

Gustavo Luvizotto Cesar

**Fundamentos do padrão OTN (*Optical  
Transport Network*)**

**São Carlos**

**2014**



Gustavo Luvizotto Cesar

## **Fundamentos do padrão OTN (*Optical Transport Network*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia de Computação

Universidade de São Paulo - USP

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Mônica de Lacerda Rocha

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Luvizotto Cesar, Gustavo  
Fundamentos do padrão OTN (Optical Transport  
LL9789 Network) / Gustavo Luvizotto Cesar; orientadora Monica  
f Lacerda Rocha. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)  
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, 2014.

1. redes ópticas. 2. OTN. 3. optical transport  
network. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome:** Gustavo Luvizotto Cesar

**Título:** “Fundamentos do padrão OTN (Optical Transport Network)”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido em** 19/11/2014.

**Comissão Julgadora:**

**Resultado:**

Profa. Dra. Mônica de Lacerda Rocha  
(Orientadora) - SEL/EESC/USP

APROVADO

Prof. Titular Amílcar Careli Cesar  
SEL/EESC/USP

APROVADO

Mestre Rafael Jales Lima Ferreira  
Doutorando - SEL/EESC/USP

APROVADO

**Coordenador do Curso Interunidades - Engenharia de Computação:**

Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues



*Este trabalho é dedicado aos meus pais, amigos e namorada, que sempre me ajudaram nos momentos difíceis durante toda a graduação*





# Agradecimentos

Meus agradecimentos são dirigidos à minha orientadora Mônica, que me acompanhou durante meu trabalho de graduação e profissional, me aconselhando e corrigindo para que eu pudesse alcançar meus objetivos com excelência.



# Resumo

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica sobre redes ópticas, tendo como referência principal o padrão ITU-T G.709 que define as redes OTN (*Optical Transport Network*). É descrito sua estrutura de quadro, cabeçalho e as formas de mapeamento e multiplexação de sinais cliente, estando ou não no padrão OTN. Ademais, são apresentadas as arquiteturas de redes ópticas em termos de topologia e elementos de rede, além das metodologias de proteção e das perspectivas sobre a próxima geração de OTN, ou NG-OTN (*Next Generation OTN*).

**Palavras-chaves:** redes ópticas. OTN. *optical transport network*.

# Abstract

This work consists of a literature review on optical networks, using as main reference the ITU-T G.709 standard which defines the OTN (Optical Transport Network). It's described its frame structure, header and ways of mapping and multiplexing of client signals, whether or not in the OTN standard. Moreover, it's explained the optical architectures in terms of network elements and topology, present protection methodologies and perspectives on next generation OTN (NG-OTN).

**Key-words:** optical network. OTN. optical transport network.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Hierarquia do padrão OTN. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) . . . . .	17
Figura 2 – Topologia em malha. Fonte: (GUMASTE; ANTONY, 2002) . . . . .	20
Figura 3 – Exemplo de rede ponto-a-ponto . . . . .	20
Figura 4 – Exemplo de rede em anel. Fonte: (GUMASTE; ANTONY, 2002) . . . . .	21
Figura 5 – Exemplo de rede em estrela . . . . .	22
Figura 6 – Exemplo de rede em árvore . . . . .	22
Figura 7 – Exemplo de rede em barramento . . . . .	23
Figura 8 – Exemplo de virtualização de uma rede em anel para uma rede em malha. . . . .	24
Figura 9 – Exemplo de uma rede WDM. Fonte: (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) . . . . .	26
Figura 10 – Linhas entrelaçadas do código FEC. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	28
Figura 11 – Estrutura básica do quadro OTUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	29
Figura 12 – Transmissão de um quadro OTU na rede. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	29
Figura 13 – Diagrama do misturador. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	30
Figura 14 – Estrutura básica do quadro ODUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	30
Figura 15 – Estrutura básica do quadro OPUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	31
Figura 16 – Estrutura dos bytes de alinhamento FAS. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	33
Figura 17 – Estrutura do cabeçalho dos quadros OTUk, ODUk e OPUk. . . . .	34
Figura 18 – Três bytes do SM do cabeçalho do quadro OTUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	35
Figura 19 – Campo PM do cabeçalho ODUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	37
Figura 20 – Estrutura dos campos TCMi, para $i = 1, 2, \dots, 6$ . Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	38
Figura 21 – Exemplo de uso do TCM. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	39
Figura 22 – Inserção de sinais clientes na rede OTN. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	43
Figura 23 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU0 em um ODU1. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	45
Figura 24 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU1 em um ODU2. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	46
Figura 25 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU0 e ODU1 em um ODU2. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	47
Figura 26 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU1 e ODU2 em um ODU3. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	47

Figura 27 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU0, ODU1 e ODU2 em um ODU3. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	48
Figura 28 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU0, ODU1, ODU2 e ODU3 em um ODU4. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	49
Figura 29 – Mapeamento do sinal STM-16 no quadro OPU1. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	50
Figura 30 – Mapeamento do sinal STM-64 no quadro OPU2. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	50
Figura 31 – Mapeamento do sinal STM-256 no quadro OPU3. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	50
Figura 32 – Estrutura do quadro concatenado OPUk-Xv. Fonte (G.709/Y.1331, 2012) . . . . .	51
Figura 33 – Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) . . . . .	53
Figura 34 – Esquema de proteção 1+1. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) . . . . .	53
Figura 35 – Esquema de proteção 1:1. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) . . . . .	54
Figura 36 – Esquema de proteção 1:N. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) . . . . .	54
Figura 37 – Esquema de proteção unidirecional para redes em anel. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) . . . . .	55
Figura 38 – Esquema de proteção bidirecional para redes em anel. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) . . . . .	56
Figura 39 – Histórico e perspectivas das redes OTN. Fonte (MIYAMOTO; SANO; KOBAYASHI, 2012) . . . . .	58
Figura 40 – Eficiência do uso da banda de transmissão em função do espaçamento WDM. Fonte (MIYAMOTO; SANO; KOBAYASHI, 2012) . . . . .	60

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipos e taxas de bit para o quadro OTU . . . . .	30
Tabela 2 – Tipos e taxas de bit para o quadro ODU . . . . .	31
Tabela 3 – Tipos e taxas de bit para o quadro OPU . . . . .	32
Tabela 4 – Valores dos últimos bits do byte TCMi para valores do STATi . . . . .	38
Tabela 5 – Interpretação dos bytes NJO e PJO a partir do byte JC . . . . .	41
Tabela 6 – Sinais clientes e os quadros OTN que os suportam . . . . .	59

# Lista de abreviaturas e siglas

ACT	Activation/deactivation control channel
AMP	Assynchronous Mapping Procedure
APS	Automatic Protection Switching coordination channel
BDI	Backward Defect Indication
BEI	Backward Error Indication
BIAE	Backward Incoming Alignment Error
DAPI	Destination Access Point Identifier
DMp	Path Delay Measurement
$DM_t$	TCM Delay Measurement
DSP	Digital Signal Processing
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing
EXP	Experimental
FAS	Frame Alignment Signal
FEC	Foward Error Correction
FTFL	Fault Types & Fault Location Reporting Communication Channel
FTTH	Fiber to the Home
GCCX	General Communication Channel X
GMP	Generic Mapping Procedure
IAE	Incoming Alignment Error
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JC	Justification Control
JOH	Justification Overhead
MFAS	Multiframe Alignment Signal



NG-OTN	Next Generation Optical Transport Network
NJO	Negative Justification Opportunity
OCh	Optical Channel
ODTUGk	Optical channel Data Tributary Unit Group k
ODTUjk	Optical channel Data Tributary Unit j into k
ODUk	Optical Channel Data Unit-k
OH	Overhead
OLT	Optical Line Terminal
OMS	Optical Multiplex Section
OPUk	Optical channel Payload Unit-k
OTH	Optical Transport Hierarchy
OTN	Optical Transport Network
OTS	Optical Transmission Section
OTUk	Optical channel Transport Unit-k
PCC	Protection Communication Control Channel
PJO	Positive Justification Opportunity
PM	Path Monitoring
PSI	Payload Structure Identifier
PT	Payload Type
PXC	Photonic Cross Connection
RES	Reserved for future international standardization
SAPI	Source Access Point Identifier
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SM	Section Monitoring
SNR	Signal-To-Noise Ratio
SONET	Synchronous Optical Networking

STM-N	Synchronous Transport Module level N
TCM	Tandem Connection Monitoring
TDM	Time-Division Multiplexing
TTI	Trail Trace Identifier
VCOH	Virtual Concatenation Overhead
WDM	Wavelength-Division Multiplexing



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>Arquitetura das redes ópticas</b>	<b>19</b>
2.1	Topologia	19
2.1.1	Redes ponto-a-ponto	20
2.1.2	Redes em anel	20
2.1.3	Redes em malha	21
2.1.4	Redes em estrela	21
2.1.5	Redes em árvores	22
2.1.6	Redes em barramento	22
2.2	Virtualização de topologias	23
2.3	Classificação dos tipos de redes	23
2.3.1	Redes de acesso	24
2.3.2	Redes metropolitanas	24
2.3.3	Redes de longa distância	24
2.4	Elementos das redes ópticas WDM	25
<b>3</b>	<b>Estrutura do quadro no padrão OTN</b>	<b>27</b>
3.1	O código corretor de erros	27
3.2	O quadro OTUk	28
3.3	O quadro ODUk	30
3.4	O quadro OPUk	31
<b>4</b>	<b>Cabeçalho e processamento dos quadros OTN</b>	<b>33</b>
4.1	Alinhamento dos quadros	33
4.2	Cabeçalho do quadro OTUk	34
4.2.1	SM ( <i>Section Monitoring</i> )	34
4.2.2	GCC0 ( <i>General Communication Channel 0</i> )	35
4.3	Cabeçalho do quadro ODUk	36
4.3.1	PM ( <i>Path Monitoring</i> )	36
4.3.2	TCM ACT ( <i>Tandem Connection Monitoring Activation/deactivation control channel</i> )	37
4.3.3	TCM ( <i>Tandem Connection Monitoring</i> )	37
4.3.4	FTFL ( <i>Fault Types &amp; Fault Location reporting communication channel</i> )	39
4.3.5	EXP ( <i>Experimental</i> )	39
4.3.6	GCC1 e GCC2 ( <i>General Communication Channel 1 and 2</i> )	39
4.3.7	APS/PCC ( <i>Automatic Protection Switching coordination channel/ Protection Communication Control channel</i> )	40

4.4	Cabeçalho do quadro OPUk . . . . .	40
4.4.1	PSI ( <i>Payload Structure Identifier</i> ) . . . . .	40
4.4.2	JC ( <i>Justification Control</i> ), NJO ( <i>Negative Justification Opportunity</i> ) e PJO ( <i>Positive Justification Opportunity</i> ) . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Mapeamento e multiplexação . . . . .</b>	<b>42</b>
5.1	Mapeamento e multiplexação dos sinais . . . . .	42
5.2	Mapeamento de um sinal STM-N para um OPUk . . . . .	48
5.2.1	Mapeamento de um STM-16 em um OPU1 . . . . .	49
5.2.2	Mapeamento de um STM-64 em um OPU2 . . . . .	50
5.2.3	Mapeamento de um STM-256 em um OPU3 . . . . .	50
5.3	Concatenação virtual de quadros OTN . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Mecanismos de proteção . . . . .</b>	<b>52</b>
6.1	Esquemas de proteção de uma rede óptica . . . . .	52
6.1.1	Proteção 1+1 . . . . .	53
6.1.2	Proteção 1:1 . . . . .	54
6.1.3	Proteção 1:N . . . . .	54
6.1.4	Proteção unidirecional em anel . . . . .	55
6.1.5	Proteção bidirecional em anel . . . . .	55
6.1.6	Proteção de uma rede em malha . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Evolução das redes OTN . . . . .</b>	<b>58</b>
7.1	Motivação . . . . .	58
7.2	Surgimento da NG-OTN . . . . .	59
<b>8</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>63</b>

# 1 Introdução

A demanda atual por acesso à informação, no que diz respeito ao uso residencial, empresarial e móvel, trouxe a necessidade por banda larga de altas taxas de transmissão. O mercado de telecomunicações é ligado a outros setores como a publicidade sobre as redes sociais, vídeos em canais de internet, planos de telefonia, os quais propõe pacotes com comunicação de voz e dados (internet) e de televisão. Uma matéria publicada no jornal Folha de S. Paulo, em 2013, aponta que, somente no Brasil, espera-se um aumento de 54,2% no número de conexões banda larga até o ano de 2017 <sup>1</sup>, segundo relatório semestral da Cisco em conjunto com o IDC - *Institute for Development and Communication*, da Índia. Com isso, faz-se necessário o emprego de uma tecnologia que transporte essa quantidade de informação com qualidade, confiabilidade, segurança e rapidez.

O elemento chave nesse cenário que, a cada dia se torna mais complexo e próximo dos limites da capacidade das infraestruturas estabelecidas, são as redes ópticas. O uso das fibras ópticas, desenvolvidas na década de 1970, foi rapidamente difundido no mundo todo devido às vantagens sobre o fio de cobre. A primeira e mais notória é a alta taxa que se pode atingir na transmissão de sinais digitais. A segunda são as menores perdas na comunicação por fibra em termos da taxa de erro de bits (BER ou *Bit Error Rate*).

