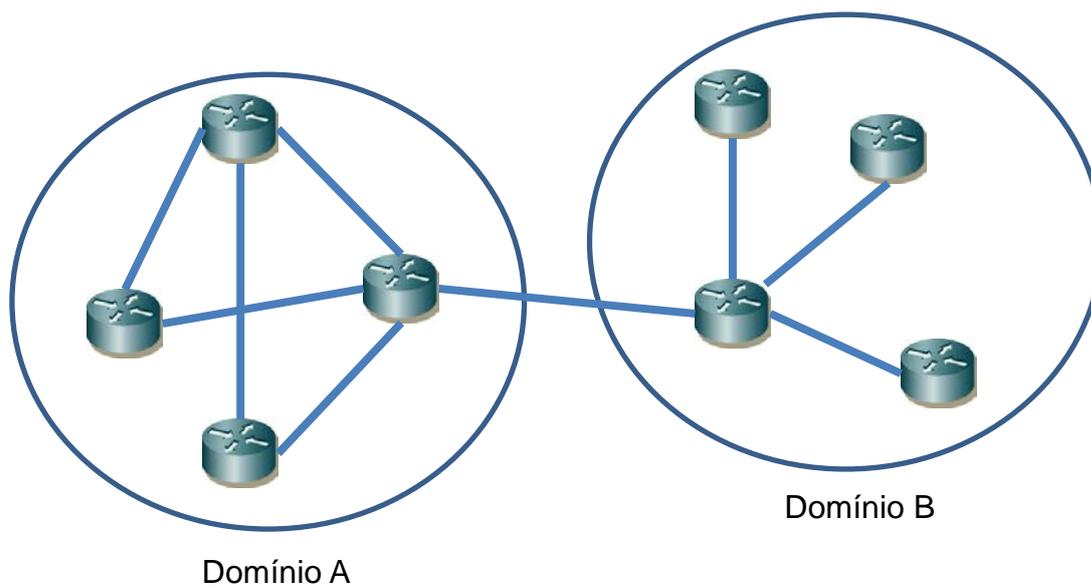


Figure 38 - AS - Autonomous Systems.

O segundo nível de hierarquia de roteamento é o chamado “entre domínios”. O roteamento entre domínios descreve como os domínios devem ser interconectados. Em cada domínio deve haver pelo menos um roteador responsável por fazer a ponte entre os domínios, esse roteador deve rodar os dois tipos de protocolos de roteamento, intra-AS e inter-AS. O protocolo utilizado na Internet para roteamento inter domain é o BGPv4 (*Border Gateway Protocol, version 4*).

A seguir será feita uma descrição dos principais protocolos de roteamento, com suas características e métodos de trabalho.

3.1.2.1.1

RIP

O RIP é um protocolo de vetor de distâncias, e utiliza a contagem de saltos como métrica de custo, isto é, cada enlace tem um custo 1. No RIP os custos são definidos desde um roteador de origem até uma sub-rede de destino. Esse protocolo utiliza o termo salto, que é um número de sub-redes percorridas ao longo do caminho mais curto entre o roteador de origem e uma sub-rede de destino, incluindo a sub-rede de destino.

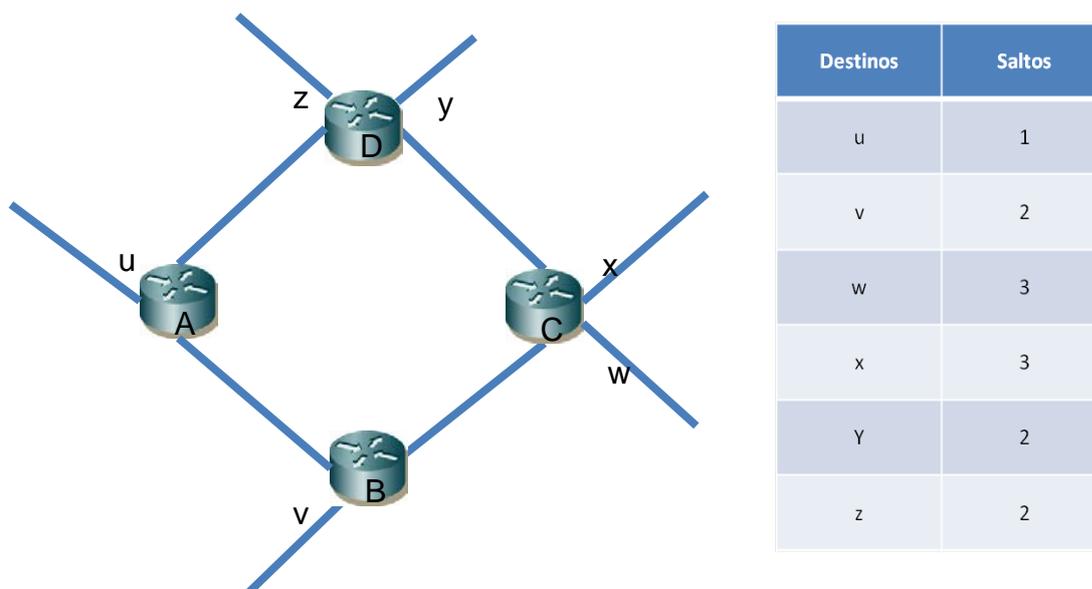


Figure 39 - Número de saltos do roteador de origem A.

O custo máximo de um caminho é limitado a 15, ou seja, o RIP é limitado a redes que possuam no máximo até 15 saltos entre seus roteadores, e essa limitação continua presente a versão 2 do protocolo.

No RIP as tabelas de roteamento são trocadas entre vizinhos a cada 30 segundos aproximadamente, usando uma mensagem de resposta RIP. A mensagem de resposta enviada por um roteador ou um hospedeiro contém uma lista de até 25 sub-redes e destino dentro do AS, bem como as distâncias entre o remetente e cada uma dessas sub-redes.

Cada roteador mantém uma tabela RIP denominada tabela de roteamento. A tabela de roteamento de um roteador inclui o vetor de distâncias e a tabela de repasse desse roteador.

3.1.2.1.2

OSPF

O OSPF e o RIP são amplamente utilizados em ISPs (*Internet Service Providers*), entretanto há uma preferência por aplicar o RIP em ISPs de níveis mais baixos e redes corporativas, pois é, de fácil configuração por sua limitação de tamanho de rede. O OSPF e o IS-IS são normalmente aplicados a ISPs de níveis mais altos.

O OSPF é um protocolo de estado de enlace que usa broadcasting de informação de estado de enlace o algoritmo Dijkstra de menor custo. No OSPF o roteador constrói um mapa com a topologia completa do sistema autônomo. O roteador roda o algoritmo Dijkstra de menor custo para determinar os caminhos mais curtos para todas as sub-redes. O administrador é quem administra os valores de custos dos enlaces, e normalmente se atribui valores levando-se em consideração a taxa de transmissão do enlace, probabilidade de interrupções e retardo do enlace.

No OSPF, um roteador envia informações de roteamento a todos os outros roteadores do sistema autônomo e não apenas a seus roteadores vizinhos. O estado do enlace também é transmitido, de forma periódica a cada 30 minutos ou a cada alteração sofrida pelo enlace.

Denomina-se tempo de convergência ao tempo que o domínio leva para atualizar uma modificação. Por exemplo, se um enlace entre os nós A e B é interrompido, esses nós devem atualizar suas tabelas e informar seus vizinhos desse evento. O tempo de convergência é o tempo necessário para que todos os roteadores do domínio tomem conhecimento dessa interrupção e atualizem também suas tabelas de roteamento.

O tempo de convergência é muito importante para que a rede não fique desatualizada por muito tempo. Por isso, quanto menor o tempo de convergência, mais eficiente será o protocolo.

O tempo de convergência é um ponto de vantagem do OSPF sobre o RIP, pois, enquanto o RIP converge proporcionalmente ao número de nós da rede, o OSPF converge em uma proporção logarítmica ao número de enlaces. Isto torna a convergência do OSPF muito mais rápida. Além disso, no protocolo RIP, a mensagem é proporcional ao número de destinos, sendo assim, se a rede é muito grande, cada mensagem terá de ser subdividida em vários pacotes, diminuindo mais ainda a velocidade de convergência. Outro fator que limita o tempo de convergência do RIP é a possibilidade de ocorrerem *loops* de informação de atualização durante a convergência.^{15 18 19}

O tempo de convergência do RIP e do OSPF devido à interrupções de enlaces foi analisado em [18], e para uma rede relativamente pequena o tempo de convergência do OSPF foi de apenas 10 segundos se compararmos com o tempo de convergência obtido no RIP que foi de aproximadamente 1 minuto.

3.1.2.1.3

IS-IS

IS-IS é um protocolo de roteamento do tipo *link-state*, que opera com sistema de *flooding* de informação para propagar as alterações na rede. Cada roteador constrói o seu próprio mapa da rede com as informações obtidas dos *floodings* da rede. Como o OSPF também utiliza o algoritmo de Dijkstra para cálculo das melhores rotas.

A maior diferença entre o IS-IS e o OSPF é quanto à forma de lidar com o roteamento entre domínios. Para o IS-IS há três possíveis formas de se configurar um roteador: intra-area, inter-area e utilizando os dois intra e inter-area. Um roteador intra-area só vai falar com outro do mesmo tipo, assim como o inter-area também. Já no OSPF, essa divisão é feita em relação às portas, ou seja, um roteador pode ter uma porta intra-area e outra inter-area.

3.1.2.1.4

BGP

O BGP é um protocolo de roteamento externo aos domínios que provê informações de acessibilidade e roteamento entre diversos domínios. O BGP desempenha um papel importante na operação da Internet, pois, é utilizado para fazer o roteamento e decisões de roteadores *core*, ou seja, dos roteadores concentradores. A maioria dos provedores de serviços Internet utiliza o BGP para estabelecer roteamento com seus parceiros.

Os protocolos de roteamento externo, como o BGP, foram criados para controlar o crescimento das tabelas de roteamento e para fornecer uma visão mais estruturada da Internet, com domínios bem delimitados.

Provedores de serviço Internet com redes de grandes dimensões podem utilizar o BGP internamente. Um exemplo pode ser a utilização do BGP para juntar grandes domínios OSPF.

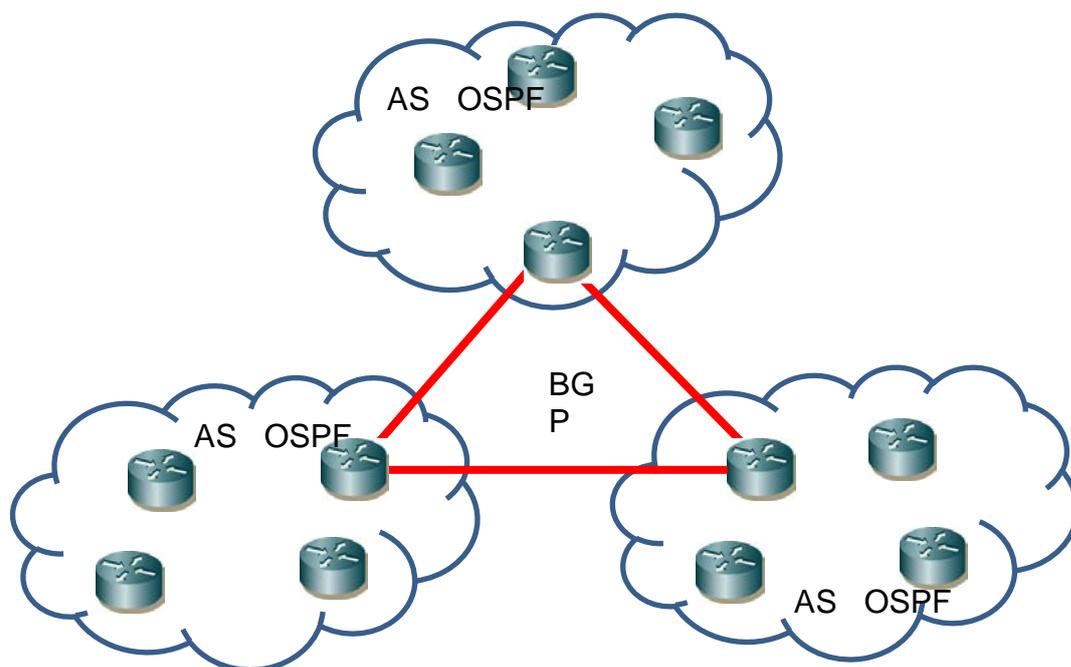


Figure 40 - BGP - Border Gateway Protocol.