As redes ópticas evoluem tendo como base intensas atividades na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias inovadoras, bem como a contínua iniciativa de órgãos de padronização agrupados na camada óptica de transmissão. O principal órgão de padronização é o ITU, *International Telecommunication Union*, através do setor ITU-T, *ITU Telecommunication Standardization Sector*, surgido em 1865, cuja sede é localizada em Genebra, na Suíça <sup>2</sup>, o qual cria recomendações como a usada neste trabalho G.709.

As redes OTN (*Optical Transport Network*) são composta de uma série de elementos de rede, conectados por enlaces de fibra, capazes de prover funcionalidades de transporte, multiplexação, roteamento, gerência, supervisão e sobrevivência dos canais ópticos transportando sinais de clientes, de acordo com as definições das recomendações do ITU-T. O padrão ITU-T G.709 é um dos mais importantes das tecnologias que governam o transporte de dados através da internet. Trata-se de uma evolução dos padrões *Synchronous Optical Network/Digital Hierarchy* (SONET/SDH),

<sup>1</sup> <<http://www1.folha.uol.com.br/tec/2013/10/1364033-banda-larga-no-brasil-crescera-542-em-quatro-anos-diz-cisco.shtml>>, Acesso em 03 jul. 2014

<sup>2</sup> <<http://www.itu.int/en/ITU-T/about/Pages/default.aspx>>, Acesso em 03 jul. 2014

o qual elimina questões não diretamente relacionadas a dados, que era já firmado por esses padrões, como apresentado em (GUMASTE; KRISHNASWAMY, 2010). É o padrão para tratar o futuro das telecomunicações, podendo ser usado como uma tecnologia para apoiar serviços emergentes como portadoras Ethernet e serviços na nuvem (*cloud services*), ideal para substituição do SONET/SDH.

As redes ópticas possuem uma hierarquia em camadas que pode ser visto na Figura 1. A seção de transmissão (*Optical Transmission Section* ou OTS), multiplexação (*Optical Multiplexed Section* ou OMS) e canal óptico (*Optical Channel* ou OCh) estão no domínio óptico. São responsáveis por gerenciar os segmentos de enlace entre componentes ópticos. Serão abordados neste trabalho no contexto de proteção de redes ópticas. As camadas de transporte (*Optical channel Transport Unit* ou OTU), de dados (*Optical channel Data Unit* ou ODU) e de carga ou *payload* (*Optical channel Payload Unit* ou OPU) são responsáveis por delinear os quadros, prover informações da conexão, monitorar a taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* ou BER), transportar alarmes que indicam falhas nos sinais, estabelecer uma comunicação fim-a-fim entre nós em uma rede e disponibilizar monitoramento de conexão em cascata. São essas camadas o enfoque desta monografia.

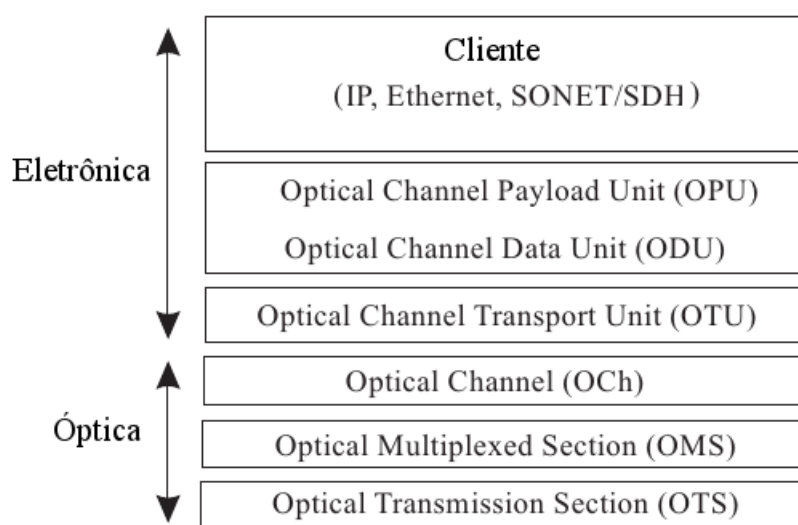


Figura 1 – Hierarquia do padrão OTN. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010)

## Estrutura do trabalho

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica sobre redes ópticas, principalmente sobre as redes OTN. As referências essenciais usadas foram a recomendação da ITU-T (G.709/Y.1331, 2012) para descrever a estrutura do quadro OTN, seu cabe-

çalho e as formas de mapeamento e multiplexação de sinais cliente estando ou não neste padrão como o Ethernet por exemplo, (GUMASTE; ANTONY, 2002) utilizado para explicar as arquiteturas de redes ópticas, (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010) para apresentar metodologias de proteção de redes ópticas e (MIYAMOTO; SANO; KOBAYASHI, 2012) para apresentar as idéias do futuro das redes OTN.

No Capítulo 2 serão apresentadas algumas topologias para as redes ópticas, tais como ponto-a-ponto, anel e malha totalmente conectada. Mostrará também como reproduzir uma virtualização dessas topologias. Além disso, serão explicados as funcionalidades e papel de alguns elementos comuns nas redes.

No Capítulo 3 serão apresentados os diferentes quadros presentes no padrão OTN. Os quadros OTUk, que são compostos por um cabeçalho descrito no Capítulo 4, de um quadro ODUk e de bits que representam o código de correção de erro, FEC (*Forward Error Correction*), os quadros ODUk e OPUk, além de apresentar suas taxa nominais de transmissão de quadro.

No Capítulo 4 serão apresentadas a estrutura do cabeçalho dos quadros OTUk, ODUk e OPUk, os quais contém informações de suporte e manutenção do transporte e operação dos sinais e canais ópticos dos clientes.

No Capítulo 5 será estudado a maneira com que os sinais clientes, provindos de operadoras de telefonia por exemplo, serão introduzidos na rede óptica utilizando o padrão OTN. São apresentados os mapeamentos e multiplexação desses sinais para dentro da rede OTN até estarem contidos nos quadros OTUk.

No Capítulo 6 serão introduzidos formas de proteger uma rede óptica, seja ela do tipo SONET, SDH ou do padrão aqui estudado, a qual ocorre na camada óptica (OMS e OCh). As camadas apresentadas neste Capítulo serão tratadas apenas no contexto da proteção das redes ópticas, suas configurações e funcionalidades.

Por fim, no Capítulo 7 serão apresentados os novos desafios das redes ópticas de transporte, as perspectivas acerca do seu futuro e as taxas que serão alcançadas com o desenvolvimento dessas redes.



## 2 Arquitetura das redes ópticas

Neste capítulo, serão mostrados algumas topologias para as redes ópticas, como ponto-a-ponto, anel e malha totalmente conectada. Será apresentado também como reproduzir uma virtualização dessas topologias. Além disso, serão abordados alguns elementos comuns nas redes e suas funcionalidades. Outrossim, mecanismos de proteção dessas redes serão abordados no Capítulo 6.

### 2.1 Topologia

As topologias das redes estão ligadas à geografia da localidade em que se deseja instalá-las, do investimento que se pode fazer e de suas características ópticas. Porém, para atender à essas especificações, têm-se alguns modelos já conhecidos e estudados das redes tradicionais de computadores que podem ser conduzidos ao contexto das redes ópticas. São eles, as conexões ponto-a-ponto, anel e malha.

Na Figura 2 é representado uma topologia em malha, a qual se caracteriza pela interconexão entre todos seus nós. Cada nó representa uma localidade geográfica diferente onde estão os equipamentos ópticos e ligados através de um ramo, que nesse caso é a fibra óptica (única ou dupla, dependendo do tráfego). A topologia de uma rede se assemelha a um grafo não-direcionado, quando usa-se comunicação de duas vias (*half-duplex* para fibra única ou *full-duplex* para duas fibras), e direcionado quando são usados apenas uma fibra (*simplex*). O grau da conectividade irá depender do número de nós presentes na rede. O grau representa o número de saltos ou *hops* máximo necessários para alcançar um nó na rede. Para este exemplo, o grau é  $N-1$  (três), onde  $N$  é o número de nós presentes (quatro nesse caso), como apresentado em (GUMASTE; ANTONY, 2002).

Segundo (TANENBAUM, 2003), uma conexão que permite o tráfego de informação em duas vias (ambos sentidos) e de maneira simultânea é chamado de *full-duplex*, como acontece, por exemplo, em um metrô onde há trens indo e vindo de uma estação a outra. Quando o tráfego de dados pode ser feito em dois sentidos porém, um por vez, é chamado então de *half-duplex*, assim como acontece em uma estrada de uma ferrovia onde apenas um trem pode ir ou vir. Uma conexão é dita *simplex* quando os dados trafegam em apenas uma direção, assim como acontece quando há um transmissor óptico em uma extremidade de uma fibra e um receptor óptico em outra.

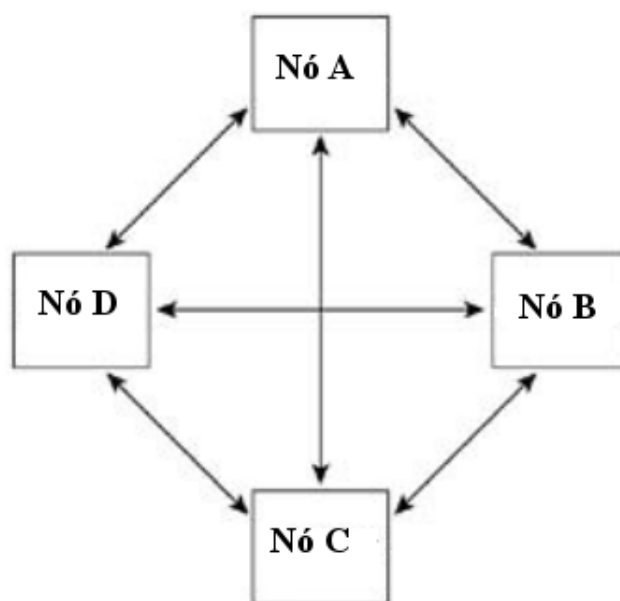


Figura 2 – Topologia em malha. Fonte: (GUMASTE; ANTONY, 2002)

### 2.1.1 Redes ponto-a-ponto

Nas redes ponto-a-ponto, dois ou mais nós são interligados por uma ou mais fibras. Neste tipo de rede, haverá a necessidade do dado de um nó fonte passar por toda a rede até chegar no nó de destino em casos onde a comunicação é realizada entre as extremidades. Caso um nó na rede caia, o tráfego por toda a rede é interrompido. Um exemplo de rede ponto-a-ponto pode ser visto na Figura 3.

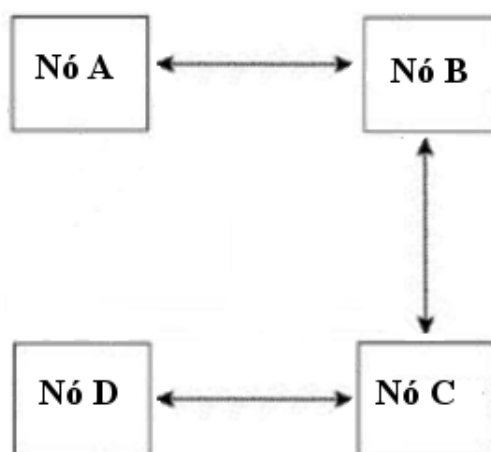


Figura 3 – Exemplo de rede ponto-a-ponto

### 2.1.2 Redes em anel

Neste tipo de configuração, os nós são interconectados em série, formando um circuito fechado (cada nó se conecta com dois outros nós). O tráfego de dados pode ser

feito de forma unidirecional ou bidirecional. Como descrito em (GUMASTE; ANTONY, 2002), o sinal pode percorrer um *lightpath* na rede (descrito na seção 2.2), passando por repetidores de sinal em cada estação (nó), da fonte até o destino, sofrendo menos distorção e atenuação no enlace. Um exemplo de topologia em anel pode ser visto na Figura 4.

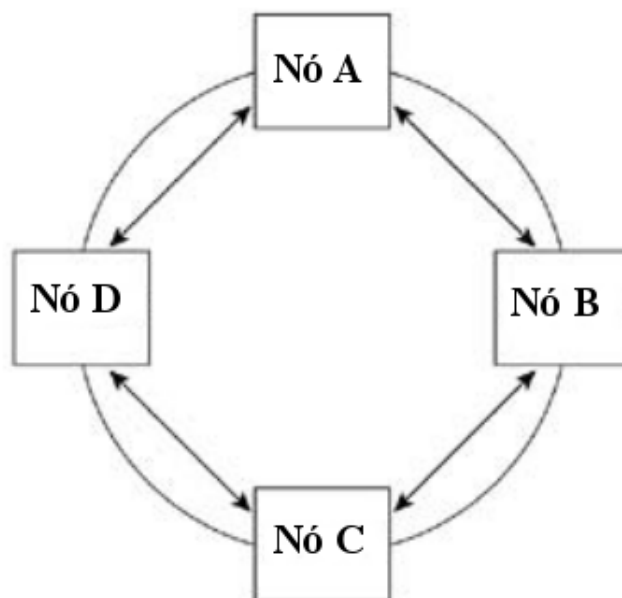


Figura 4 – Exemplo de rede em anel. Fonte: (GUMASTE; ANTONY, 2002)

### 2.1.3 Redes em malha

As redes em malha assemelham-se a grafos. Quando há uma malha totalmente conectada, todos os nós presentes são ligados, como se estivessem entrelaçados. Eventuais problemas com interrupção na conexão não afetam tanto esse tipo de rede já que são vários os possíveis caminhos que o dado pode percorrer. O maior problema que torna este tipo de rede praticamente inviável (todos os nós conectados) é o custo com infraestrutura e fibras ópticas. Uma rede em malha totalmente conectada pode ser visto na Figura 2.

### 2.1.4 Redes em estrela

Nas redes em estrela, os nós são conectados ponto-a-ponto a um *hub* central, que pode ser um *hub* de rede, um *switch* ou um roteador. Todo o tráfego da rede passa pelo nó central, que atua como um repetidor de sinais. A vantagem desta topologia é sua simplicidade para adicionar-se novos nós, porém sua desvantagem é se o *hub* falhar, toda a rede será perdida. Na Figura 5 é apresentado um exemplo de rede em estrela.

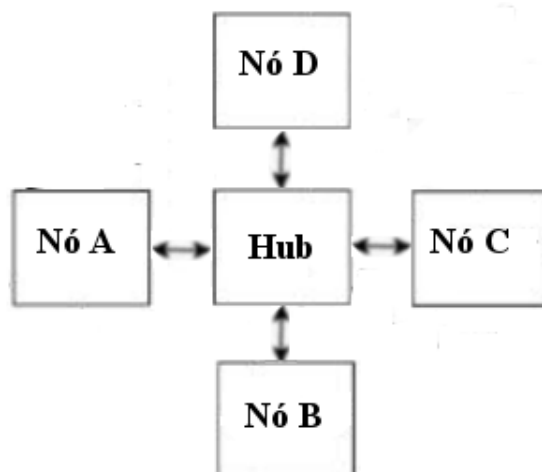


Figura 5 – Exemplo de rede em estrela

### 2.1.5 Redes em árvores

As redes em árvores se assemelham a estrutura de dados de árvore, onde há nós raiz, intermediários e folhas. A raiz e os nós intermediários são *hubs*, *switchs* ou roteadores e as folhas são os terminais de acesso. Logo, essa topologia é usada nas redes de acesso, que será apresentada na subseção 2.3.1. A Figura 6 mostra um exemplo de rede em árvore.

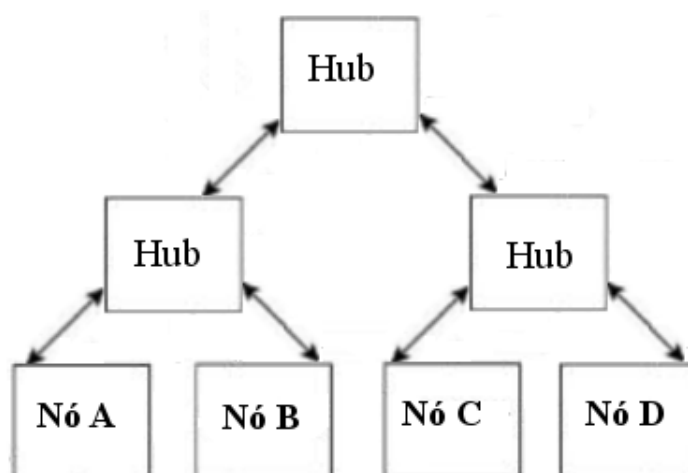


Figura 6 – Exemplo de rede em árvore

### 2.1.6 Redes em barramento

Usada em redes locais de acesso, a topologia em barramento é realizada conectando-se cada nó da rede em um único cabo, que pode ser chamado de *backbone*. Um nó que deseja se comunicar com outro envia uma mensagem à todos (*broadcast*) pelo cabo sendo que os outros nós podem visualizá-la, porém apenas o nó de destino aceita e processa a mensagem. Na Figura 7 é apresentada um exemplo de topologia em

barramento. Pode ser usado como exemplo também se considerar uma rede Ethernet local onde os terminais de acesso utilizam um meio compartilhado.

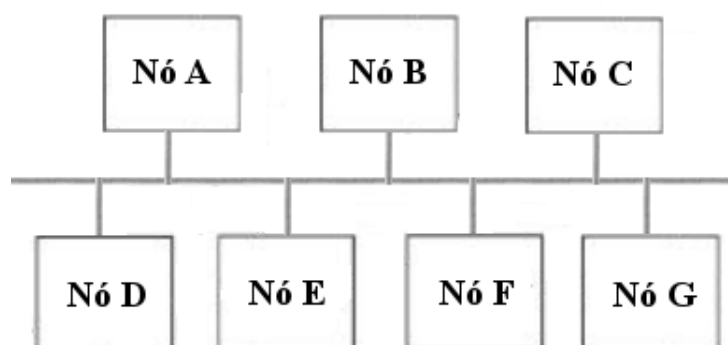


Figura 7 – Exemplo de rede em barramento

## 2.2 Virtualização de topologias

Em algumas aplicações, deseja-se ter um determinado tipo de topologia para acesso mais rápido a um nó específico. Porém, nem sempre isso é possível, como visto na subseção 2.1.3. Logo, iniciou-se o uso de virtualização para se conseguir uma rede em malha quando se tem uma rede em anel, por exemplo. Para obter tal resultado, o dado percorre o caminho óptico ou, como é mais conhecido, um *lightpath*. Na Figura 8, tem-se à esquerda uma rede física em anel e na direita a rede virtual desejada, em malha. Para se criar um *lightpath* é escolhido um comprimento de onda disponível nos nós intermediários. Por exemplo entre os nós fonte A e destino C têm-se o nó B. Atuando apenas como um nó passageiro, é então configurado a interface do nó B para que não haja bloqueio naquele comprimento de onda escolhido. Costumeiramente não é tão fácil escolher um comprimento de onda tendo em vista sua limitação de quantidade, como citado em (GUMASTE; ANTONY, 2002).

## 2.3 Classificação dos tipos de redes

As redes são classificadas em três categorias correspondentes ao seu tamanho e funcionalidade. Tem-se as redes de acesso, as redes metropolitanas e as redes de longa distância, também chamadas de *long-haul* e ultra longa distância, chamadas de *ultra long-haul*, caracterizadas por redes submarinas e intercontinentais. Cada rede será estudada nas subseções seguintes, segundo (GUMASTE; ANTONY, 2002).

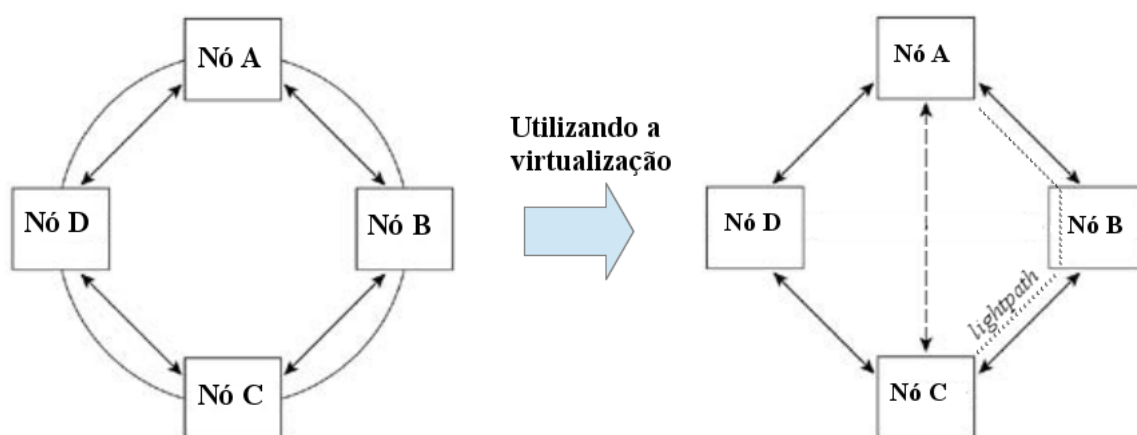


Figura 8 – Exemplo de virtualização de uma rede em anel para uma rede em malha.

### 2.3.1 Redes de acesso

Uma rede de acesso se caracteriza por conectar os usuários finais a um roteador de borda, o qual fará conexão com outras redes mais distantes, partindo de um sistema final até outro. Esses usuários podem ser tanto empresas quanto pessoas físicas. Pode-se dizer que as redes de acesso foram as que mais cresceram nos últimos anos devido à necessidade de se prover acesso à internet, com preços e planos acessíveis. Usam as topologia em barramento, estrela ou árvore. Podem contemplar um ou dois *hubs* (terminais de interface de acesso à rede) para uma rede metropolitana, sendo que a segunda serviria como proteção caso a primeira falhe (quando há dois *hubs*).

### 2.3.2 Redes metropolitanas

Possui extensão de alcance para interligar estados e cidades, por exemplo, e sua topologia pode ser em anel ou em malha. São tratadas como *multi-hub* pois possuem tanto *hubs* de interface com redes *long-haul* quanto com redes de acesso. É factível transportar até 40 comprimentos de onda num enlace desta rede.

### 2.3.3 Redes de longa distância

Nas redes *long-haul*, estados ou até países podem ser conectados através da fibra óptica, obtendo taxas de erro de bit próximas a zero. Podem assumir a topologia, ponto-a-ponto ou também anel. É necessário que haja regeneradores ópticos (descrito na seção 2.4) em cada terminal (nó) e em pontos intermediários do enlace, assim como amplificadores, para manter a qualidade e integridade do sinal entre os *sites*. O *site* é o local que abriga os equipamentos necessários para conectar as placas de transmissão, recepção, manutenção e multiplexação/demultiplexação de sinais ópticos.

As redes submarinas são utilizadas para a transmissão de dados entre continentes. São redes ponto-a-ponto que possuem repetidores ao longo do trajeto para garantir o nível de potência e de qualidade do sinal até o destino. São denominadas de *ultra long-haul*.

## 2.4 Elementos das redes ópticas WDM

Os nós, tratados assim até agora, das redes ópticas são *sites* que compõem uma determinada rota. Aqui serão citados alguns exemplos de placas e suas funcionalidades na rede, conforme descrito em (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010).

**Transponder** Responsável por fazer a conversão de um sinal digital óptico no transmissor para um sinal digital eletrônico e na receptor fazendo o processo inverso em um dos canais da grade DWDM (*Dense Wavelength-Division Multiplexing*) utilizando, em geral, a modulação NRZ (*non return to zero*), RZ (*return to zero*), QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*) ou QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), por exemplo. Podem ser: **terminais**, presentes nas interfaces com o cliente e chamados também de terminais de linha (OLT do inglês *Optical Line Terminal*), **combinadores**, que realizam multiplexação de vários sinais em um único sinal OTU, ou **regeneradores**, do tipo 2R de Regenerar e Reformatar e do tipo 3R, incluindo a retemporização do sinal.

**Amplificador** Responsável por amplificar o sinal óptico na rede. Existem os amplificadores cujas funcionalidades são de **booster**, usados no início de um enlace, do tipo **linha**, que possuem dois estágios de amplificação e são usados ao longo da linha de transmissão do enlace, do tipo **pré-amplificador**, que são utilizados como último elemento amplificador nos sinais que chegam em um enlace provindo de outro enlace. Podem utilizar de algumas técnicas de amplificação como do efeito **Raman** ou por fibra dopada por érbio (EDFA ou *Erbium Doped Fibre Amplifier*).

**Multiplexador** Provê a multiplexação de vários canais ópticos para trafegarem em apenas uma fibra. Pode ser construído com atenuador óptico variável em cada entrada, viabilizando a equalização dos canais.

**Demultiplexador** Provê a separação dos vários canais DWDM provindos de uma única fibra na entrada para várias interfaces na saída.

**OADM** O *Optical Add-Drop Multiplexer* permite a derivação e adição de um determinado número de canais ópticos. Comumente é utilizado para adicionar e remover canais de supervisão de uma rede DWDM.

**OXC** O *Optical Crossconnect* é o elemento de rede que permite controlar redes mais complexas, como em malha por exemplo, e mais comprimentos de ondas, funcionando como um *hub* para os sinais que chegam e que saem dos transponders. É similar ao OADM, porém com maior capacidade de carga.

**Supervisor** Elemento responsável por enviar comandos às unidades gerenciáveis. Permite trocar informações com outros *sites* através de um comprimento de onda específico.

**Chave Óptica** Responsável por comutar automaticamente rotas baseado na queda de potência do sinal da entrada. Trata-se de um elemento de proteção de um enlace óptico.

Na Figura 9, é apresentado um exemplo de rede em malha. Mostra-se a formação de um *lightpath* através de  $\lambda_2$ . Pode-se ver OADM's ligados em anéis (trapézios em cinza claro), permitindo a inserção de sinais clientes na rede. Há também, nos triângulos em cinza, os transponders, multiplexadores e amplificadores, que transportam os sinais de uma região a outra. Por fim, os OXC (quadrados em cinza escuro) interligando as diversas rotas da rede.