3.1.2.2

MPLS

Existem duas vertentes para o tipo de redes de dados, as Redes de Comutação de Circuitos e a Rede de Comutação de Pacotes. Como exemplo da rede de comutação de circuitos, podemos citar as redes de telefonia fixa, pois nessas redes, um circuito é criado de fim-a-fim estabelecendo uma conexão, na maioria das vezes totalmente física do nó origem ao nó destino. Já as redes de comutação de pacotes, como na Internet, a informação do usuário é fragmentada e entregue à rede que fará o encaminhamento dos pacotes conforme as condições da rede naquele momento, com possibilidade de encaminhamento de pacotes de mesma origem e destino por caminhos diferentes, podendo causar a entrega dos pacotes fora da ordem de envio.

O MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) é um conjunto de protocolos cujo principal objetivo é dinamizar o encaminhamento de grupos de pacotes, dentro de uma rede de IP, que seguem de uma mesma origem para um mesmo destino utilizando roteamento baseado em rótulos. O MPLS não substitui o roteamento tradicional, baseado no endereçamento IP, esses protocolos trabalham em conjunto para prover uma melhor utilização dos recursos da rede e um melhor direcionamento dos pacotes.²⁰

Ao entrar em uma rede MPLS os pacotes que devem seguir um mesmo caminho são rotulado por um LER (*Label Edge Router*) e encaminhados para o próximo roteador que é do tipo LSR (*Label-Switched Router*), esses roteadores que compõem a rede MPLS possuem tabelas de roteamento baseadas nos rótulos desses pacotes e vão encaminhar esses pacotes seguindo a orientação dessas tabelas.

Uma vantagem do MPLS em comparação ao método tradicional de roteamento é que os LSRs da rede MPLS não abrem o pacote para verificar o endereço IP destino, ao invés disso, fazem apenas a verificação do rótulo que fora agregado ao pacote na entrada da rede MPLS. Dessa forma o tempo gasto com o tratamento do pacote, ou seja, leitura e cálculo da rota, torna-se bem menor. Outra grande vantagem é que o MPLS permite o direcionamento dos pacotes, e com isso eles conseguem seguir um mesmo caminho na rede, simulando o comportamento de um circuito, que em MPLS são chamados LSP (*Label*

Switched Path) e assim, também é possível garantir reserva de banda, alocação de banda baseada em prioridades e serviços com diferentes níveis de hierarquia.

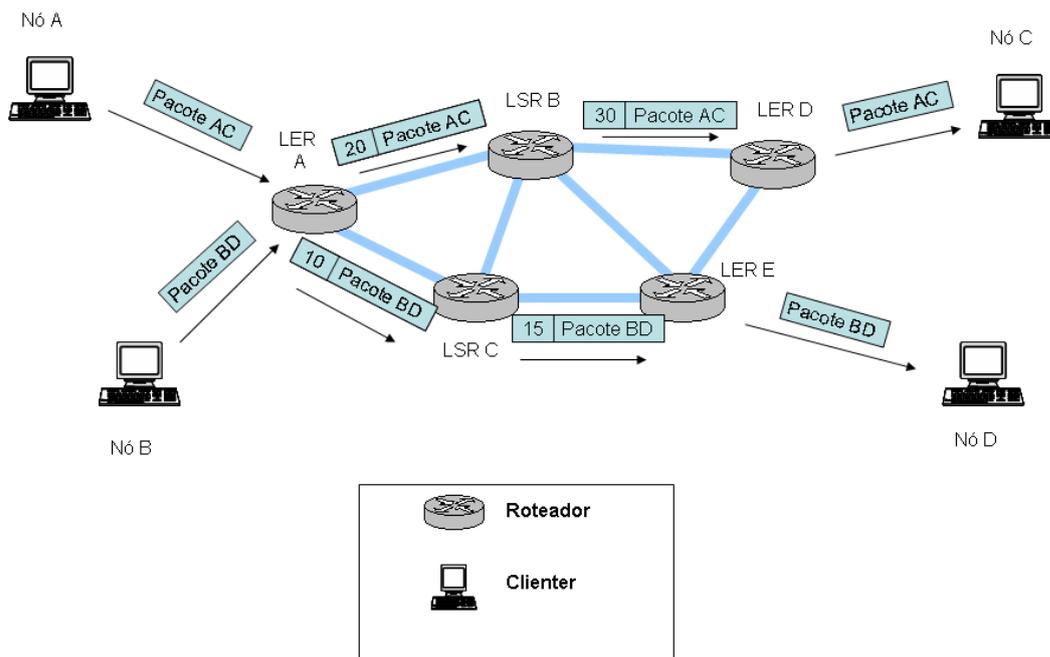


Figure 41 - Multiprotocol Label Switching.

A figura 41 mostra um exemplo de como os pacotes são tratados na rede MPLS, no início são rotulados pelo LER A e direcionados para o próximo LSR após análise da tabela de roteamento baseada em rótulos. Os próximos LSR vão executar a mesma função: abrir apenas o rótulo e comparar com sua tabela para saber em qual interface enviar o pacote. Ao chegar em um LER o rótulo é retirado e o pacote é entregue na interface do cliente destino. Nesse exemplo podemos ver que duas LSP (ou circuitos virtuais) foram criados entre os roteadores A, D e E.

O núcleo da engenharia de tráfego no MPLS consiste na criação de LSPs entre os roteadores da rede. Uma LSP é orientada a conexão assim como os circuitos virtuais do Frame Relay ou do ATM. As LSPs não são confiáveis pois os pacotes que entram na rede MPLS continuam a não ter garantias de entrega apesar da preferência e do direcionamento da entrega. Um método para atribuir confiança ao tráfego de pacotes na rede MPLS é a criação de pares de LSPs com caminhos distintos, uma servindo de caminho principal e outro caminho de proteção.

Na figura 42 vemos a estrutura do rótulo adicionado aos pacotes pelo LER.

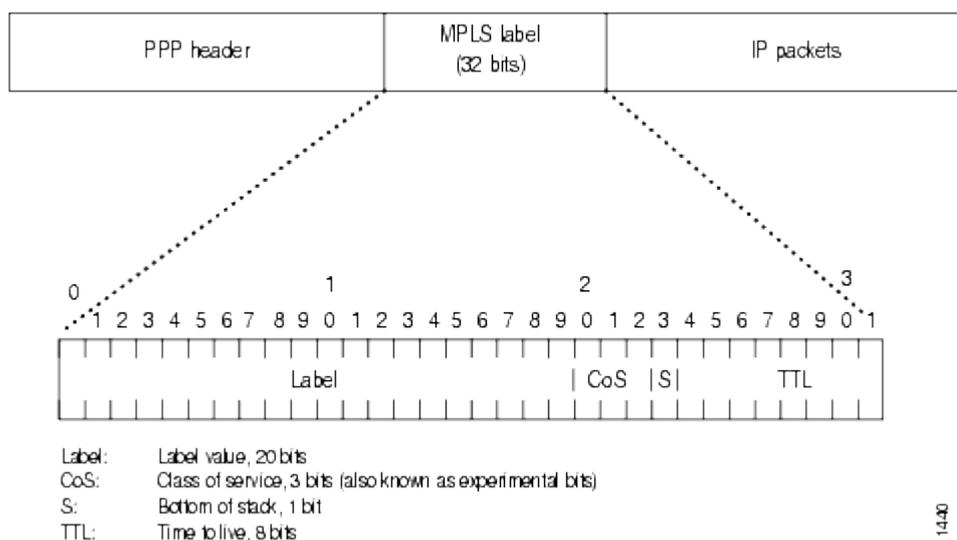


Figure 42 - Cabeçalho MPLS.

Mas o formato exato do rótulo e como é adicionado aos pacotes depende do tipo de enlace da camada 2 usado na rede MPLS. Por exemplo, um rótulo pode corresponder a um VPI/VCI do ATM ou um DLCI do Frame Relay, ou como o exemplo acima, ficar entre o cabeçalho da camada 2 (PPP) e da camada 3 (IP). Veremos mais a frente que para o GMPLS esse rótulo pode ainda ser configurado com outro tipo de informação, como o comprimento de onda ou canal utilizado em redes ópticas.

O MPLS é composto por protocolos tradicionais de roteamento (OSPF e IS-IS) e extensões de protocolos de sinalização existentes (RSVP – Resource Reservation Protocol e CR-LDP – *Constraint-Based Routing-Label Distribution Protocol*).²¹

A arquitetura do MPLS não restringe o uso a um simples protocolo para distribuição de rótulos entre os LSRs, sendo permitida a escolha do melhor protocolo dependendo do tipo de cenário tratado.

3.2

Funcionamento dos Protocolos de Transmissão

Descreveremos agora os principais protocolos de Transmissão por Redes Ópticas utilizados em redes atuais. Esses protocolos são responsáveis por garantir o controle, qualidade, roteamento de sinais e monitoramento das redes ópticas.

3.2.1

Rede OTN

O protocolo OTN (*Optical Transport Network*), também chamado G.709, foi projetado para transportar tráfego de pacotes de dados IP e Ethernet sobre fibras ópticas, assim como, o tráfego legado de SDH/SONET. Outra denominação para o OTN é de Empacotador Digital (*Digital Wrapper*). Isto porque, empacota qualquer sinal cliente com cabeçalho contendo informações de operação, administração e gerenciamento.

Uma grande vantagem do protocolo OTN é que ele reserva boa parte do seu quadro para correção de erros (FEC) e com isso pode garantir um nível de qualidade maior na transmissão dos dados. Ele utiliza como algoritmo de FEC o Código Reed-Solomon, reservando 16 bytes de redundância para cada bloco de 255 bytes. Esse FEC pode corrigir até 8 bytes errados.

Outra grande vantagem é que, assim como o SDH/SONET, o OTN também permite a análise de desempenho e gerenciamento de alarmes na rede óptica.

Na tabela 1 podemos ver as taxas de transmissão do OTN:

Tabela 1 - Taxa de Transmissão do OTN.

OTN	Taxa de Transmissão
OTU1	2.666 Gbps
OTU2	10.709 Gbps
OTU3	43.018 Gbps
OTU4	111.809 Gbps

3.2.1.1

Hierarquia

Da figura 43 podemos ver que o OTS (*Optical Transmission Section*), OMS (*Optical Multiplex Section*) e o OCh (*Optical Channel*) estão na camada óptica, e que o OTU, ODU e OPU estão na camada eletrônica, assim como, os sinais de clientes.

A OTS é a camada que fica mais abaixo, provê a funcionalidade transmissão de sinais ópticos em vários tipos de fibras ópticas. A camada logo acima é a OMS, que provê a funcionalidade de rede para os sinais ópticos de múltiplos comprimentos de onda. A camada superior é o OCh, que é a camada de rota e provê a funcionalidade de conexão fim-a-fim para os canais ópticos permitindo o envio de sinais de clientes de forma transparente entre regeneradores 3R (*re-amplifying, re-shapping, re-timing*).

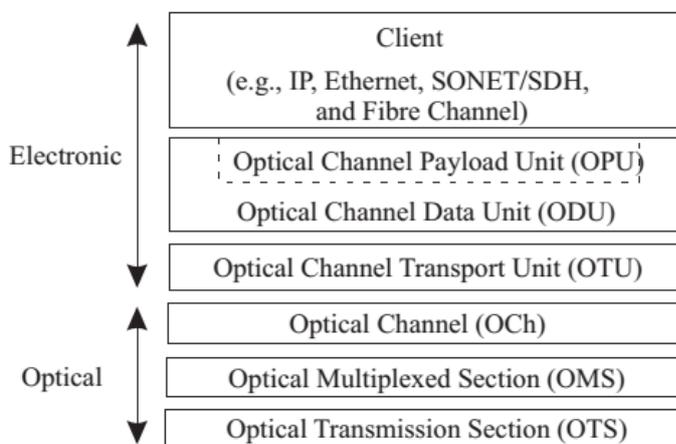


Figure 43 - OTN – Camadas.

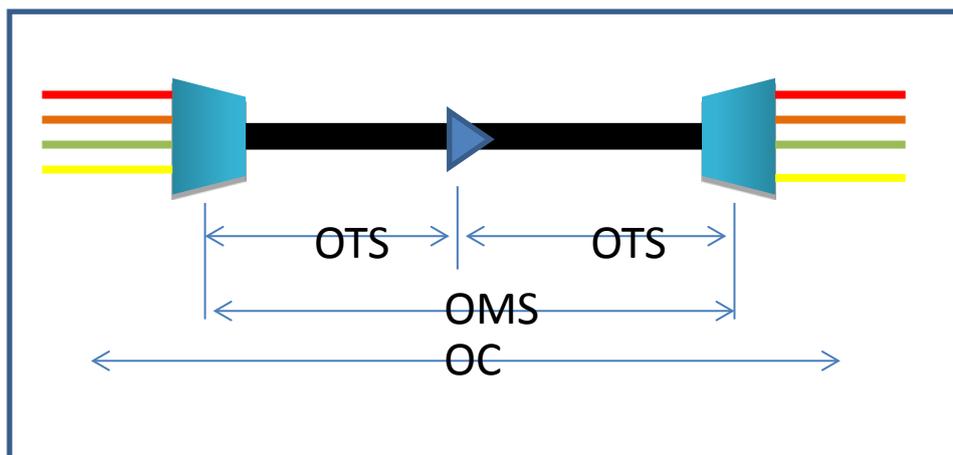


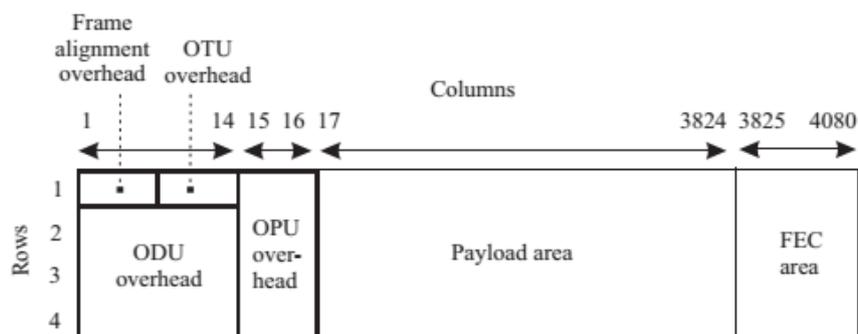
Figure 44 - OTN – Seções.

A figura 44 mostra a hierarquia entre essas seções ópticas.

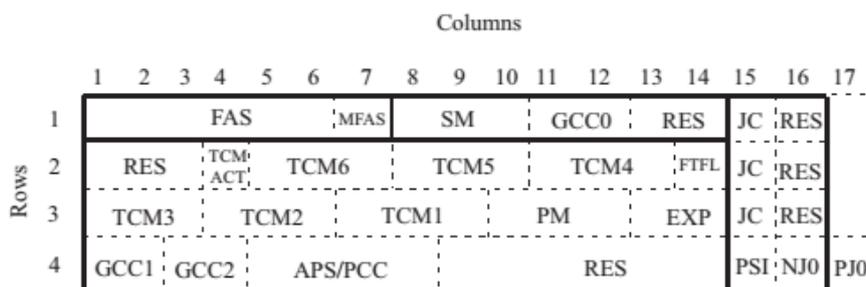
3.2.1.2

Formação do Quadro

O quadro OTN é formado por 4 linhas com 4080 colunas de bytes. Assim como o quadro do SDH, o quadro OTN é transmitido linha por linha, da esquerda para a direita. Cada linha do quadro possui 255 bytes que são utilizados para FEC, garantindo um total de $16 \times 255 = 4080$ bytes para recuperação e correção de erros por cada quadro transmitido. A figura 45 mostra o formato do quadro OTN com maiores detalhes.



(a)



(b)

Figure 45 - Quadro OTN.

3.2.1.3

Multiplexação

Como é ilustrado na figura 46, o protocolo OTN faz a multiplexação de tráfego legado SDH (STM-1, STM-4, STM-16, STM-64 e seus equivalentes SONET), assim como também atende a sinais clientes de 1 GbE, 10 GbE, 40 GbE e 100 GbE.

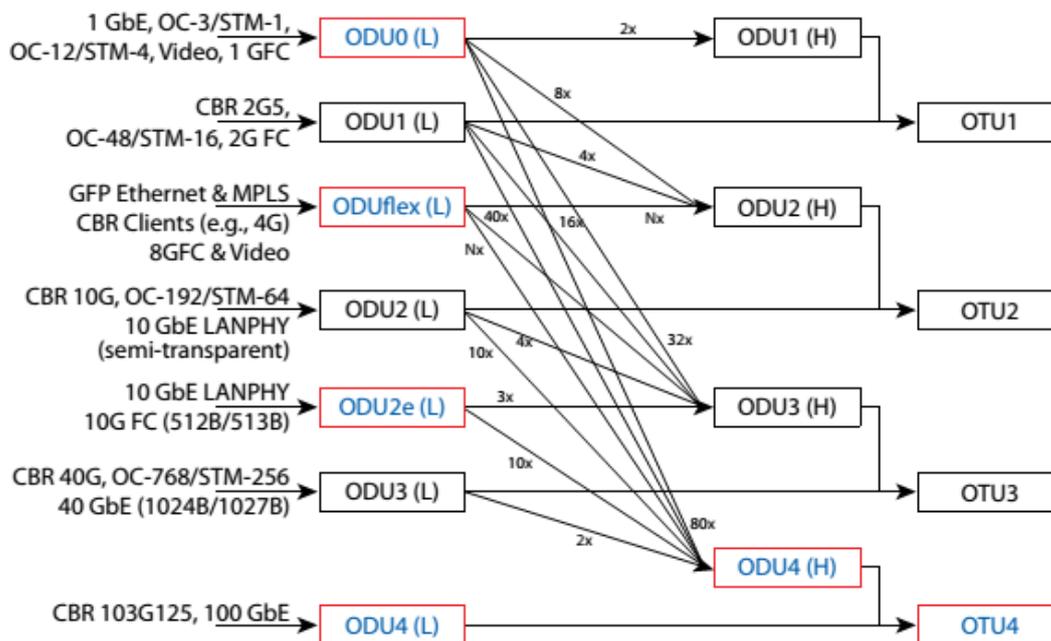


Figure 46 - Multiplexação no OTN.

3.2.1.4

Tipos de Proteção

As proteções descritas a seguir são muito similares às proteções no SDH/SONET, visto que se trata da reutilização de conceitos de Proteção Compartilhada, Duplicidade de tráfego, Reversibilidade, etc. Entretanto, a aplicação desses conceitos no protocolo OTN, na camada óptica, é substancialmente diferente, por várias razões: o custo de equipamentos para sistemas WDM cresce com o número de comprimentos de onda que deve ser multiplexado e terminado; o cálculo de potência óptica para enlaces WDM também deve ser considerado com muito cuidado no planejamento do esquema de proteção, etc.

Como visto anteriormente a camada óptica consiste do Canal Óptico (OCh) ou camada de rota, a Seção de Multiplexação Óptica (OMS) ou camada de linha, e da Seção de Transmissão Óptica (OTS). Os esquemas de proteção da camada OCh restauram um canal óptico por vez enquanto as proteções em OMS restauram o grupo inteiro de canais ópticos, mas não consegue restaurar canais ópticos individualmente. Os esquemas de proteção descritos a seguir ainda não

estão padronizados e foram descritos seguindo um padrão de comparação com as redes SDH.^[9]

Em redes SDH não há custos significantes associados com o processamento de cada conexão separadamente em cada canal ao invés de processar todas as conexões juntas em uma seção multiplex. A razão é que o processamento é feito usando circuitos integrados ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*), onde o custo incremental para processamento do canal comparado ao da linha não é significativo. Uma diferença significativamente no custo pode ser associada aos esquemas de proteção na camada OCh em relação aos da OMS. Os esquemas da camada OCh têm que demultiplexar todos os comprimentos de onda, enquanto os esquemas OMS operam com todos os comprimentos de onda e portanto necessitam de menos equipamentos (processamento).^[9]

Como exemplo, será analisada a figura 47, onde são mostrados dois tipos de proteção. O esquema de proteção OMS requer dois terminais WDM e um divisor e comutador adicional. As proteções no OCh, por outro lado, requerem quatro terminais WDM e um divisor e comutador por cada comprimento de onda. Logo o custo destes equipamentos é maior do que o custo dos equipamentos para OMS. Na verdade, este é o caso se todos os canais devessem ser protegidos. Entretanto, o custo da proteção OCh pode ser reduzido se nem todos os canais necessitarem ser protegidos. Assumindo que multiplexadores, divisores e comutadores podem ser adicionados a cada comprimento de onda, o custo da proteção OCh cresce linearmente com o número de canais que são protegidos. O custo da proteção OMS, por outro lado, é independente do número de canais a serem protegidos. Assim, se apenas uma pequena quantidade de canais deve ser protegida, a proteção OCh não é significativamente mais onerosa que a proteção OMS.

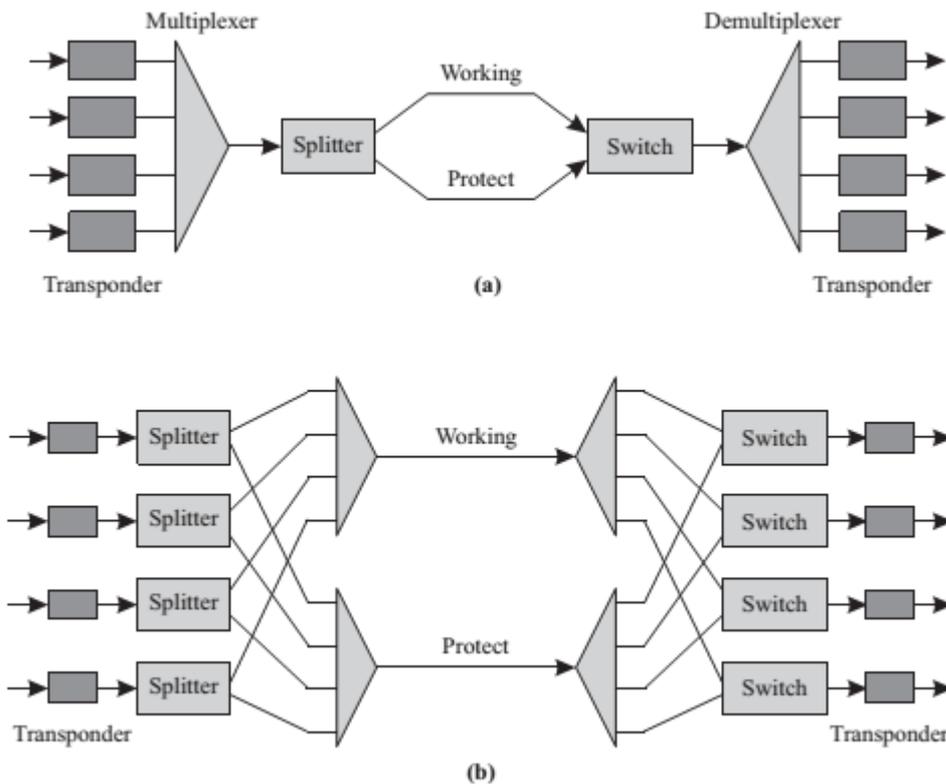


Figure 47 - Comparação a) 1+1 OMS e b) 1+1 OCh.