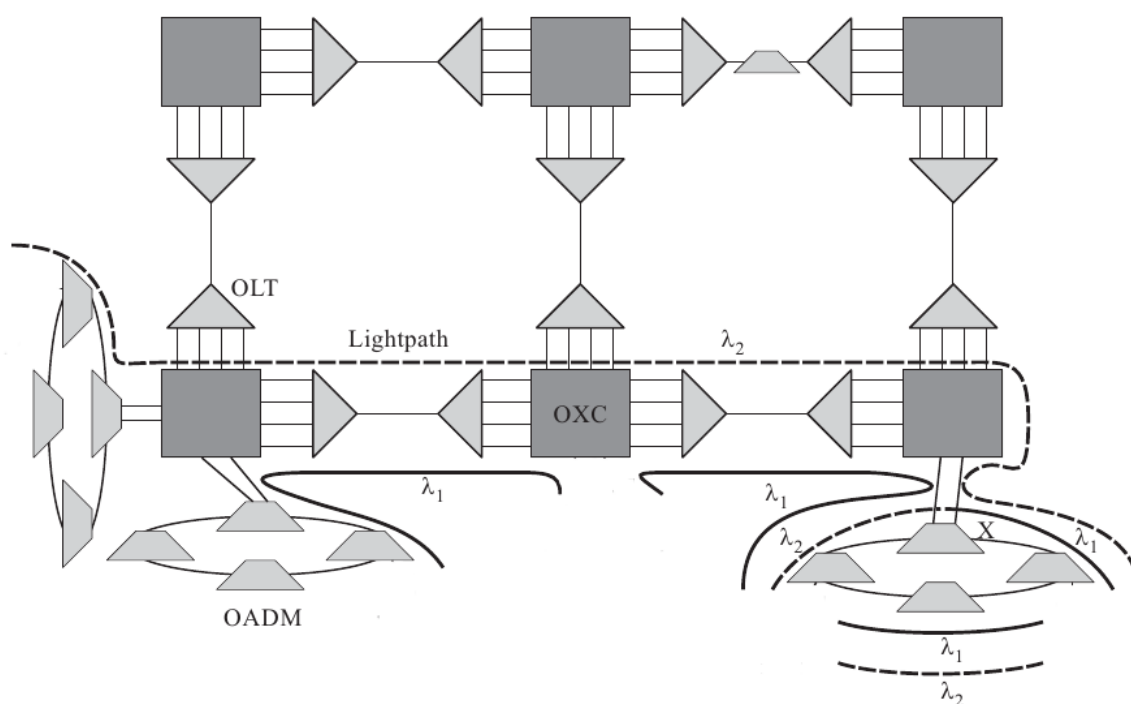


Figura 9 – Exemplo de uma rede WDM. Fonte: (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010)



## 3 Estrutura do quadro no padrão OTN

Neste capítulo, serão apresentados os diferentes quadros presentes no padrão OTN, a saber OTUk (*Optical channel Transport Unit-k*), ODUk (*Optical channel Data Unit-k*) e OPUk (*Optical channel Payload Unit-k*). Os quadros OTUk são compostos por um cabeçalho descrito no Capítulo 4, de um quadro ODUk e de bits que representam o código de correção de erro, FEC (*Forward Error Correction*). O quadro ODUk possui seu cabeçalho um quadro OPUk. No quadro OPUk, há uma área de *payload* (carga útil) e outra contendo seu cabeçalho. O referencial “k”, para o OTU vale  $k = 1, 2, 3$  ou  $4$  e para ODU e OPU vale  $k = 0, 1, 2, 3$  ou  $4$ . Com essa estrutura, o padrão OTN fornece recursos como monitoramento de conexão em cascata, monitoramento de desempenho fim-a-fim e supervisão da qualidade do sinal transportado.

### 3.1 O código corretor de erros

Um dos recursos mais importante que o padrão OTN possui é o módulo FEC, obtido através de um esquema de 16 bytes intercalados. Demandam de um campo de  $4 \times 256$  bytes, ou 1024 bytes, do quadro OTUk e faz referência a cada quadro ODUk transportado. Com a utilização do FEC, é possível alcançar um ganho de até 6,2 dB na relação sinal-ruído, diminuindo a taxa de erro de bit de, por exemplo,  $10^{-5}$  para  $10^{-15}$ . Com o ganho na qualidade do sinal oferecido pelo FEC, torna-se possível:

- O aumento do espaçamento entre regeneradores ou do número de enlaces sem regeneração, resultando num maior alcance do sinal;
- O aumento do número de canais DWDM no sistema, diminuindo a potência de cada canal e inserindo outros canais;
- A transparência nas redes ópticas. Os elementos transparentes, como OADM e OXC, introduzem penalidades na qualidade do sinal da rede, mas que são reduzidas utilizando-se FEC.

O FEC utilizado no padrão OTN implementa o código Reed-Solomon, especificado como  $RS(n, k)$ , onde  $n$  é o tamanho dos símbolos (para uma palavra-chave de 8 bits  $n = 2^8 - 1 = 255$  bytes), e  $k$  é o número de símbolos não redundantes transmitidos, totalizando  $k = 239$  bytes (16 bytes de redundância). O código de correção é inserido em um *encoder*, o qual é transmitido através do quadro OTUk na rede e é captado por um *decoder* na recepção. Nos quadros OTUk, para  $k = 1, 2$  ou  $3$ , o corretor de erros

é opcional, enquanto que para  $k = 4$  torna-se obrigatório. Logo, o campo designado para o FEC quando não for usado é preenchido com bits 0 e os equipamentos da rede devem necessariamente detectar quando isso ocorre.

O código Reed-Solomon é baseado nos símbolos. Pode detectar e corrigir erros em todos os bits de um símbolo tão facilmente quanto em um único bit errado de um símbolo. Para aumentar a sua eficácia, intercala-se os dados de diferentes palavras-chave, devido ao fato de que o efeito de longas cadeias de bits errados são compartilhadas ao longo de outras palavras-chave. Com isso, espalha-se o impacto desse ruído sobre múltiplos símbolos provindos de várias palavras-chave.

O funcionamento do FEC se baseia na divisão de uma linha do quadro OTU em 16 outras linhas, intercalando-se os bytes, assim como indicado na Figura 10. Os bytes de checagem de paridade (redundância do corretor de erros) são calculados a partir dos bytes de informação, colunas 1 a 239, e transmitidos pelos bytes de 240 à 255.

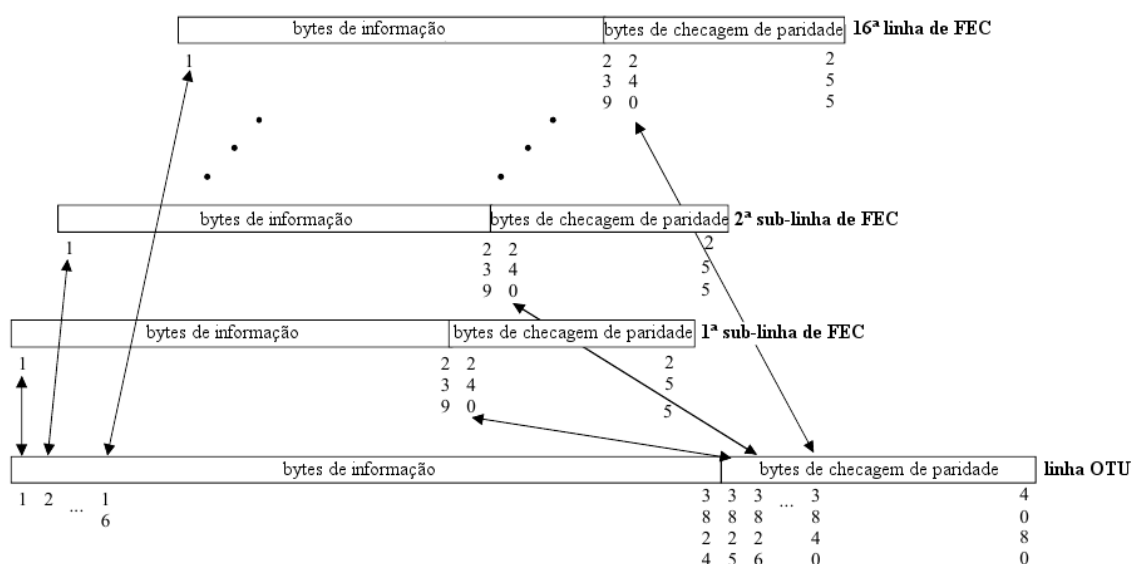


Figura 10 – Linhas entrelaçadas do código FEC. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

### 3.2 O quadro OTUk

Na Figura 11 é apresentada a estrutura básica do quadro OTUk, para  $k = 1, 2, 3, 4$ . Incorpora o quadro ODUk na sua estrutura, definido na seção 3.3. É formado por 4 linhas e 3824 colunas acrescidos de 256 colunas dedicadas ao código FEC. O cabeçalho do quadro OTU está na primeira linha, da coluna 8 à 14 e, das colunas 1 à 7, têm-se o alinhamento de quadro, FAS (*Frame Alignment Signal*) e de multiquadro, MFAS (*Multiframe Alignment Signal*). Em cada byte, o bit mais significativo (MSB - most significant bit) é o bit 1 e o bit menos significativo (LSB - less significant bit) é o bit 8.

A transmissão dos bits se dá da esquerda para a direita, de cima para baixo, conforme Figura 12.

A taxa de bits do quadro OTU1 é 255/238 da taxa do STM-16 (*Synchronous Transport Module level N* é o quadro básico do padrão *Synchronous Digital Hierarchy* ou SDH). Já em OTU2, a taxa vai para 255/237 vezes a taxa de 4 vezes o STM-16. Em OTU3, a taxa sobe para 16 vezes 255/236 vezes STM-16. Por fim, em OTU4, sua taxa é de 40 vezes 255/227 vezes STM-16. Na Tabela 1 pode-se ver as taxas de bits e a tolerância de falha de bits do quadro OTU<sub>k</sub>, para  $k = 1, 2, 3, 4$ .

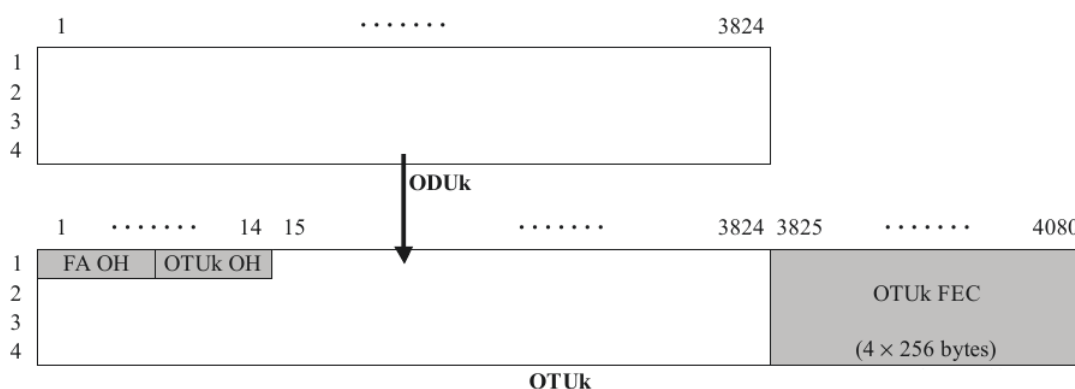


Figura 11 – Estrutura básica do quadro OTU<sub>k</sub>. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

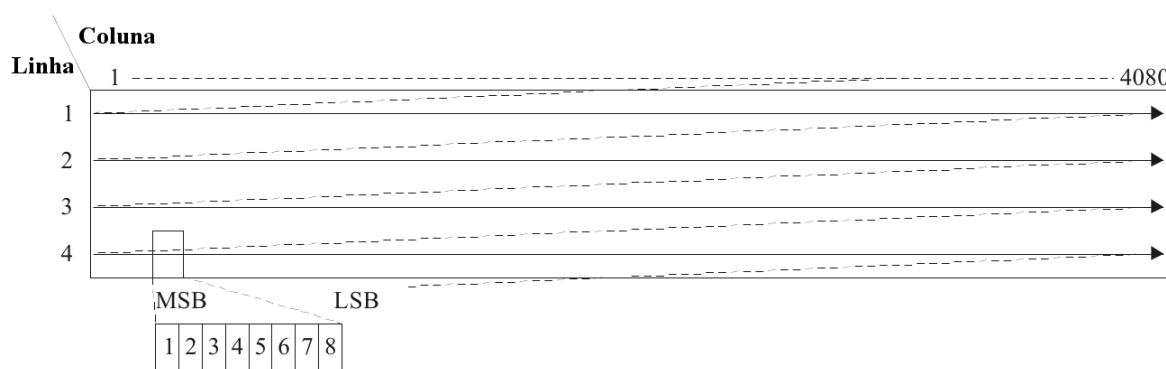


Figura 12 – Transmissão de um quadro OTU na rede. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Para se transmitir o quadro, o sinal deve possuir sincronia de bit na interface com um nó da rede, para que longas cadeias de bits “0” ou “1” não causem problemas no sistema. O cabeçalho FAS, de 6 bytes, possibilita o alinhamento dos quadros, porém é utilizando um misturador que melhor contorna a falta de sincronia entre os quadros. O polinômio gerado pelo misturador é do tipo  $1 + x + x^3 + x^{12} + x^{16}$ , onde seu diagrama pode ser visto na Figura 13. Utiliza de *Flip-Flops* tipo D com sinal de *reset* (“S”), que deve ser ativado quando o bit mais significativo do byte do cabeçalho MFAS (explicado no Capítulo 4), for “1”. O FAS, não deve ser inserido no misturador. Além disso, essa operação deve ocorrer após a inserção do código FEC no sinal OTU<sub>k</sub>.

Tabela 1 – Tipos e taxas de bit para o quadro OTU

Tipos de OTU	Taxa nominal de bit	Tolerância
OTU1	255/238 x 2 488 320 kbits/s	
OTU2	255/237 x 9 953 280 kbits/s	$\pm 20ppm$
OTU3	255/236 x 39 813 120 kbits/s	
OTU4	255/227 x 99 532 800 kbits/s	

NOTA: Os valores nominais para as taxas de bits são, aproximadamente: 2 666 057,143 kbits/s para OTU1, 10 709 225,316 kbits/s para OTU2, 43 018 413,559 kbits/s para OTU3 e 111 809 973,568 kbits/s para OTU4.

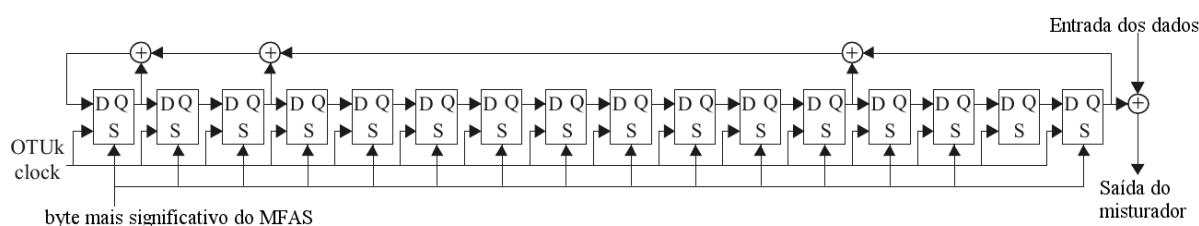


Figura 13 – Diagrama do misturador. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

### 3.3 O quadro ODUk

O quadro ODUk, assim como o OTUk, possui uma área de cabeçalho e uma área de *payload*, a qual carrega o quadro OPUk, como pode ser visto na Figura 14. É também organizado em bytes, possuindo 4 linhas e 3824 colunas. Das linhas 2 a 4, colunas 1 a 14, são destinados ao cabeçalho do quadro ODUk, apresentado com mais detalhes no Capítulo 4.

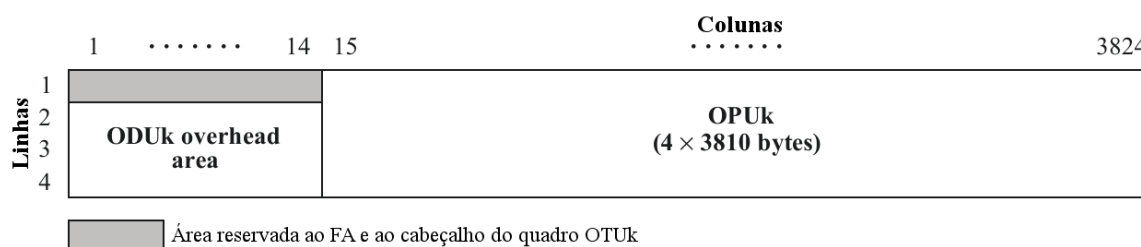


Figura 14 – Estrutura básica do quadro ODUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Para se transmitir os sinais ODUk, para  $k = 1, 2, 3, 4$ , utiliza-se um *clock* local, o qual também é usado para transmitir os quadros STM-N do sistema SDH definido em (G.707/Y.1322, 2007). Assim como acontece no quadro OTUk, os quadros ODUk seguem múltiplos da taxa STM-16 do sistema SDH. Na Tabela 2 apresentam-se as taxas de bits como descrito e a tolerância de falha de bits do quadro ODUk, para

$k = 0, 1, 2, 3, 4.$

Tabela 2 – Tipos e taxas de bit para o quadro ODU

Tipos de ODU	Taxa nominal de bit	Tolerância
ODU0	1 244 160 kbits/s	
ODU1	239/238 x 2 488 320 kbits/s	$\pm 20ppm$
ODU2	239/237 x 9 953 280 kbits/s	
ODU3	239/236 x 39 813 120 kbits/s	
ODU4	239/227 x 99 532 800 kbits/s	

NOTA: Os valores nominais para as taxas de bits são, aproximadamente: 2 498 775,126 kbits/s para ODU0, 2 498 775,126 kbits/s para ODU1, 10 037 273,924 kbits/s para ODU2, 40 319 218,983 kbits/s para ODU3 e 104 794 445,815 kbits/s para ODU4.

### 3.4 O quadro OPUk

Como os demais quadros descritos anteriormente, o quadro OPUk possui um cabeçalho, com duas colunas e quatro linhas, partindo da 15ª coluna do quadro OTUk. Possui uma área de *payload* de 3808 colunas por 4 linhas, totalizando 15232 bytes disponíveis para transportar o sinal de um tributário. O cabeçalho do quadro OPUk será apresentado com mais detalhes no Capítulo 4. Na Figura 15 é apresentado um esboço da estrutura do quadro OPUk. Na Tabela 3 são representadas as taxas de bit para este quadro, o qual se baseia, assim como os quadros OTUk e ODUk, no quadro STM-16 do sistema SDH.

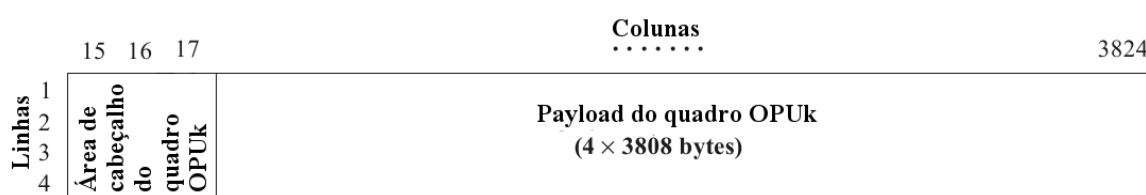


Figura 15 – Estrutura básica do quadro OPUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Tabela 3 – Tipos e taxas de bit para o quadro OPU

Tipos de OPU	Taxa nominal de bit	Tolerância
OPU0	238/239 x 1 244 160 kbits/s	
OPU1	2 488 320 kbits/s	$\pm 20ppm$
OPU2	238/237 x 9 953 280 kbits/s	
OPU3	238/236 x 39 813 120 kbits/s	
OPU4	238/227 x 99 532 800 kbits/s	

NOTA: Os valores nominais para as taxas de bits são, aproximadamente: 1 238 954,310 kbits/s para OPU0, 9 995 276,962 kbits/s para OPU2, 40 150 519,322 kbits/s para OPU3 e 104 355 975,330 kbits/s para OPU4.

## 4 Cabeçalho e processamento dos quadros OTN

Como visto no Capítulo 3, os quadros OTUk, ODUk e OPUk possuem uma área delimitada chamada de cabeçalho. São informações de suporte e manutenção do transporte e operação dos sinais e canais ópticos dos clientes. Na Figura 17, pode ser visto os bytes que compõem o cabeçalho dos quadros. Nas seções seguintes, serão detalhados separadamente a função de cada campo, para cada quadro OTN estudado até agora.

### 4.1 Alinhamento dos quadros

O campo correspondente ao alinhamento dos quadros está contido nos bytes das colunas de 1 a 7, da primeira linha. Seguem as descrições.

- **Frame Alignment Signal (FAS):** é o sinal de alinhamento do quadro e está nos seis primeiros bytes do cabeçalho. Possui a estrutura da Figura 16, onde OA1="1111 0110" e OA2="0010 1000". São esses bytes os responsáveis por sincronizar o transmissor com o receptor para que não ocorra falha na leitura e interpretação dos quadros.
- **Multiframe Alignment Signal (MFAS):** alguns cabeçalhos dos quadros OTUk e ODUk podem abranger múltiplos quadros, como os sinais de cabeçalho TTI (*Trail Trace Identifier*) e o TCM ACT (*Tandem Connection Monitoring Activation/deactivation control channel*) que precisam do MFAS para serem realizados. Com isso, pode-se utilizar o byte da coluna 7, linha 1, para fazer o alinhamento desses quadros. É possível alinhar 256 quadros múltiplos, sendo incrementados unitariamente de "0000 0000" até "1111 1111" e, em seguida, reiniciado a contagem, em forma de vetor. O byte MFAS é usado também no misturador explicado no Capítulo 3.

FAS OH byte 1								FAS OH byte 2								FAS OH byte 3								FAS OH byte 4								FAS OH byte 5								FAS OH byte 6							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
OA1								OA1								OA1								OA2								OA2								OA2							

Figura 16 – Estrutura dos bytes de alinhamento FAS. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	FAS			MFAS	SM			GCC0		RES		JC	RES				
2	RES	PM e TCM	TCM ACT	TCM6			TCM5		TCM4		FTFL	JC	RES				
3	TCM3		TCM2		TCM1			PM		EXP		JC	RES				
4	GCC1	GCC2	APS/PCC				RES				PSI	NJ0	PJ0				

Figura 17 – Estrutura do cabeçalho dos quadros OTUk, ODUk e OPUk.

## 4.2 Cabeçalho do quadro OTUk

O cabeçalho do quadro OTUk compreende os bytes da linha 1, colunas 8 a 14. Nesse conjunto, estão presentes a seção de monitoramento (*Section Monitoring* ou SM), o canal de comunicação geral (*General Communication Channel* ou GCC0) e dois bytes, colunas 13 e 14 da linha 1, reservados para padronizações futuras das redes ópticas (RES).

### 4.2.1 SM (*Section Monitoring*)

O SM é um campo de 3 bytes, das colunas 8 a 10 da primeira linha, dos quais contém o identificador de rastreamento de fuga (TTI), o BIP-8, e alguns sinais de alarme como o BDI (*Backward Defect Indication* ou identificação de defeito atrasado), BEI/BIAE (*Backward Error Indication Backward/Incoming Alignment Error* ou indicação de erro atrasado/erro de alinhamento atrasado), IAE (*Incoming Alignment Error* ou erro de alinhamento recebido) e RES. Na Figura 18 os três bytes correspondentes ao SM é apresentado com mais detalhes.

**TTI** São 64 bytes transportados nessa estrutura e que devem ser alinhados aos múltiplos quadros do OTUk (MFAS) e transmitidos 4 vezes a cada multiquadro. Carrega a informação de dois pontos de uma conexão sendo cada um deles possuindo 16 bytes. O período de transmissão dos multiquadros são de 64 quadros. Os 32 primeiros bytes transmitidos são referentes aos pontos de conexão e os 32 bytes restantes são específicos de cada operadora. Inicialmente, transmite-se 16 bytes do ponto de acesso da fonte (SAPI – *Source Access Point Identifier*), sendo o primeiro byte igual a “0000 0000”. Em seguida, envia-se 16 bytes do ponto de acesso de destino (DAPI – *Destination Access Point Identifier*), sendo o primeiro byte também “0000 0000”. Este campo possui apenas 1 byte (coluna 8 da primeira linha).



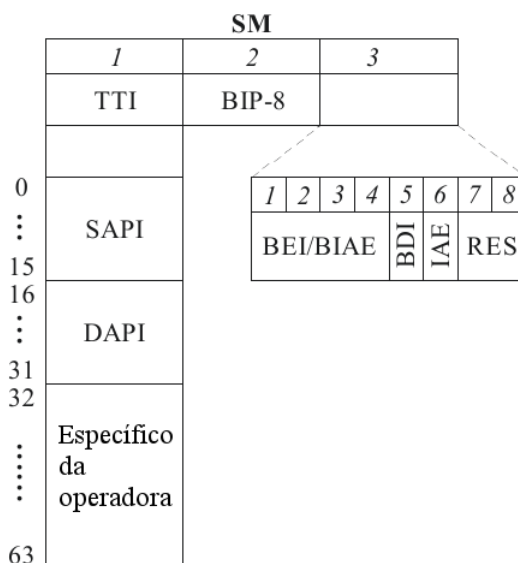


Figura 18 – Três bytes do SM do cabeçalho do quadro OTUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

**BIP-8** Um byte (coluna 9 da primeira linha) utilizado para monitorar os erros de bit. O BIP-8 é calculado a partir da área de *payload* do quadro OPUk, que vai da 15ª coluna (agregando seu cabeçalho) até a 3824ª, de cada uma das 4 linhas, para o *i*-ésimo quadro OTUk e, seu correspondente código é inserido no quadro *i*+1.

**BDI** É um único bit que detecta a falha (valor “1”) ou não (valor “0”) do sinal.

**BEI/BIAE** São quatro bits que indicam o número de erros detectados no BIP-8 (violações no BIP-8). É também usado para transmitir o código IAE que é detectado no quadro correspondente. Quando o código “1011” for inserido nesse campo, a contagem de falha não é feita e, códigos a partir dele e até “1111” são interpretados como “sem erros no BIP-8”.

**IAE** Usado para indicar erro no alinhamento do quadro entre um transmissor e um receptor (dois pontos de acesso). É indicado (“1”) no receptor quando o transmissor detectou este tipo de erro.

#### 4.2.2 GCC0 (*General Communication Channel 0*)

O canal de comunicação geral é um canal limpo de qualquer formato presente nas recomendações G.709. Este canal pode ser utilizado para comunicação entre pontos terminais OTU. São dois bytes, colunas 11 e 12 da primeira linha.

## 4.3 Cabeçalho do quadro ODUk

O quadro ODUk é o que possui maior número de bytes e bits para monitoramento da rede. Estão presentes o campo de monitoramento do caminho entre dois nós da rede (*Path Monitoring* ou PM), o campo de monitoramento de conexão alinhada ou cascadeada (*Tandem Connection Monitoring* TCM) entre os nós ou localidades da rede e seu respectivo campo de ativação (TCM ACT), um campo para mensagens de falha (*Fault Types & Fault Location reporting communication channel* ou FTFL), bytes experimentais para operadoras e fabricantes de produtos OTN (EXP), canais limpos para comunicações gerais (GCC) e um campo de proteção automática da rede (*Automatic Protection Switching coordination channel/Protection Communication Control channel* ou APS/PCC). E para futuras padronizações, possui os bytes das colunas 1 e 2, linha 2 e, das colunas 9 à 14, linha 4 (RES).