A tabela 2 exibe os principais tipos de proteções que podem ser utilizados no OTN.

Tabela 2 - Proteções em OTN.

	1+1	1:N	OMS-DPRing	OCh-DPRing	OMS-SPRing	OCh-SPRing
Camada	OMS OCh	OMS OCh	OMS	OCh	OMS	OCh
Tipo	Dedicada	Compartilhada	Dedicada	Dedicada	Compartilhada	Compartilhada
Topologia	Ponto-a-Ponto	Ponto-a-Ponto	Anel	Anel	Anel	Anel

3.2.2

ASON/GMPLS

As tecnologias de rede SDH/SONET e OTN podem ser consideradas rígidas, se considerarmos a necessidade de roteamento de um circuito criado; um circuito criado e nesse tipo de rede, normalmente tem o seu caminho principal e um caminho alternativo (em anel, SNCP, etc), mas se houver duas ou mais falhas nesses caminhos o circuito é interrompido, ainda que haja recursos livres. Nesse caso é necessário a atuação manual alteração da configuração do circuito original.

Entretanto, o padrão de tráfego oferecido às redes clientes se tornou cada vez mais dinâmico. Não só o padrão de tráfego está mudando continuamente com o tempo como também a localização deste, pois está sofrendo constantes modificações por conta de roteamentos. Esses requerimentos de rede podem ser atendidos por redes de transporte ou redes ópticas que permitam a criação e a implementação de circuitos, enlaces e nós sob demanda e de forma automática para os clientes. Esse tipo de flexibilidade requer, em contra partida, maior inteligência na rede de transporte, introduzindo o conceito de ION (*Intelligent Optical Networks*).

IONs não só podem prover restauração às redes de transporte, mas também provêem aumento sob demanda da capacidade de tráfego disponível para recuperação das redes clientes. A habilidade de configurar conexões sob demanda permite a alocação de recursos apenas durante o período necessário. Conseqüentemente, um padrão de tráfego altamente dinâmico resulta em uma significativa redução de CAPEX (*Capital Expenditure*), que é o capital empregado pela operadora para implementar os recursos necessários a um serviço. Mas a implementação automática desses recursos de rede nas IONs também permite uma redução muito grande no OPEX (*Operation Expenditure*), que é o capital aplicado na Operação e Manutenção da rede.

No ITU-T foi montado o grupo de trabalho para o ASON (*Automatic Switched Optical Networks*), mais precisamente, o ITU-T G.8080 que especifica a arquitetura das redes ASON. O IETF por sua vez especifica, através de seus *internet drafts*, os requerimentos para que o GMPLS (*Generalized Multi-Protocol*

Label Switched), conjunto de protocolos de roteamento e sinalização, suportem a arquitetura proposta no ASON.

3.2.2.1

Arquitetura ASON

A arquitetura ASON descreve uma rede em que seus nós executam a criação e implantação de circuitos, assim como o roteamento de tráfego de forma automática, independente de ação de operadores ou de comunicação com o sistema de gerenciamento da rede. Para tanto foi necessária a adição de inteligência aos equipamentos que antes realizavam operações bem mais simples como as comutações em anel ou em sistemas lineares.

Esta inteligência foi denominada de Control Plane, e o tráfego de clientes foi confinado a uma camada denominada Data Plane. O Plano de Controle neste caso é chamado de Distribuído, pois, cada nó da rede faz o controle de seus próprios recursos, mas, foi definida também outra opção de Plano de Controle, o Concentrado, no qual o NMS (*Network Management System*) fica responsável por fazer o controle de todos os recursos da rede. Por exemplo, para a execução de um roteamento de circuito na rede por motivo de falha, no Plano de Controle Concentrado o NMS faz o cálculo das rotas alternativas e informa aos elementos de rede qual tipo de conexão deve ser realizada para estabelecer o novo caminho. Se a mesma falha for tratada por um Plano de Controle Distribuído, os nós finais dos circuitos são responsáveis por trocar informações com os outros elementos, através dos protocolos apropriados e descobrir a nova rota.

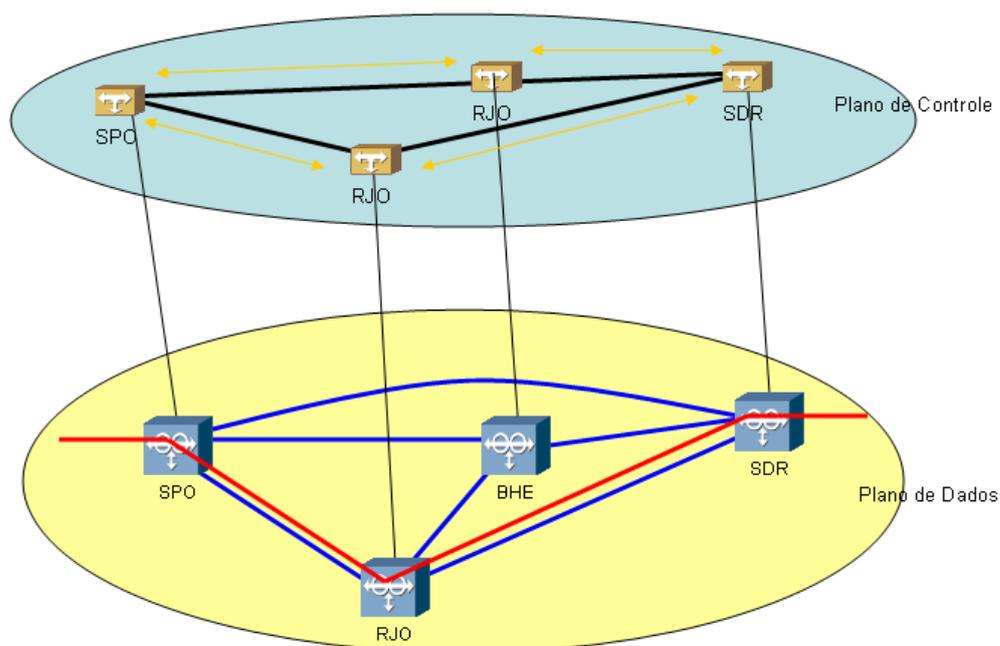


Figure 48 - Plano de Controle e Plano de Dados.

O Plano de Controle Concentrado tem maior risco para a rede de transporte, pois em caso de falha dos servidores do NMS, ou da falta de comunicação com os elementos de rede, haveria uma indisponibilidade da rede para o cálculo de novas rotas e consequente restauração dos circuitos.

A figura 48 exibe a diferença entre o Plano de Controle e o Plano de Dados.

3.2.2.2

Protocolos do GMPLS

O MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) foi idealizado para redes IP que normalmente funciona com o roteamento de pacotes na camada 3. Para que os pacotes sejam roteados eles são abertos e o seu cabeçalho é analisado a cada nó (roteador) para que o próximo host seja calculado. Esse é um processo que pode ser lento em determinados casos, por exemplo, para pacotes que pertencem a nós origem-destino iguais, e mais precisamente pertencem a uma mesma aplicação.

O MPLS faz com que os roteadores anexem uma etiqueta a cada pacote que entra na rede. Mas, se os pacotes pertencerem a um mesmo tráfego fim-a-fim eles recebem a mesma etiqueta e são roteados pelo mesmo caminho, criando assim um circuito virtual, ou como é normalmente chamado LSP (*Label Switched Path*).

Para executar a comutação dos pacotes baseados em etiquetas foram necessários alguns protocolos de sinalização e roteamento, adicionais ao IP.

O GMPLS, como o próprio nome diz é uma generalização do MPLS, pois na sua implementação permite que a LSP seja, por exemplo, um comprimento de onda em uma rede óptica, ou um circuito STM-1 em uma rede SDH, ou mesmo um OCh ou ODU em uma rede OTN.

O GMPLS utiliza o mesmo conjunto de protocolos do MPLS, com algumas alterações, para a implementação do Plano de Controle da rede ASON.

O protocolo RSVP-TE (*Reservation Protocol- Traffic Engineering*) é utilizado para a Sinalização do Control Plane. A Sinalização é o processo de troca de mensagens dentro do Plano de Controle para estabelecer, manter, modificar e terminar um canal no Plano de Dados.

O protocolo OSPF-TE (*Open Shortest Path First – Traffic Engineering*) é utilizado para o Roteamento do Plano de Controle. O conceito de roteamento aqui não é o de restauração dos circuitos do Plano de Dados e sim a distribuição de informação que será utilizada como base para o cálculo das novas rotas das LSPs dentro da rede. Essa informação se refere ao estado dos recursos da rede, assim como da topologia da rede.

O protocolo LMP (*Link Management Protocol*) é utilizado para o gerenciamento dos enlaces entre os nós da rede. Esse gerenciamento inclui a descoberta de novos enlaces entre nós adjacentes e a verificação automática da integridade dos enlaces.

A figura 49 evidencia como os protocolos de roteamento e sinalização atuam no plano de controle de um nó GMPLS, e como esse controle é totalmente separado do plano de dados que é composto basicamente pelas unidades de linha e matrizes de comutação.

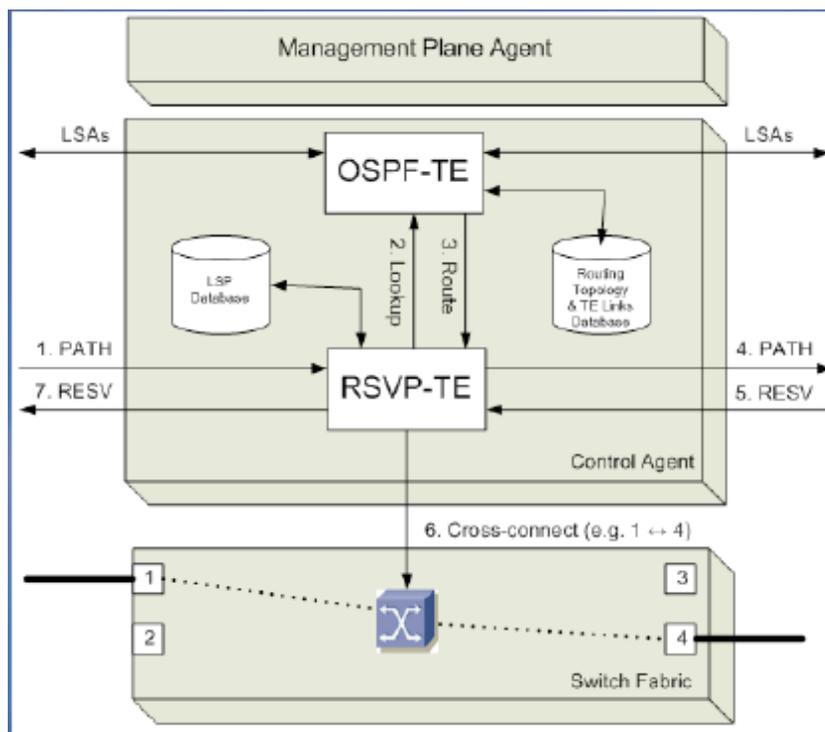


Figure 49 - Nó GMPLS.