### 4.3.1 PM (*Path Monitoring*)

O campo PM está presente nos bytes da terceira linha, da coluna 10 a 12. Possui estrutura semelhante à do TCMi, que por sua vez é análogo ao campo SM do quadro OTUk. Na Figura 19 é apresentado sua configuração bit-a-bit, que foi descrito anteriormente. Os bits de STAT indicam sinais de manutenção. O sétimo bit do byte PM e TCM (segunda linha, terceira coluna), chamado de *path Delay Measurement* (DMp), é destinado à medida de atraso na transição de um conjunto de bits “1” para “0” e vice versa. Por exemplo, na transição de “1” para “0” na sequência ...111000... é criado um ponto de partida da medição do atraso. O valor do bit é mantido até a ocorrência da próxima transição, tornando-se assim possível a medição do atraso por meio de um sistema de gerência.

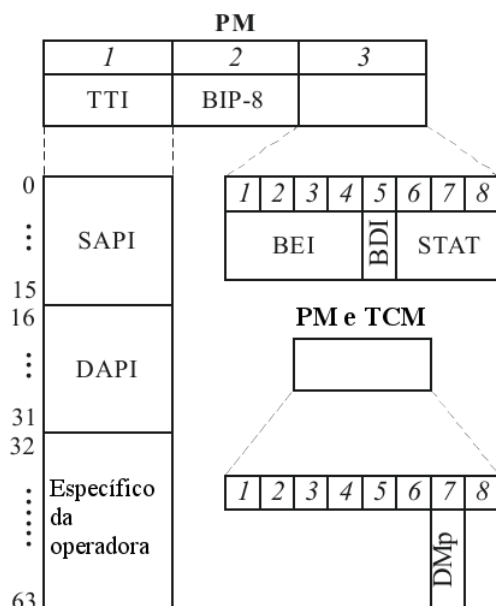


Figura 19 – Campo PM do cabeçalho ODUk. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

#### 4.3.2 TCM ACT (*Tandem Connection Monitoring Activation/deactivation control channel*)

Este campo, localizado na segunda linha, quarta coluna, é destinado à ativação/desativação dos campos TCMi.

#### 4.3.3 TCM (*Tandem Connection Monitoring*)

Possui os subcampos de BIP-8, TTI, BDI e BEI/BIAE, assim como no campo SM do cabeçalho OTUk. Têm a mesma propriedade do anterior, assim como mesmo tamanho de bytes. São seis os campos destinados à conexão monitorada (TCM), na segunda linha, das colunas 5 a 13, e na terceira linha, das colunas 1 a 9. Na Figura 20 é apresentado o formato para cada um dos 6 campos de conexão monitorada. Têm-se os 3 últimos bits do terceiro byte utilizado como status para sinais de manutenção. Na Tabela 4, é apresentado o comportamento dos bits de *status* (STATi) e sua interpretação. Quando há sinais de manutenção, então os subcampos são ignorados (exceto o STATi), colocando-se o valor “1”. Para o campo PM & TCM, da segunda linha, terceira coluna, é destinados os bits de 1 a 6 para o subcampo  $DM_{tj}$ , para  $j = 1, \dots, 6$ , os quais correspondem a cada uma das 6 conexões monitoradas e possui finalidade similar ao DMp, explicado anteriormente. Porém, neste caso o atraso calculado é em relação entre a conexão de nós adjacentes que estão sobre um caminho de monitoramento.

Um exemplo do uso deste campo pode ser visto na Figura 21. Nela é apresentada uma infraestrutura alugada, onde um cliente que solicitou um nível de monitora-

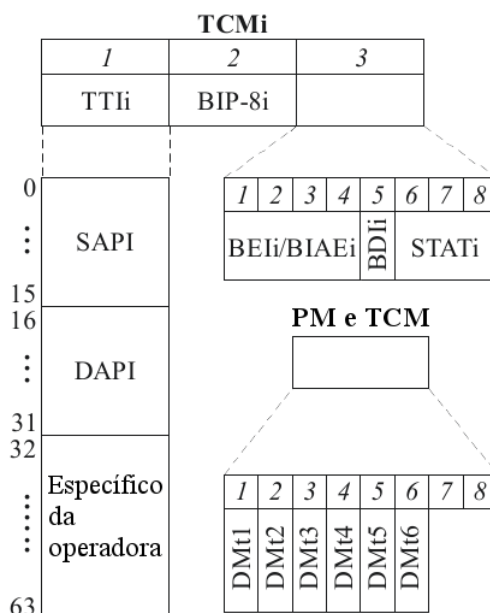


Figura 20 – Estrutura dos campos TCMi, para  $i = 1, 2, \dots, 6$ . Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Tabela 4 – Valores dos últimos bits do byte TCMi para valores do STATi

Byte 3 do TCMi. Bits 6, 7 e 8	Status
000	Não usado (nenhuma fonte de TCM)
001	Em uso sem IAE
010	Em uso com IAE
011	Reservados para futuras padronizações
100	Reservados para futuras padronizações
101	
110	
111	Sinais de manutenção

mento, um provedor de serviços que contrata também um nível de TCM e diferentes operadoras contratando outros quatro níveis de conexão monitorada. Uma das operadoras faz um subcontrato de parte de seu monitoramento com outra operadora, logo os quatro níveis ela possuía de conexão monitorada são divididos. A alocação deste campo do cabeçalho fica da seguinte forma:

- Entre os usuários, preenche-se o campo  $TCM1/DM_{t1}$  com valores referentes à suas redes.
- O provedor de serviços irá preencher o campo  $TCM2/DM_{t2}$  com o valor referente as duas interfaces com o usuário.
- As operadoras nesse exemplo, Nó 1, Nó 2 e Nó 3, que possuem contrato com o provedor de serviços, preenchem os campos  $TCM3/DM_{t3}$ ,  $TCM4/DM_{t4}$ ,

TCM5/ $DM_{t5}$  e TCM6/ $DM_{t6}$ , sendo que o Nó 2 não utiliza estas duas últimas, já que está contratando-as para a quarta operadora, a Nó 4, a qual usará apenas TCM5/ $DM_{t5}$  e TCM6/ $DM_{t6}$  para monitorar sua conexão.

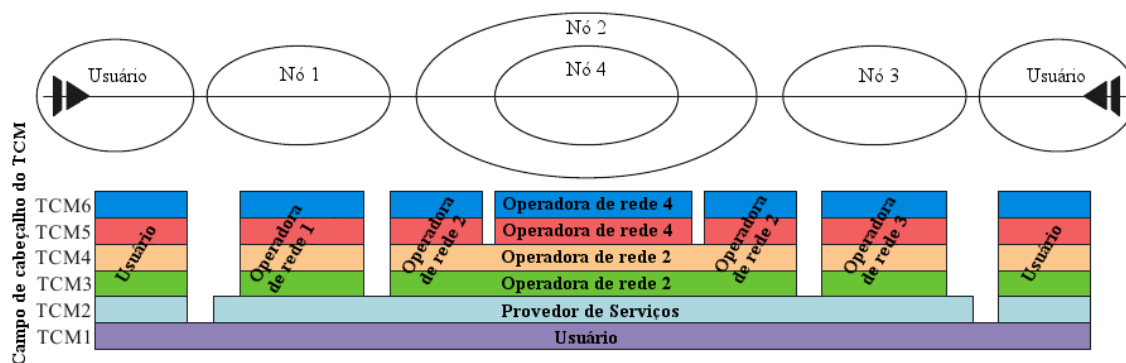


Figura 21 – Exemplo de uso do TCM. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

#### 4.3.4 FTFL (*Fault Types & Fault Location reporting communication channel*)

É disponibilizado um byte para transportar um vetor de 256 posições para mensagens de falha de tipo ou de falha de localização (falha no sinal ou degradação no sinal). Está localizado na segunda linha da décima quarta coluna do cabeçalho. Para sua transmissão, cada byte deve estar alinhado com o multiquadro do ODUk, ou seja, o byte 0 presente na posição 0000 0000, o byte 1 presente na posição 0000 0001 do multi quadro, e assim por diante.

#### 4.3.5 EXP (*Experimental*)

Os bytes da terceira linha, colunas 13 e 14 são destinados para uso experimental tanto do vendedor dos equipamentos que usam este padrão quanto das operadoras das redes.

#### 4.3.6 GCC1 e GCC2 (*General Communication Channel 1 and 2*)

Esses dois campos, cada um possuindo dois bytes, referem-se, assim como o GCC0 do quadro OTUk, ao suporte de canal de comunicação geral entre dois elementos de rede com acesso ao quadro ODUk. São canais livres para quaisquer tipo de comunicação. O GCC1 está localizado na quarta linha, colunas 1 e 2, enquanto o GCC2 fica nas colunas 3 e 4 desta mesma linha do cabeçalho.

### 4.3.7 APS/PCC (*Automatic Protection Switching coordination channel/ Protection Communication Control channel*)

Localizado na quarta linha, colunas de 5 à 8, esses bytes são dedicados a determinados tipos de monitoramento da conexão conforme valor do campo MFAS. É um campo de proteção automática por chaveamento. Os mecanismos de proteção da rede serão estudados no Capítulo 6.

## 4.4 Cabeçalho do quadro OPUk

O cabeçalho do quadro OPUk consiste de bytes de justificação, usado para mapear os sinais dos clientes no *payload* (*Justification Control* ou JC, *Negative Justification Opportunity* ou NJO e *Positive Justification Opportunity* ou PJO) e de um identificador da estrutura do *payload* (*Payload Structure Identifier* ou PSI). São reservados para padronizações futuras os bytes da coluna 15, linhas 1 a 3, deste cabeçalho.

### 4.4.1 PSI (*Payload Structure Identifier*)

Usado para transportar um vetor de 256 bytes, sendo o primeiro byte de identificação do *payload*, PT (*Payload Type*). Ou seja, a estrutura do sinal inserido no *payload* do quadro OPUk é definido no primeiro byte transmitido, o PSI[0]. Por exemplo, o mapeamento de um sinal Ethernet 1000BASE-X em um quadro ODU0, 40GBASE-R em um quadro OPU3 e um 100GBASE-R em um quadro OPU4, ocorre quando PSI[0] = "0000 0111". Os demais bytes, de PSI[1] à PSI[255], são destinados ao mapeamento. O PSI está na linha 4, coluna 15.

### 4.4.2 JC (*Justification Control*), NJO (*Negative Justification Opportunity*) e PJO (*Positive Justification Opportunity*)

O byte JC é utilizado para controlar os outros dois tipos de bytes, o NJO e o PJO que são ajustados conforme o tipo de sincronia do processo de mapeamento (assíncrono ou bit-síncrono) e, possui interpretação no desmapeamento conforme a Tabela 5. Os bits de PJO e NJO quando são mapeados para justificação, possuem valor zero. O JC está presente na coluna 16, linhas 1 a 3, enquanto o NJO está na linha 4 dessa mesma coluna e o PJO na coluna 17 da linha 4.

Tabela 5 – Interpretação dos bytes NJO e PJO a partir do byte JC

JC bits 7 e 8	NJO	PJO
00	byte de justificação	byte de dados
01	byte de dados	byte de dados
10	byte de justificação	byte de dados
11	byte de justificação	byte de justificação

## 5 Mapeamento e multiplexação

Neste capítulo será estudada a maneira com que os sinais externos de diversas estruturas e taxas, provindos de operadoras de telefonia, por exemplo, são introduzidos na rede óptica utilizando o padrão OTN. De maneira breve, os sinais são mapeados, conforme sua taxa de transmissão, em uma das taxas do padrão OTN descritas no Capítulo 3. Em seguida, são mapeados e multiplexados em quadros intermediários até chegarem no quadro OTU, que é transmitido então nas camadas mais baixas da hierarquia das redes ópticas de transporte. Esse procedimento será descrito na próxima seção com mais detalhes, para sinais clientes no padrão OTN e, na seção seguinte para um sinal fora deste padrão. Por fim é apresentada a técnica de concatenação virtual para mapeamento de um sinal cliente.

### 5.1 Mapeamento e multiplexação dos sinais

Os sinais clientes (estando ou não no padrão OTN) passam por uma série de processos de mapeamento e multiplexação para que possam ser transportados na rede OTN, contemplando assim as funcionalidades estudadas nos capítulos anteriores. Na Figura 22 é apresentado o fluxo da estruturação de vários sinais clientes, sejam eles ATM, STM, Ethernet ou mesmo OTN, até o ponto do início do domínio óptico da hierarquia do padrão OTN para que seja transportado através da rede óptica.

Ainda na Figura 22, um sinal cliente é associado a um quadro OPU de baixa ordem, identificado como OPU (L). Por sua vez, este sinal é multiplexado em um quadro ODU de baixa ordem, ou ODU (L). Ao final, é multiplexado em um sinal OTU para ser transportado nas outras camadas da rede. O sinal também já pode estar no padrão OTN ao ingressar na rede. Assim, é mapeado dentro de um sinal ODTU (*Optical channel Data Tributary*), o qual é responsável por transportar um sinal de taxa menor para um sinal de taxa maior, como um ODU0 para um ODU1. Em seguida, os ODTUs são multiplexados para um grupo de ODTU, o ODTUG (*Optical channel Data Tributary Unit Group*). Em seguida, é mapeado em um sinal OPU de alta ordem, ou OPU (H), que é mapeado em um sinal ODU de alta ordem, ou ODU (H) e, por fim, é multiplexado juntamente com um sinal ODU (L) em um sinal OTU. Os quadros de baixa ordem e de alta ordem tem a mesma estrutura, porém diferenciam-se no sinal que carregam.