3.2.2.3

Tipos de Proteções

A recuperação do tráfego em redes GMPLS é feita no nível de LSPs. Ou seja, os esquemas de proteção definidos visam a restauração automática dessas LSPs.

Cada LSP pode ter a sua rota fim-a-fim recuperada por um dos tipos abaixo:

- Proteção Unidirecional 1+1
- Proteção Bidirecional 1+1
- Proteção 1:N
- Reroteamento pré-planejado
- Reroteamento Completo
- Sem Proteção

Os primeiros três tipos de proteção aplicam os mesmos conceitos vistos nos capítulos anteriores, uma descrição será feita para os outros três tipos.

3.2.2.3.1

Roteamento Pré-Planejado

No Roteamento Pré-Planejado, quando a LSP é criada, uma rota alternativa é avaliada e o caminho é armazenado em memória, para ser utilizado em caso de falha na rede. Entretanto no caso do Pré-Planejado os recursos da rota alternativa não são utilizados, isto é, nenhuma cross-conexão é feita, ficando a rota totalmente disponível para outro tráfego. Somente no momento em que houver a necessidade de roteamento da LSP é que o caminho alternativo será utilizado. Essa procura por rotas alternativas pode ser demorada e alguns msecs podem ser aproveitados se for realizada com antecedência. Entretanto, como os recursos da rota alternativa não são reservados, pode ocorrer de outra LSP utilizar este caminho, ou parte dele. Neste caso, outra rota alternativa deverá ser calculada para a recuperação do tráfego.

3.2.2.3.2

Roteamento Completo

No método de proteção de Roteamento Completo a LSP é criada e nenhuma rota alternativa é pesquisada. Quando há a necessidade de re-encaminhar a LSP uma análise da rede é feita e a melhor rota é escolhida. Esse método é mais demorado que o Roteamento Pré-Planejado, pois, o elemento de rede responsável pela recuperação do tráfego deve rodar o algoritmo de reserva de recursos para identificar a nova rede e dependendo do tamanho da rede pode ser bem trabalhoso, e então realizar troca de mensagens com os outros equipamentos de rede para estabelecer o novo caminho do tráfego.

3.2.2.3.3

Sem Proteção

Essa é uma classificação da LSP para definir o tráfego que não terá nenhum tipo de método de restauração. Caso alguma falha venha a ocorrer e interrompa o tráfego desse circuito, nenhuma ação será tomada por parte dos

elementos de rede. O tráfego somente será restabelecido após a correção da falha que originou a interrupção do tráfego.

4

Efeitos de Altas Taxas de Transmissão

4.1

Atrasos em redes de comutação de pacotes

Quando um pacote segue a partir de um nó para outro remoto, sofre ao longo do caminho diversos tipos de atraso em cada nó da rota percorrida. Os atrasos mais relevantes para a rede de dados são: o atraso de processamento do nó, atraso de fila, atraso de envio (transmissão) e o atraso de propagação. Ao somar todos esses atrasos temos então o atraso nodal total.

- **Atraso de processamento do nó:** é o tempo necessário para que o roteador faça a leitura dos cabeçalhos dos pacotes, análise de erros de bits, análise de rotas disponíveis e o direcionamento do pacote para a porta destino. O atraso em roteadores de alta velocidade é da ordem de micro segundos, mas está diretamente relacionado à velocidade de CPU e da quantidade de memória utilizadas.
- **Atraso de fila:** é o tempo que os pacotes aguardam em fila antes de serem enviados pelo enlace de transmissão. Normalmente os pacotes são armazenados em *buffers* e aguardam a sua vez de serem enviados. O tempo de espera na fila varia com a quantidade de pacotes processados pelo roteador e que também estão aguardando na fila, se não houver pacotes na fila o novo pacote terá tempo de 0s para aguardo no fila.
- **Atraso de envio (transmissão):** esse é o tempo requerido para o envio propriamente dito do pacote. Considerando um pacote de tamanho L bits, e um enlace com taxa de transmissão de R bits/s, o atraso de envio é dado por:

$$t_a = \frac{L}{R} \quad (9)$$

portanto o tempo de atraso está diretamente ligado ao tamanho do pacote e inversamente à taxa de transmissão do enlace.

- **Atraso de propagação:** O atraso de propagação, considerando uma rede de dados, é o tempo que um pacote leva desde seu envio pelo roteador A até sua chegada no roteador B.

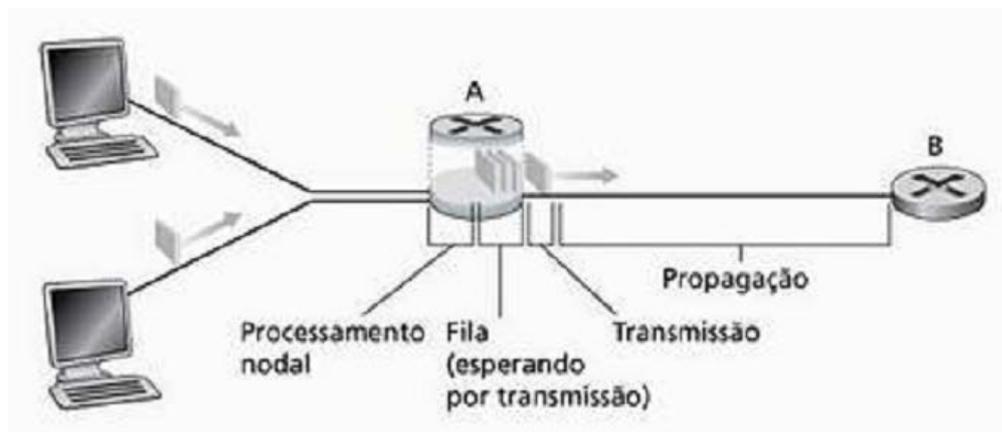


Figure 50 - Atrasos em redes de comutação de pacotes.

Os atrasos de Fila e processamento Nodal têm sido amplamente estudados na área de comunicação de dados, por serem as maiores parcelas do Atraso Nodal Total.¹⁶ Entretanto, no presente estudo o Atraso de Propagação para as redes de dados será o mais importante, pois, este atraso está diretamente ligado à Rede de Transporte. O atraso de propagação pode ser curto, alguns microssegundos, se os roteadores estiverem interligados diretamente ou por uma LAN. Mas, a maioria dos roteadores de redes *backbone*, não somente os roteadores de Operadoras de telefonia como também seus clientes, estão interligados por uma rede de Transmissão Óptica, que pode ser uma rede metropolitana, com equipamentos ADM e CWDM, ou redes de grandes distâncias por com DXCs e DWDM. Esses roteadores também podem estar ligados por enlaces via Rádios de Microondas, ou via Satélite, entretanto serão analisados exclusivamente os sistemas de redes ópticas.

4.2

Limitações por processamento^{15 17}

Os roteadores recebem pacotes de diferentes portas e devem encaminhá-los para o seu destino enviado esses pacotes para as portas corretas, e para realizar esse trabalho faz uso de uma tabela de roteamento. Nessa tabela há uma associação entre os endereços de destino e as suas portas de saída. Essas tabelas são atualizadas frequentemente, como será mostrado mais adiante, para que o roteador tenha sempre uma informação atualizada para onde enviar seus pacotes.

Ao receber o pacote o roteador faz duas importantes tarefas: a leitura do seu cabeçalho, onde encontra o endereço de origem e o de destino do pacote e de posse do endereço destino a próxima tarefa é comparar esse endereço com a tabela de roteamento e identificar a porta para a qual enviar o pacote.

Em redes configuradas com TCP/IP o roteador faz esse trabalho de leitura e encaminhamento para todos os pacotes que recebe. Entretanto para roteadores de *backbone* operando em redes de altas velocidades, esse trabalho pode se tornar um fator limitante para o desempenho do dispositivo, pois a quantidade de pacotes a serem analisados é demasiadamente grande.

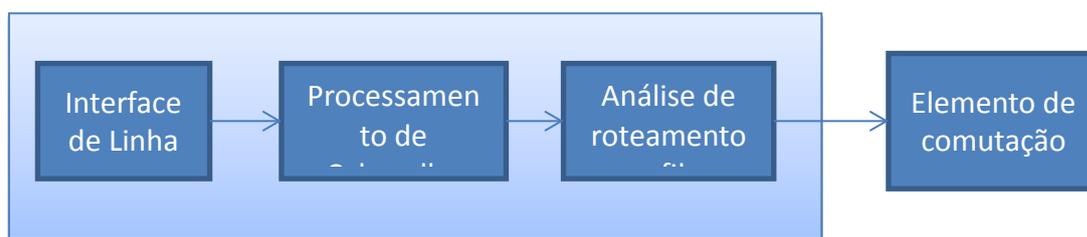


Figure 51 - Leitura e encaminhamento de pacotes.

É desejável que o processamento da porta de entrada tenha a capacidade de operar à velocidade de linha, isto é, que essa análise do cabeçalho seja executada em menor tempo que o necessário para receber um pacote na porta de entrada. Assim, o processamento de entrada de um pacote recebido pode ser concluído antes do término da operação de recebimento do próximo pacote.

Considerando-se os pacotes de 256 bytes à taxa de 10 Gbps, o roteador deve ser capaz de processar quase 40 milhões de pacotes por segundo. E se forem consideradas também as taxas de transmissão que estão sendo implementadas atualmente como a de 100 Gbps, esse número sobe para 400 milhões de pacotes por segundo, ou seja, há um aumento brutal no número de pacotes a serem tratados pelo roteador.

As técnicas de processamento de pacotes utilizadas pelos equipamentos comutadores de pacotes podem ser implementadas diretamente em hardware como nos ASICs (*Application Specific Integrated Circuit*) ou ICs comuns, em hardware de baixa quantidade de software com os NPUs (*Network Process Units*) ou também por software nas CPUs.

As tarefas são limitadas evidentemente pelo processamento necessário para lidar com essas consultas, assim como o acesso à memória para análise das tabelas de roteamento. Técnicas de armazenamento de registros de tabela são utilizadas, como a busca binária, onde os endereços são armazenados de tal forma que a busca por um endereço é feita analisando-se bit a bit do endereço com as posições em memória, o que se demonstrou ser mais rápido do que o acesso linear, sequencial, a uma tabela.

Outro tipo de solução para acesso à memória é a utilização de CAMs (*Content Addressables Memories*) ao invés de RAM (*Random Access Memory*). As CAMs fazem comparações de valores de entrada com suas tabelas de dados armazenados, retornando os endereços (ou mesmo a informação) em tempo praticamente constante.

Em redes IP com MPLS o processamento necessário para encaminhamento dos pacotes é menor, pois o roteador faz a leitura apenas da etiqueta MPLS e a tabela de roteamento que deve ser consultada é consideravelmente menor, portanto para redes com taxas de transmissão mais altas a utilização de MPLS ou suas variantes é quase que uma exigência para se obter melhor desempenho da rede.