Os processos de multiplexação podem ser por comprimento de onda WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*) ou por divisão de tempo TDM (*Time-Division Multiplexing*). Nas camadas hierárquicas tratadas neste trabalho, é realizado apenas TDM. Os tipos de sinais multiplexados são definidos no primeiro elemento do vetor PSI,



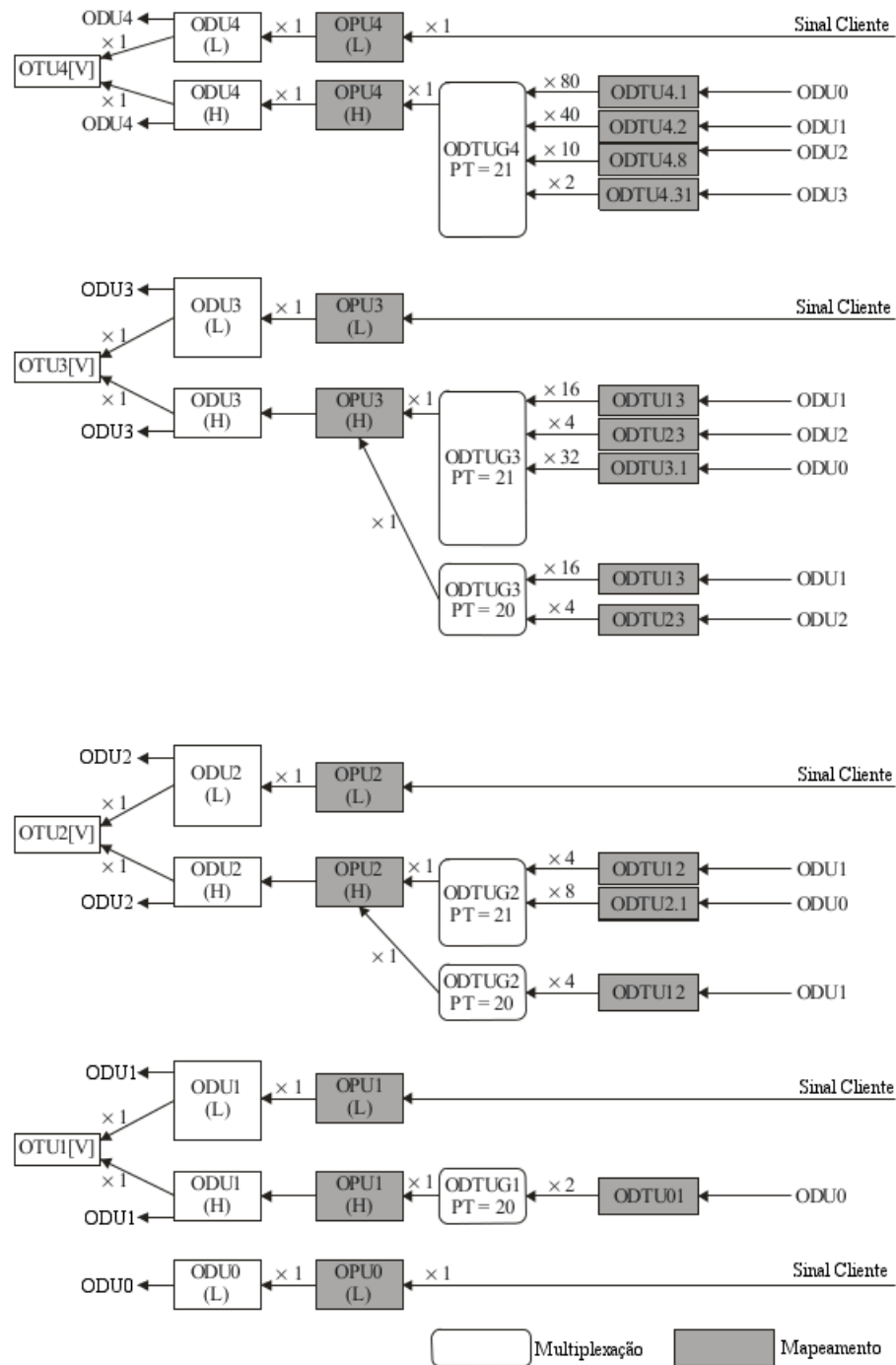


Figura 22 – Inserção de sinais clientes na rede OTN. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

do cabeçalho do quadro OPUk, o *Payload Type*, ou PT, e pode assumir os valores  $20_{16} = "0010\ 0000"$  ou  $21_{16} = "0010\ 0001"$ , dependendo do tipo de mapeamento que usam. Abaixo é apresentada a capacidade de multiplexação por divisão de tempo dos quadros, os quais serão detalhados em seguida.

- Até 2 sinais ODU0 podem ser multiplexados em um ODTUG1 com  $PT=20_{16}$ .
- Até 4 sinais ODU1 podem ser multiplexados em um ODTUG2 com  $PT=20_{16}$ .

- Entre até 8 sinais ODU0 e até 4 sinais ODU1 podem ser multiplexados em um ODTUG2 com  $PT=21_{16}$ .
- Entre até 16 sinais ODU1 e até 4 sinais ODU2 podem ser multiplexados em um ODTUG3 com  $PT=20_{16}$ .
- Entre até 32 sinais ODU0, até 16 sinais ODU1 e até 4 sinais ODU2 podem ser multiplexados em um ODTUG3 com  $PT=21_{16}$ .
- Entre até 80 sinais ODU0, até 40 sinais ODU1, até 10 sinais ODU2 e até 2 sinais ODU3 podem ser multiplexados em um ODTUG4 com  $PT=21_{16}$ .

A multiplexação por comprimento de onda é uma técnica usada em sistemas ópticos para aumentar a capacidade de transmissão ao longo de uma fibra. Para isso, os dados são transmitidos simultaneamente em múltiplos portadores de comprimento de onda, ou de maneira equivalente, frequências ou cores (já que são associados diretamente ao comprimento da onda), em uma fibra. Cada comprimento de onda no espectro da banda é projetado para não interferir com os demais porém, efeitos não lineares causados na fibra pela potência do sinal acarretam na redução da relação sinal-ruído podendo assim causar interferência.

Para multiplexar até dois sinais ODU0 em um ODU1, estende-se o quadro ODU0 com um cabeçalho de alinhamento de quadro (ODTU01 JOH) e feito o mapeamento assíncrono em um ODTU01 usando o cabeçalho de justificação (*Justification Overhead* ou JOH) AMP (*Asynchronous Mapping Procedure*). No AMP, o sinal de *clock*, limitado às taxas de bits definidas no Capítulo 3, é criado localmente e o sinal é mapeado através do código PNZ (*positive/negative/zero*). Os sinais são multiplexados por TDM em um grupo ODTUG1 com  $PT=20$ , o qual é mapeado em um quadro OPU1 e em seguida em um quadro ODU1. A Figura 23 apresenta este processo.

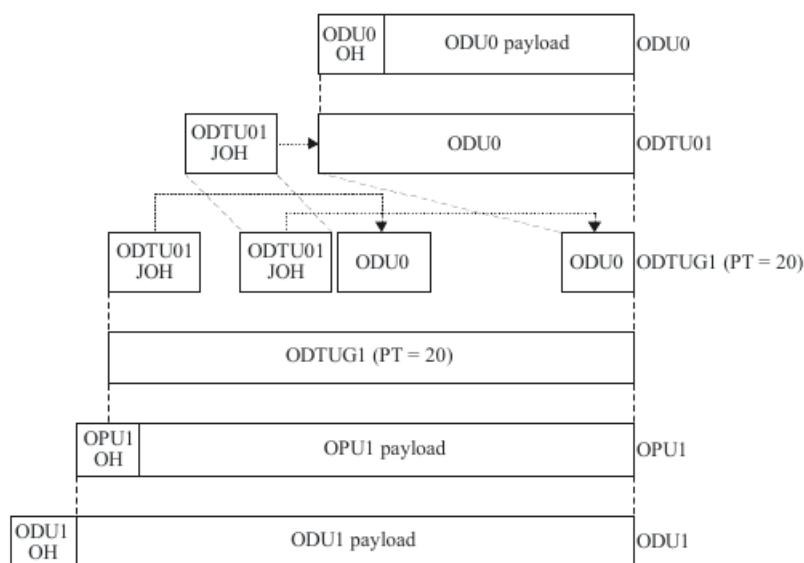


Figura 23 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU0 em um ODU1.  
Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Na multiplexação de até quatro sinais ODU1 em um quadro ODU2, é estendido no sinal ODU1 um cabeçalho de alinhamento de quadro (ODTU12 JOH) e é feito mapeamento assíncrono em um ODTU12 usando o cabeçalho de justificação AMP. Os quatro sinais ODTU12 criados nessa etapa são multiplexados pelo tempo (TDM) no grupo ODTUG2, com PT=20. Por fim, esse grupo é mapeado no quadro OPU2 e em seguida mapeado no quadro ODU2. Este processo é apresentado na Figura 24.

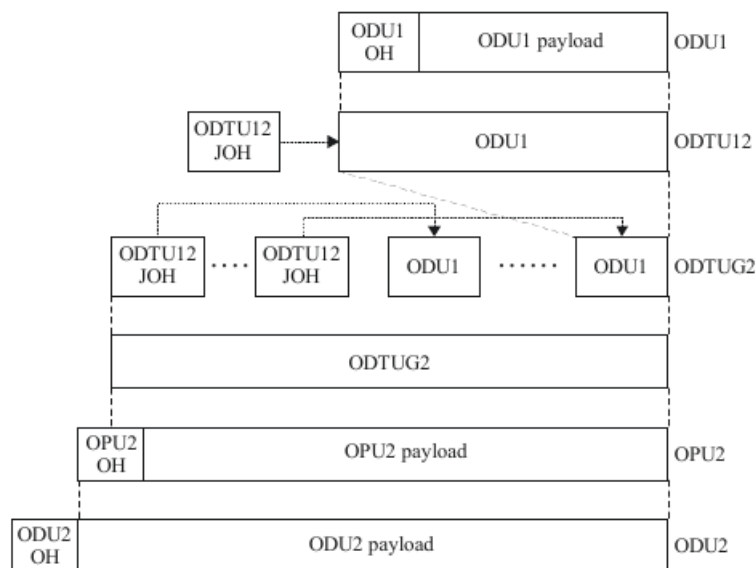


Figura 24 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU1 em um ODU2.  
Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Na Figura 25 é apresentada a multiplexação de até oito sinais ODU0 e/ou até quatro ODU1 em um quadro ODU2. Assim como nos casos anteriores, estende-se os sinais ODU0 e ODU1 com cabeçalhos de alinhamento de quadro, ODTU1.2 JOH e ODTU12 JOH, respectivamente, e feito o mapeamento assíncrono em um ODTU1.2 (ODU0) e ODTU12 (ODU1), usando o cabeçalho de justificação genérico (*Generic Mapping Procedure* ou GMP), para o ODTU1.2, e AMP, para o ODTU12. A descrição mais detalhada do GMP está disponível em (G.709/Y.1331, 2012), cláusula 19.4.3.2. Em seguida, até oito sinais ODTU1.2 ou até quatro sinais ODTU12 são multiplexados via TDM no grupo ODTUG2 com PT=21. Este grupo é mapeado em um quadro OPU2 que, por sua vez, é mapeado em um quadro ODU2.

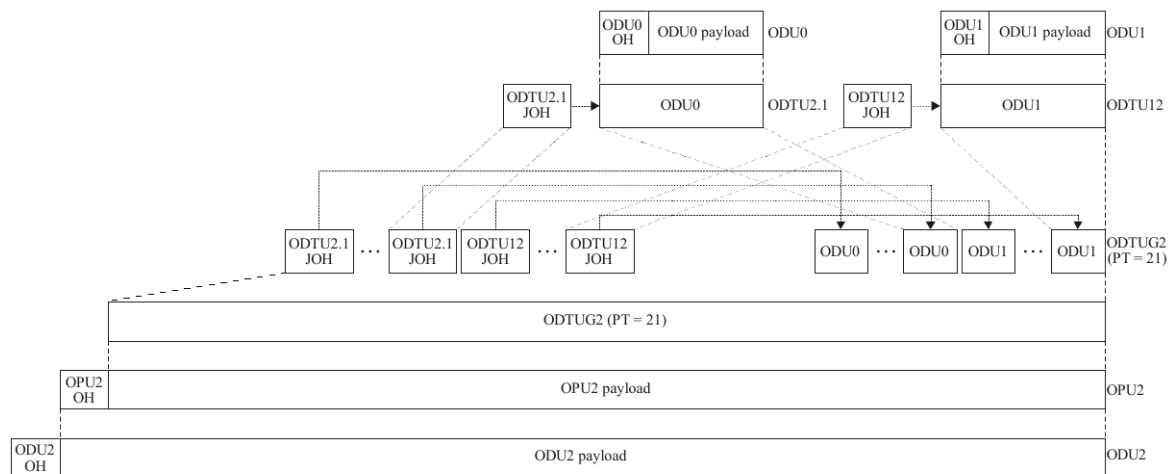


Figura 25 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU0 e ODU1 em um ODU2. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Na Figura 26 é apresentada a multiplexação de até 16 quadros ODU1 e/ou até 4 quadros ODU2 em um ODU3. Do sinal ODU1 padrão, é conferido um cabeçalho para alinhamento de quadro, ODTU13 J.O.H., e é feito mapeamento assíncrono em um ODTU13 usando o cabeçalho de justificação AMP. No caso do quadro ODU2, estende-se o cabeçalho de alinhamento de quadro (ODTU23 J.O.H.) e faz-se o mapeamento assíncrono em um ODTU23 usando o cabeçalho de justificação AMP. Multiplexa-se  $x \in [0, 4] \subset \mathbb{N}$  sinais ODTU23 e  $16 - 4x$  sinais ODTU13 por divisão de tempo (TDM) em um grupo ODTUG3 com PT=20. Por fim, esse grupo é mapeado no quadro OPU3 e em seguida mapeado no quadro ODU3.