4.3

Tamanho do número de sequência do TCP

Na figura 52 pode ser visto o cabeçalho do segmento TCP. O TCP, como foi verificado anteriormente faz o controle da ordenação dos segmentos entregues no destino, e para executar esse controle se faz necessário do uso de um número de sequência. Para os segmentos recebidos em ordem, é enviado um segmento de reconhecimento de volta ao nó origem para que possa enviar o próximo segmento ou o reenvio do anterior. Esse número de sequência, no cabeçalho TCP, tem o tamanho de 32 bits. Ou seja, é possível enviar até 2^{32} segmentos até que a contagem desse parâmetro seja reiniciada.

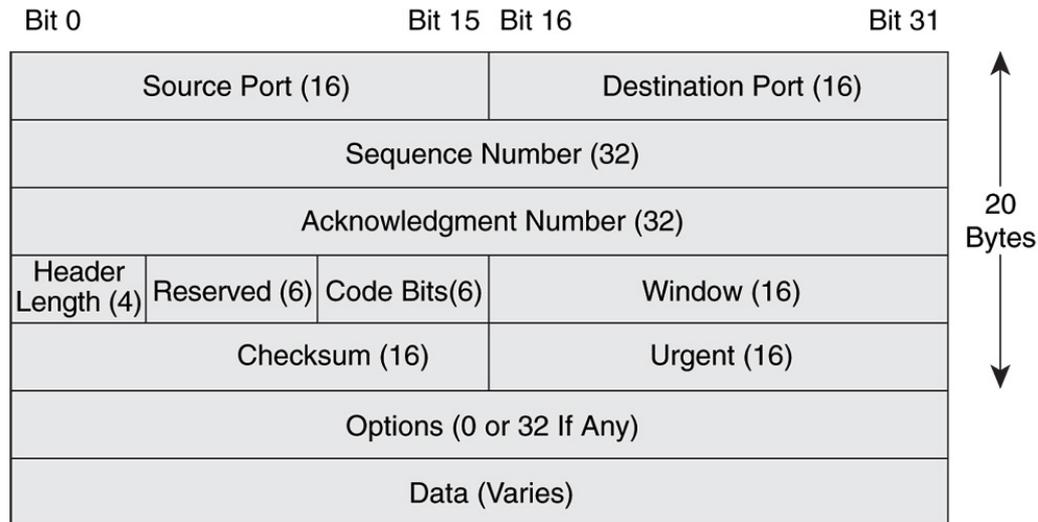


Figure 52 - Cabeçalho TCP.

Entretanto, o protocolo TCP foi desenvolvido inicialmente para redes que utilizavam tecnologias de transmissão com taxas de 56Kbps. Um segmento simples como a consulta a uma página web, utilizando o protocolo HTTP, gera um segmento de tamanho entre 250 a 300 bytes, como pode ser visto na figura a seguir e agregando-se mais 20 bytes de cabeçalho do protocolo IP e 34 bytes do cabeçalho do quadro Ethernet (802.3), a quantidade de bits transmitidos vai para 300 a 350 bytes.

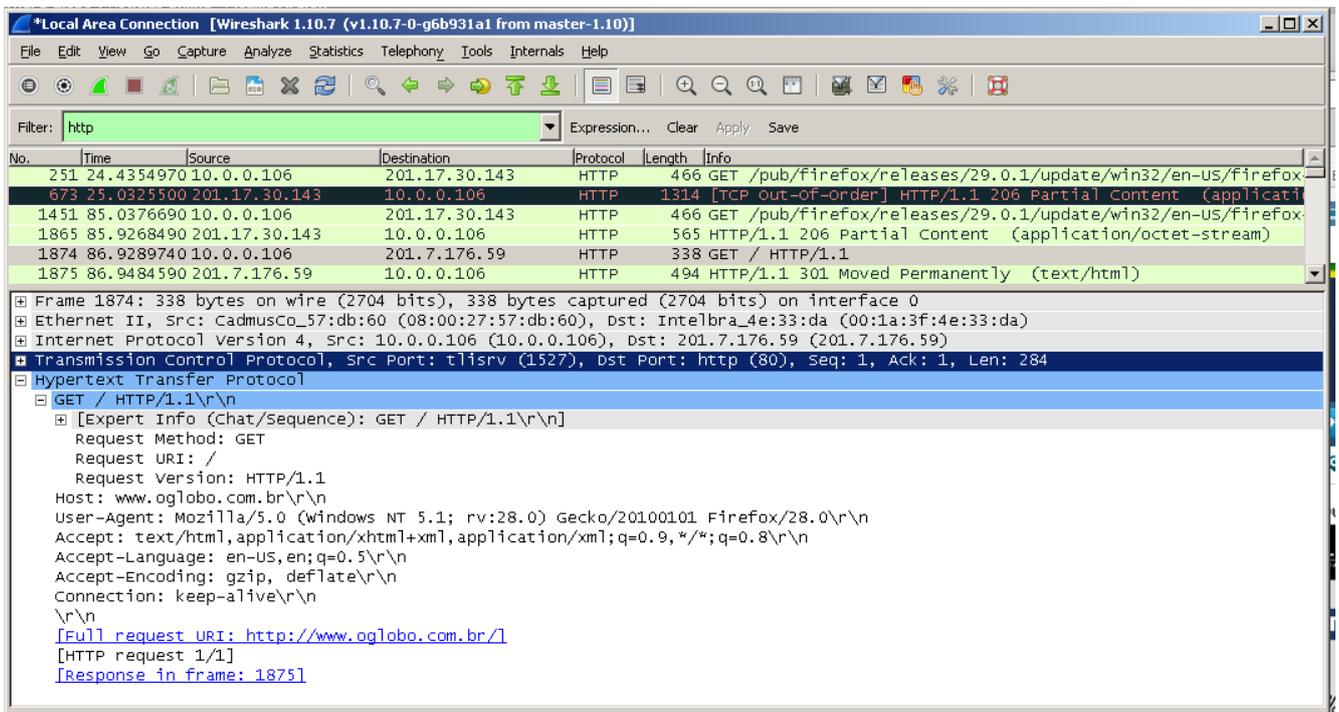


Figure 53 - Wireshark - HTTP GET.

Se forem considerados segmentos de tamanho médio 330 bytes, e além disso, que os nós estão constantemente transmitindo, utilizando toda a banda de transmissão, vemos que para utilizar todos os números disponíveis do campo *sequence number*, os nós levariam aproximadamente:

$$330 \times 8 = 2640 \text{ bits por cada } \textit{sequence number}$$

$$2640 \times 2^{32} = 11,3 \text{ Tb quantidade total de dados transmitidos}$$

$$\frac{11,3 \times 10^{12}}{56 \times 10^3} = 202477029 \text{ segs} = 6,5 \text{ anos à taxa de 56Kbps}$$

$$\frac{11,3 \times 10^{12}}{10 \times 10^6} = 1130000 \text{ segs} = 13 \text{ dias à taxa de 10 Mbps}$$

$$\frac{11,3 \times 10^{12}}{10 \times 10^9} = 1130 \text{ segs} = 18 \text{ min à taxa de 10 Gbps}$$

$$\frac{11,3 \times 10^{12}}{100 \times 10^9} = 113 \text{ segs à taxa de 100 Gbps}$$

Portanto, para taxas de transmissão utilizadas até recentemente, o tempo que levaria para forçar um reinício da sequência dos segmentos era muito maior do que tempo de vida de um segmento dentro da rede (120 a 200 segs). Mas, ao aumentarmos a taxa de transmissão entre os roteadores, o tempo para o reinício da contagem se torna muito próximo do tempo que o segmento transita na rede e a probabilidade de haver dois segmentos com o mesmo número de sequência também aumenta.

O tamanho do MTU (*Maximum Transmission Unit*), que será analisado com maiores detalhes na próxima seção, também influência no aumento da fragmentação dos dados da aplicação pela camada TCP e, portanto, aumenta a necessidade de segmentos por cada dado volume de dados da aplicação.

4.4

Tamanho do MTU²²

O MTU é um parâmetro que define o tamanho máximo do pacote que o protocolo da camada de enlace pode suportar, incluindo a informação a ser transmitida (*payload*) e os cabeçalhos das camadas superiores. Se o datagrama das camadas superiores é maior do que o MTU, esse datagrama será fragmentado em pacotes menores.

É amplamente utilizado na Ethernet o valor de MTU de 1500 bytes e na tabela seguinte verificamos que apesar do aumento sucessivo das taxas de transmissão no protocolo Ethernet, o valor do MTU se manteve o mesmo. Na tabela 3 também é apresentado o valor de atraso de envio ao longo dos tempos.

Tabela 3 - Padrões Ethernet e MTU.

Tecnologia	Taxa (Mbps)	Ano	MTU (Bytes)	Retardo de Envio
Ethernet	10	1982	1500	1200 μ s
Fast Ethernet	100	1995	1500	120 μ s
Gb Ethernet	1000	1998	1500	12 μ s
10 Gb Ethernet	10.000	2002	1500	1,2 μ s
100 Gb Ethernet	100.000	2010	1500	0,12 μ s

O tipo de tráfego na Internet tem mudado nos últimos tempos, a informação de imagem e vídeo já se tornaram a maior parte do volume de tráfego, ou seja, a quantidade de informação a ser transmitida pela camada de aplicação teve um crescimento enorme e com o número do MTU mantido fixo em 1500 bytes o número de fragmentação da informação também aumentou. Essa fragmentação requer a adição de novos cabeçalhos aumentando também a carga de processamento nos roteadores.

Uma alternativa para o MTU de 1500 bytes é o chamado *Jumbo Frame*, de 9000 bytes. Ele é utilizado em determinados tipos de rede e ainda não foi totalmente aceito como valor padrão para as novas redes.

A utilização do *Jumbo Frame* é mais indicada para redes de alta velocidade, pois necessita de menor número de cabeçalhos. Conforme podemos ver na tabela seguinte, o percentual de tempo utilizado no tratamento do *payload* é maior quando se utiliza o *Jumbo Frame*, ou seja, o equipamento gasta mais tempo e processamento da CPU na transmissão de dados de informação do que de cabeçalhos de controle.

A tabela 4 foi montada tendo como referência cabeçalhos do IPV4, entretanto, com a mudança de protocolo de endereçamento IP do IPV4 para o

IPv6, haverá um aumento no tamanho desse cabeçalho a ser tratado pelos equipamentos de rede e, portanto, esses valores serão alterados mostrando uma diminuição no tempo de tratamento de dados reais de informação. O cabeçalho do protocolo IPv6 tem 40 bytes de tamanho, com isso, o tempo de tratamento utilizando o MTU 1500 passa de 94,3% para 93,18% e utilizando o MTU 9000 passa de 99% para 98,82%. Mesmo em se tratando do protocolo IPv6 o MTU 9000 tem um aproveitamento melhor que o MTU 1500.

Tabela 4 - Cabeçalhos TCP/IP sobre GbEth.

Componente	MTU 1500		MTU 9000	
	Bytes	Tempo(μs)	Bytes	Tempo (μs)
Espaço entre quadros	12	0,096	12	0,096
Delimitadores de Início de quadro	1	0,008	1	0,008
Preâmbulo	7	0,056	7	0,056
Cabeçalho Eth	14	0,112	14	0,112
Cabeçalho IP	20	0,16	20	0,16
Cabeçalho TCP	32	0,256	32	0,256
Payload	1448	11,58	8948	71,5
Porcentagem	-	94,3	-	99,0

O *Jumbo Frame* também pode trazer algumas desvantagens como a diminuição da eficiência da correção de erros no protocolo Ethernet (CRC-32) e o aumento do retardo na fila de espera para aplicações mais sensíveis, pois, os pacotes de menor tamanho teriam que aguardar maior tempo na fila até terminar a transmissão dos pacotes *Jumbo Frame*.

4.5

Latência e Taxa de Transmissão^{23 24}

Ao longo dos últimos anos, roteadores e switches com maior desempenho foram desenvolvidos, graças à tecnologia VLSI (*Very-Large-Scale Integration*), entretanto, as comunicações ópticas tiveram um desenvolvimento (de fibras, amplificadores e tipos de modulações) ainda maior.

Antes da utilização em massa de fibras ópticas para comunicações a longa distância, os enlaces de comunicação representavam um ponto de maior restrição do sistema de comunicação. Portanto, era comum se gastar mais processamento dos elementos de rede para melhorar o envio de informação através dos enlaces.

Agora, com o aprimoramento das tecnologias de comunicações ópticas, a banda de comunicação já não representa mais a maior parcela de restrição do sistema, ocorrendo uma inversão e sendo agora a capacidade de processamento dos elementos de rede a principal causa da restrição do tráfego.

Com o aumento de banda de transmissão, as redes mudaram fundamentalmente o seu funcionamento e também em suas características. As redes de taxas mais baixas, por exemplo, em uma rede na faixa de Mbps, o retardo de envio de uma informação se concentra na largura de banda, ou seja, quanto maior a banda, melhor será a transmissão, enquanto que em redes com taxas Gbps, o retardo se torna dependente apenas da distância e da velocidade da luz, sendo praticamente independente da taxa de transmissão utilizada.

Essa diferença pode ser evidenciada ao analisar a transmissão de um pacote de 1 Mb por uma rede de longa distância. Colocando-se um nó em Porto Alegre e outro em Fortaleza, ou seja, distantes por 4000 km, conectados por um enlace cuja taxa de transmissão é aumentada progressivamente de 1Kbps a 1Tbps.

O tempo total de transferência do arquivo pode ser obtido através da soma de duas parcelas, a primeira sendo o tempo de envio, que depende diretamente da taxa de transmissão do enlace, e a segunda sendo o tempo de propagação, que dependerá da distância e da velocidade da luz na fibra.

$$t_{tot} = t_{envio} + t_{propagação}$$

(10)

Portanto, para taxa de 1kbps teremos:

$$t_{tot} = \frac{10^6 b}{10^3 b/s} + \frac{4 \times 10^6 m}{23 \times 10^8 m/s} = 1000,02 \text{ s}$$

(11)

A figura 54 mostra os tempos para transmitir dois arquivos, um com 1 Mb e outro com 1 Gb em diferentes taxas de transmissão. É possível perceber que para o arquivo de 1 Mb, as taxas de transmissão até aproximadamente 10 Mbps o tempo de transmissão do arquivo tem como maior parcela o tempo de envio do arquivo e que a partir desse ponto o tempo de propagação passa a ser a maior parcela.

Acompanhando a curva do gráfico, também fica evidente que dependendo do tamanho do arquivo, haverá uma taxa de transmissão específica a partir da qual o tempo de propagação se torna de maior relevância, a curva tende a se tornar uma reta. E essa taxa de transmissão crítica é obtida quando o tempo de envio é igual ao tempo de propagação. Até esse ponto crítico, a redução do retardo na transmissão do arquivo pode ser feita reduzindo-se o tempo de envio, ou seja, aumentando a taxa de transmissão. A partir desse ponto o aumento na taxa de transmissão é irrelevante para se reduzir o tempo total.

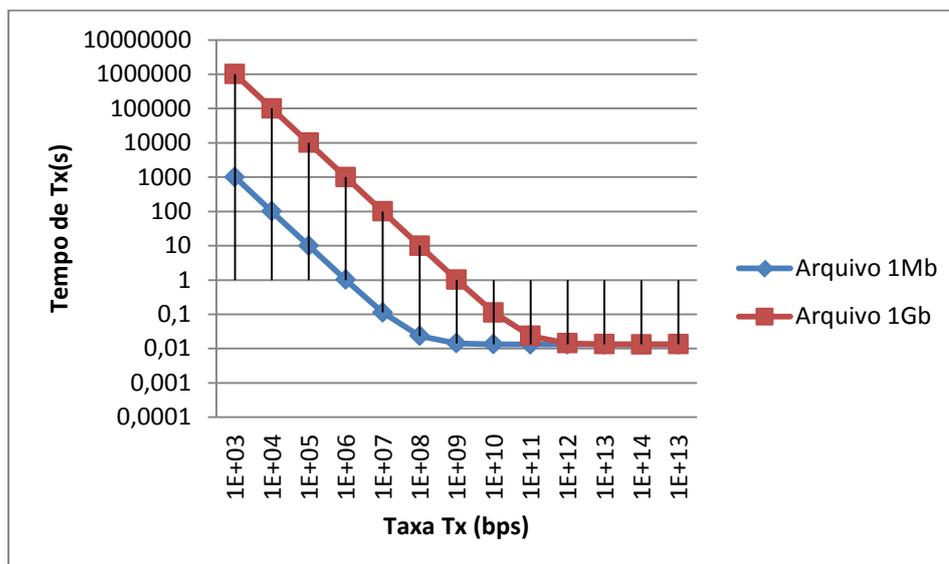


Figure 54 - Tempo de Transmissão.

Inicialmente, foi considerada a transmissão de um arquivo simples e com todos os recursos disponíveis para a execução dessa tarefa. Entretanto, se

considerarmos de forma mais realista, como em [24], deve ser utilizada a transmissão de pacotes no lugar da transmissão de um arquivo único, e esses recursos, tanto de processamento quanto de transmissão, por estarem constantemente sendo compartilhados por vários clientes devem ser analisados de forma probabilística. Também em [24] utilizou-se distribuição de Poisson como modelo de filas para a chegada dos pacotes a serem transmitidos.

Encontrando:

$$t_{tot} = \frac{1000P}{C(1-F)} + t_{propagação} \quad (12)$$

Onde, P é o tamanho do pacote, C a capacidade de transmissão do canal e F o percentual da taxa de transmissão compartilhado.

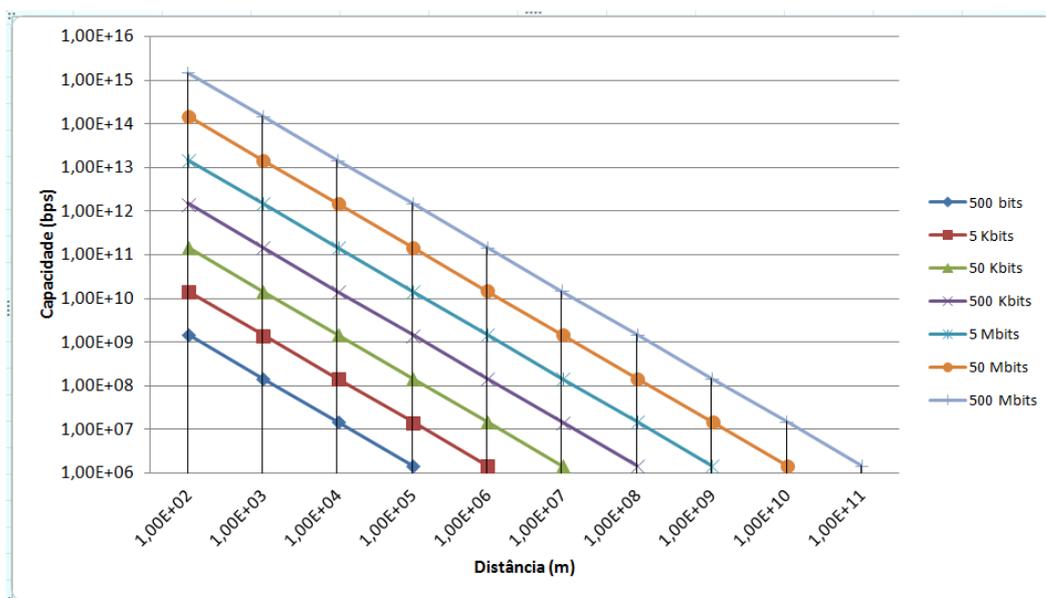


Figure 55 - Taxa de Tx, Distância e Tamanho de Pacote.

Na figura 55 foram plotados os valores de tamanho de pacote críticos para diversas conjunções de distância e taxas de transmissão. Por exemplo, dois nós distantes por 10 km e transmitindo à taxa de 1 Gbps terá um valor crítico para o tamanho de pacote de 50Kbits.

Com essa tabela é possível ver claramente a necessidade de aumentar o tamanho do pacote ao utilizar taxas de transmissão maiores. Por exemplo, se taxa de transmissão desses dois equipamentos for alterada para 10 Gbps e o tamanho do pacote for mantido em 50 Kbits o tempo total de transmissão dos dados terá

uma parcela maior de tempo dedicado à propagação do sinal na fibra, ou em outros termos, da latência.

Hoje os tamanhos de pacotes utilizados no padrão Ethernet 802.3, como citado anteriormente, é de 1500 bytes e em algumas aplicações de 9000 bytes, ou seja, 12kbits ou 72 kbits. Esses valores são utilizados sem maiores problemas em redes metropolitanas e *backbone*, com distâncias de enlaces em torno de 100 a 150 km.

Entretanto, para redes com taxa de transmissão de 100 Gbps, esses tamanhos de pacotes já apresentam ineficiência na utilização dos enlaces, pois o tempo total de transmissão está sendo dominado pela latência. Para essas novas redes, há a necessidade de se aumentar o tamanho dos pacotes para melhorar a eficiência da transmissão.

4.6

Perda de Pacotes durante interrupções

As redes de telecomunicações estão vulneráveis a danos causados por acidentes, efeitos da natureza, ações operacionais ou de manutenção, etc. que podem vir a interromper ou limitar o seu funcionamento normal, assim como acontece com outros tipos de redes de distribuição, por exemplo, as redes de fornecimento de energia e água.

Essas redes utilizam vários métodos de proteção e contingência do tráfego com o objetivo de evitar a interrupção dos serviços e nos casos em que isso não é possível, minimizar a quantidade de tráfego perdido e fazer a recuperação no menor tempo possível.

As interrupções de tráfego em redes ópticas podem ser originadas por diversas causas. Entretanto pode-se dividir em dois tipos de falhas bem específicos que são: as interrupções programadas e as não programadas.

As interrupções programadas são assim definidas por se tratarem de atividades de manutenção, reparo, ou implantação de novas características e que necessitam da interrupção parcial ou completa de determinados serviços para sua execução.

Nas interrupções programadas a extensão do impacto na rede é conhecida de antemão, ou seja, antes de ser realizada, sabe-se o quanto de tráfego será

interrompido e seus clientes são alertados sobre a falta de recursos naquele determinado período programado. Esse período no qual a interrupção programada é realizada é chamado de Janela de Manutenção (*Maintenance Window*).

Exemplos de atividades que podem gerar interrupções programadas são:

- Substituição de unidades (placas, módulos, cordões ópticos)
- Inserção de novos equipamentos
- Limpeza de conectores ópticos
- Alterações na topologia da rede
- Etc

As operadoras de telefonia tomam medidas para minimizar o impacto dessas atividades, agendando Janelas de Manutenção em horários de menor tráfego na rede, realizando comutações de tráfego para rotas que não serão afetadas durante o trabalho ou atuando de forma setorizada, concentrando a ação em determinadas áreas da rede.

Já as interrupções não-programadas são aquelas que ocorrem de forma inesperada, ou seja, sem conhecimento prévio da Operadora. Essas interrupções podem ser devastadoras, interrompendo serviços de abrangência interurbana ou até mesmo nacional e na maioria das vezes a sua recuperação é mais difícil podendo levar de minutos a semanas.

Essas interrupções não-programadas podem ser causadas por:

- Efeitos da natureza: descargas elétricas de raios, inundações, terremotos, etc
- Acidentes em rodovias
- Vandalismo
- Danos intencionais
- Falhas em unidades
- Falhas operacionais
- Etc.

Os programas de softwares utilizados nos equipamentos atuais são mais complexos, e a ocorrência de falhas (*bugs*) passa a ser maior, sendo também uma fonte de interrupção não programada e de grande impacto na rede.

Há estimativas de que redes interurbanas de grande escala sofram até 3 cortes de fibras anuais para cada 1000 milhas. E em uma rede com 30000 milhas de cabos pode vir a sofrer 90 cortes por ano^[27].

Em [25] verificou-se que 20% das interrupções ocorrem durante atividades programadas. Das falhas não planejadas, quase 30% são falhas que atingem múltiplos enlaces, comuns em rupturas de cabos ópticos e falha em equipamentos. Os 70% restantes das falhas não planejadas são contabilizados devido às falhas de links isolados.

Para as redes de altas taxas de transmissão a análise das interrupções, como tipos de proteções e tempos de recuperação são muito importantes visto que quanto maior a taxa de transmissão maior será a quantidade de informação enviada por segundo e em caso de falha maior será a perda de dados por segundo. Se considerarmos que as taxas de transmissão de backbone estão sendo aumentadas de 10 Gbps para 100 Gbps, isso nos diz que passaremos a ter uma perda de 100 Gb de informação a cada 1s de interrupção não recuperada, ou seja, um aumento expressivo na quantidade de informação perdida.

A tabela mostra os diferentes tipos de proteções aplicadas às redes de comunicação óptica têm tempos distintos de recuperação. As proteções mais eficientes quanto ao tempo de recuperação normalmente são as que exigem maior disponibilidade de banda de transmissão extra para recuperação do tráfego e, portanto, são as mais dispendiosas.

Tabela 5 - Tempo de recuperação de tráfego.

Proteção	Protocolo	Tempo de Recuperação do Tráfego	Percentual de utilização da banda
SNCP	SDH/SONET	20ms	50%
MSP 1+1	SDH/SONET	50ms	50%
MSSPRING	SDH/SONET	50ms	50%
GMPLS (SNCP)	ASON	20ms	50%
GMPLS (GR)	ASON	200ms	70%
Resilient Protection Ring	IP	50ms	50%
MPLS	IP		
Convergência	IP	x10min	-

Portanto, para redes de altas taxas de transmissão se faz necessário o uso de métodos dinâmicos de recuperação do tráfego, que restabeleçam o tráfego no menor tempo possível e menor dispêndio de recursos da rede. Esse cenário descreve bem os tipos de proteção MPLS e o GMPLS, pois utilizam protocolos de roteamento e distribuição de topologia, assim como a verificação de estado dos enlaces. E permitem a recuperação automatizada dos circuitos protegidos ainda que ocorram múltiplas falhas na rede. E de fato, esses protocolos em conjunto com o OTN têm sido utilizados preferencialmente nas novas redes implantadas nas grandes Operadoras no Brasil.

5

Conclusões

Devido à grande demanda de tráfego para as redes de telecomunicação nos dias atuais, novas tecnologias de transmissão de informação estão sendo estudadas e propostas para o aumento das taxas de transmissão. Com essas modificações nas redes de transmissão é necessário que se faça uma análise do comportamento dos protocolos tanto das redes de transmissão quanto das redes de acesso e de clientes.

Neste trabalho foram descritas algumas das tecnologias em comunicações ópticas que possibilitaram a ampliação da relação BxL (Banda de Transmissão x Distância) nos últimos anos, assim como foi feito um resumo do funcionamento dos protocolos de rede (TCP/IP e de transmissão).

Foram analisados os possíveis efeitos quanto ao retardo de transmissão, tamanho dos pacotes utilizados assim como a perda de pacotes durante interrupções. Desta análise realizada podemos destacar alguns tópicos:

- A capacidade de processamento nos roteadores é um parâmetro limitante do desempenho da rede para taxas de transmissão mais altas, pois é necessário que o nó execute o processamento dos pacotes, no mínimo, no mesmo tempo necessário para se receber o próximo pacote, e a utilização de MPLS aumenta o desempenho dessas redes, ao exigir menor capacidade de processamento para tratamento dos pacotes, além de garantir maior segurança para a rede.
- A quantidade de bytes reservados para contabilizar o número de datagramas TCP enviados é insuficiente. Pois, com o aumento do tamanho dos arquivos a fragmentação dos pacotes ocorre com maior frequência, e com o aumento da velocidade de linha esse contador de datagramas pode ser reiniciado, ainda que haja pacotes com a numeração anterior ainda trafegando na rede, ocorrendo duplicação de numeração de datagramas.
- O tamanho do MTU não foi alterado definitivamente nas modificações ocorridas no protocolo Ethernet, e portanto, ainda é

utilizado um valor padrão de 1500 bytes. Esse valor de MTU, para velocidades mais altas gera um aumento da fragmentação dos arquivos. Aumentando a fragmentação teremos como fator negativo o aumento de utilização de cabeçalhos, o que diminui a eficiência do roteador, que passa a perder mais tempo processando cabeçalhos do que dados de payload.

- Com o aumento de banda de transmissão, as redes mudaram fundamentalmente o seu funcionamento e também em suas características. As redes de taxas mais baixas, por exemplo, em uma rede na faixa de Mbps, o retardo de envio de uma informação se concentra na largura de banda, ou seja, quanto maior a banda, melhor será a transmissão, enquanto que em redes com taxas Gbps, o retardo se torna dependente apenas da distância e da velocidade da luz na fibra, sendo praticamente independente da taxa de transmissão utilizada.
- Para as redes de altas taxas de transmissão a análise das interrupções, como tipos de proteções e tempo de recuperação são fundamentais, visto que, quanto maior a taxa de transmissão maior será a quantidade de informação enviada por segundo e em caso de falha maior será a perda de dados por segundo.

Referências bibliográficas

1. AGRAWAL, Govind P.; “**Fiber-Optic Communications Systems**”, 3ed, John Wiley & Sons, Inc. 2002.
2. Couch, Leon W. II (1997). “**Digital and Analog Communications**”, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
3. J. M. Kahn, “**Modulation and Detection Techniques for Optical Communication Systems**”, Proc. of OSA Topical Meeting on Coherent Optical Technologies and Applications, paper number CThC1, Whistler, BC, June 28-30, 2006.
4. W.F. Giozza, E. Conforti, H. Waldman, “**Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas**”, Embratel, Makron Books, McGraw-Hill, 1991.
5. R.A. Linke, A. H. Gnauck, “**Coherent Lightwave Communications**”, Journal Lightwave Technology 6, 1988.
6. J. Yu, X. Zhou, “**Ultra-High-Capacity DWDM Transmission System for 100G and Beyond**”, IEEE Communications Magazine, , Março 2010.
7. T. J. Xia, S. Gringeri, M. Tomizawa, “**High-Capacity Optical Transport Networks**”, IEEE Communications Magazine, Novembro 2012.
8. http://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation
9. R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, G. H. Sasaki, “**Optical Networks, A Practical Perspective**”, 3ª Edição, Morgan Kaufman, 2010.
10. “**Sales Training, 40G and 100G, Optical Technology**”, Alcatel-Lucent, 2010.
11. “**The road to 100G Networking**”, Ciena, 2012.
12. C. E. S. Castellani, “**Análise de Sistemas Ópticos com Amplificadores Raman**”, UFES, Dep. Eng. Eletrica, 2007.
13. Y. J. Wen, J. Mo, Y. Wang, “**Advanced Data Modulation Techniques for WDM Transmission**”, IEEE Communications Magazine, August 2006.

14. L. F. G. Soares, G. Lemos, S. Colcher, **“Redes de Computadores, das LANs MANS e WANS às Redes ATM”**, 2ª Ed., Editora Campus, 1995.
15. J. F. Kurose, K. W. Ross, **“Redes de Computadores e a Internet: Uma abordagem Top-down”**, 5ª Ed., Editora Pearson, 2010.
16. A. S. Tanenbaum, **“Computer Networks”**, 5ª Ed., Editora Prentice Hall, 2010.
17. L. Goldin, L. Montini, **“Impact of Network Equipment on Packet Delay Variation in the Context of Packet-Based Timing Transmission”**, IEEE Communications Magazine, 2012.
18. H. Pun, **“Convergence Behavior”**, Master of Science Thesis, School of Engineering Science, Simon Fraser University, 2001.
19. Y. Tsegaye, T. Geberehana, **“OSPF Convergence Times”**, Master of Science Thesis, Dep. Computer Science and Engineering, Chalmers University of Technology, 2012.
20. N. Jerram, A. Farrel, **“MPLS in Optical Networks”**. Dataconnection Ltd. United Kingdom, Out, 2001. URL: <<http://www.dataconnection.com>>
21. **Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS)**. International Engineering Consortium URL: <http://www.iec.org>
22. D. Murray, T. Koziniec, K. Lee, M. Dixon, **“Large MTU and Internet Performance”**, School of Information Technology, Murdoch University, Australia, 2012.
23. L. Kleinrock, **“The Latency/Bandwidth Tradeoff in Gigabit Networks”**, IEEE Communications Magazine, Abril, 2012.
24. A. Podcameni, M. M. Mosso, C. B. Marcondes, J. Lopes, G. B. Leal, **“Multi-Gigabit Long-Distance Optical Links Need Large Data Packages”**, CETUC, PUC-Rio.
25. A. Markopoulou, G. Iannaccone, S. Bhattacharyya, C. Chuah, Y. Ganjali, C. Diot, **“Characterization of Failures in an Operational IP Backbone Network”**, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 16 N°4, Agosto 2008.
26. C. Labovitz, A. Ahuja, A. Bose, F. Jahanian, **“Delayed Internet Routing Convergence”**, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 9, N°3, June 2001.
27. VASSEUR, Jean-Philippe; PICKAVET, Mario; DEMEESTER, Piet. **“Network Recovery”**. Morgan Kaufmann, 2004.

Anexo A. Códigos MATLAB

O código a seguir foi desenvolvido para simular os sinais gerados pelas modulações ASK, FSK e PSK e são exibidas na fig. 3, no capítulo 2.1 desta Dissertação.

A1 – Modulações

```
clear all;
clc;
close all;
set(0,'defaultlinelinerwidth',2);
phi=pi;
A=3;
t=0:.001:1;
f1=30;
f2=5;
x=A.*sin(2*pi*f1*t);
subplot(5,1,1);
plot(t,x);
xlabel('t');
ylabel('Amplitude');
title('Portadora');
grid on;
u=A/2.*square(2*pi*f2*t)+(A/2);
subplot(5,1,2);
plot(t,u);
xlabel('time');
ylabel('Amplitude');
title('Pulsos');
grid on;
ask = x.*u/2.5;
```

```
subplot(5,1,3);
plot(t,ask);
axis([0 1 -6 6]);
xlabel('t');
ylabel('Amplitude');
title('Sinal ASK');
grid on;
fsk = A.*sin(2*pi*f1*t.*(u+1));
subplot(5,1,4);
plot(t,fsk);
axis([0 1 -6 6]);
xlabel('t');
ylabel('Amplitude');
title('Sinal FSK');
grid on;
psk=A.*sin(2*pi*f1*t+phi.*u);
subplot(5,1,5);
plot(t,psk);
axis([0 1 -6 6]);
xlabel('t');
ylabel('Amplitude');
title('Sinal PSK');
grid on;
```