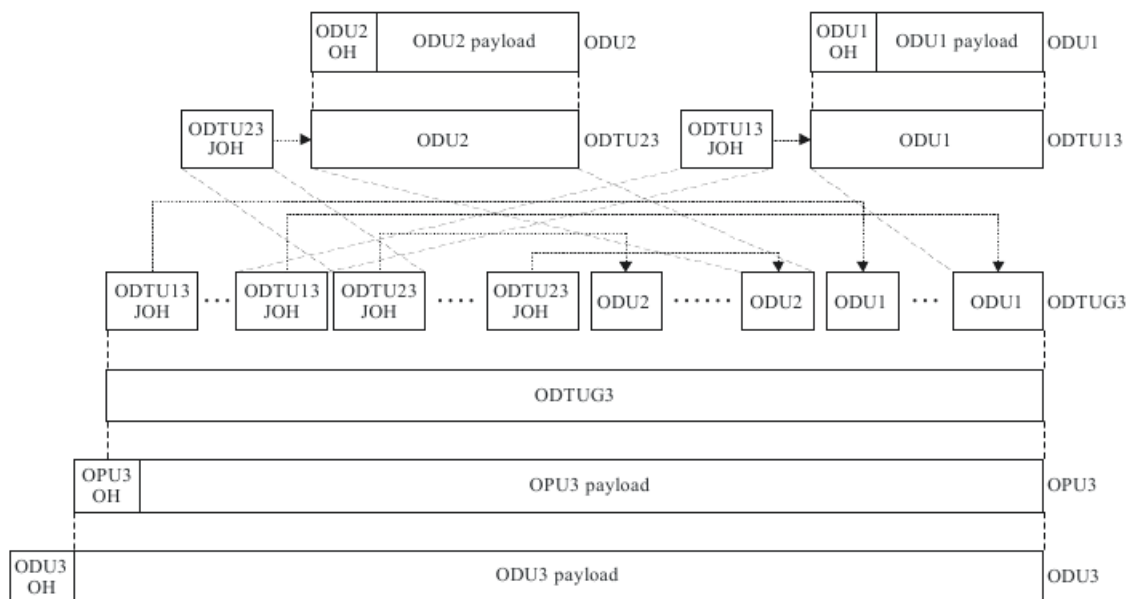


Figura 26 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU1 e ODU2 em um ODU3. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Na Figura 27 mostra-se a multiplexação de até trinta e dois sinais ODU0 e/ou até dezesseis sinais ODU1 e/ou até quatro sinais ODU2 em um quadro ODU3. Os sinais ODU0, ODU1 e ODU2 são estendidos com um cabeçalho de alinhamento de quadro e são mapeados de maneira assíncrona em um ODTU3.1 usando o cabeçalho de justificação GMP, ODTU13 e ODTU23 usando o cabeçalho de justificação AMP, respectivamente. Em seguida, multiplexa-se usando TDM até 32 quadros ODTU3.1, até 16 quadros ODTU13 e até 4 quadros ODTU23 em um grupo ODTUG3 com  $PT=21$ . Em sequência, mapeia-se esse grupo para um quadro OPU3, que por sua vez é mapeado em um quadro ODU3.

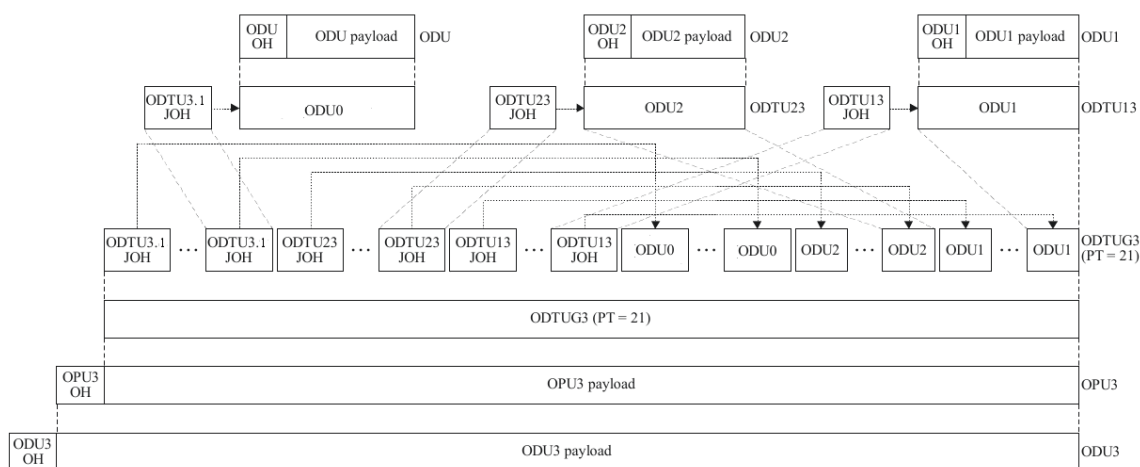


Figura 27 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU0, ODU1 e ODU2 em um ODU3. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

Para a multiplexação de até oitenta sinais ODU0 e/ou quarenta sinais ODU1 e/ou dez sinais ODU2 e/ou dois sinais ODU3 em um quadro ODU4, estende-se os sinais ODU $k$ ,  $k=0,1,2,3$ , com cabeçalhos de alinhamento de quadro e mapeia-os assincronamente em ODTU4. $ts$  para  $ts = 1$  (ODU0),  $ts = 2$  (ODU1),  $ts = 8$  (ODU2) e  $ts = 31$  (ODU3), usando o cabeçalho de justificação GMP. Então, 80 sinais ODTU4.1, 40 sinais ODTU4.2, 10 sinais ODTU4.8 e até 2 sinais ODTU4.31 são multiplexados via TDM para o grupo ODTUG4 com  $PT=21$ . Ao final, este grupo é mapeado em um quadro OPU4, o qual também é mapeado para o quadro ODU4. O processo descrito pode ser observado na Figura 28.

## 5.2 Mapeamento de um sinal STM-N para um OPU $k$

O sinal STM-N (*Synchronous Transport Module level N*) é o quadro utilizado pelo padrão SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), tecnologia adotada no Brasil. Se tornou, juntamente com o SONET (*Synchronous Optical Networking*), o sinal padrão de alta taxa de transmissão e multiplexação ao longo de uma rede óptica até os dias

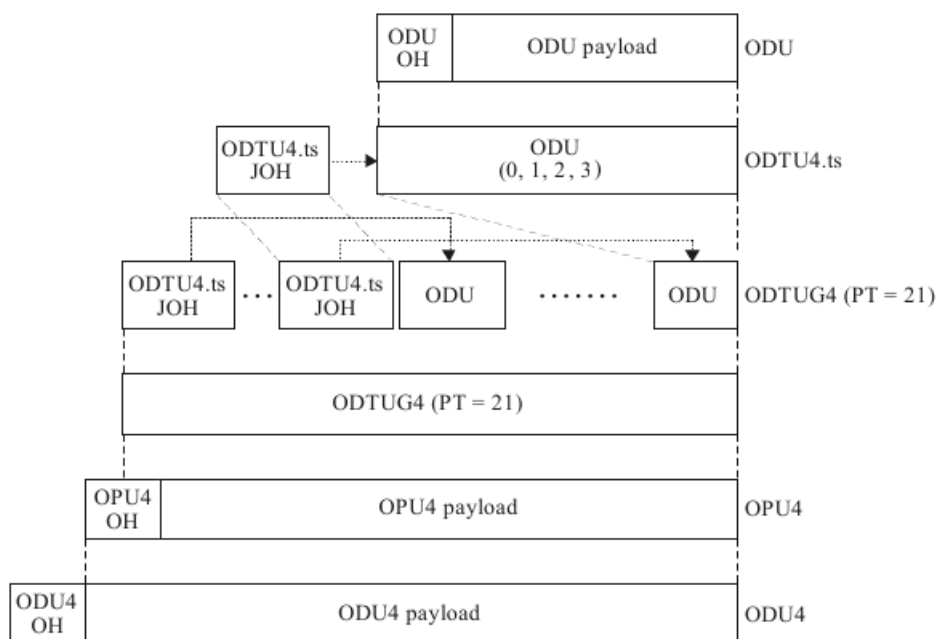


Figura 28 – Etapas de multiplexação e mapeamento de um quadro ODU0, ODU1, ODU2 e ODU3 em um ODU4. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

atuais (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010). Existem as hierarquias STM-1, STM-4, STM-16, STM-64 e STM-256, cujas taxas são de 155,52, 622,08, 2488,32, 9953,28 e 39.814,32 Mbits/s respectivamente. Estes três últimos podem ser mapeados nos quadros OPU $k$ ,  $k = 1, 2, 3$ , do padrão OTN segundo (G.709/Y.1331, 2012).

Para que se tenha suporte de um sistema de gerência local operando na manutenção do sinal STM, um bit de indicação de falha de sinal cliente é ativado no cabeçalho do quadro OPU $k$ . O primeiro bit do terceiro elemento do vetor PSI, PSI[2], é ajustado para “1” quando acontece a falha e “0” caso contrário. Os bits restantes desse byte são reservados para futuras padronizações e demarcados com valor “0”. Os demais elementos desse vetor são também reservados para padronizações futuras. Os outros campos do cabeçalho do quadro OPU $k$  de controle de justificação são utilizados, avisando quando são parte dos dados do sinal STM ou quando devem ser ignorados para que atuem como byte de justificação do quadro.

### 5.2.1 Mapeamento de um STM-16 em um OPU1

Este mapeamento ocorre, como introduzido anteriormente na Figura 22, através de sucessivos grupos de oito bits mapeados no *payload* do quadro OPU1. Na Figura 29 é apresentada a estrutura do quadro OPU com este sinal mapeado, onde no *payload* há apenas os bytes de dados (D).

		15	16	17	18	.....	3824
Linhas	1	RES	JC	D	D	3805D	D
	2	RES	JC	D	D	3805D	D
	3	RES	JC	D	D	3805D	D
	4	PSI	NJO	PJO	D	3805D	D

Figura 29 – Mapeamento do sinal STM-16 no quadro OPU1. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

### 5.2.2 Mapeamento de um STM-64 em um OPU2

Para este sinal, o mapeamento é feito conforme a Figura 30. Insere-se 64 bytes de enchimento (FS ou *Frame Stuffing*), nas colunas 1905 à 1920, linhas 1 à 4, do *payload* do quadro OPU2.

		15	16	17	.....	1904	1905	.....	1920	1921	.....	3824
Linhas	1	RES	JC		118 × 16D		16FS		119 × 16D			
	2	RES	JC		118 × 16D		16FS		119 × 16D			
	3	RES	JC		118 × 16D		16FS		119 × 16D			
	4	PSI	NJO	PJO	15D + 117 × 16D		16FS		119 × 16D			

Figura 30 – Mapeamento do sinal STM-64 no quadro OPU2. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

### 5.2.3 Mapeamento de um STM-256 em um OPU3

Os bits provindos do sinal STM-256 são sucessivamente inseridos no *payload* do quadro OPU3 conforme a Figura 31. São inseridos, neste caso, 128 bytes de enchimento para conferir a taxa correta deste quadro a ser mapeado, das colunas 1265 a 1280 e 2545 a 2560, das linhas 1 a 4.

		15	16	17	.....	1264	1265	...	1280	1281	.....	2544	2545	...	2560	2561	...	3824
Linhas	1	RES	JC		78 × 16D		16FS		79 × 16D		16FS		79 × 16D					
	2	RES	JC		78 × 16D		16FS		79 × 16D		16FS		79 × 16D					
	3	RES	JC		78 × 16D		16FS		79 × 16D		16FS		79 × 16D					
	4	PSI	NJO	PJO	15D + 77 × 16D		16FS		79 × 16D		16FS		79 × 16D					

Figura 31 – Mapeamento do sinal STM-256 no quadro OPU3. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)



### 5.3 Concatenação virtual de quadros OTN

A concatenação virtual de quadros OTN é uma técnica usada para mapear sinais cliente para a rede, como o STM-64 e o STM-256, criando-se um *payload* maior distribuído em sinais menores que serão multiplexados por TDM. Pode-se concatenar  $X$  quadros OPUk, com  $X = 1, \dots, 256$  e  $k = 1, 2, 3$  formando um quadro OPUk-Xv. Para formar este quadro, são concatenadas linha-a-linha e intercaladas para cada um dos  $X$  quadros OPUk. Na Figura 32 é apresentada sua estrutura. O quadro OPUk-Xv tem uma área de cabeçalho das colunas  $14X+1$  a  $16X$  e outra de *payload* das colunas  $16X+1$  a  $3824X$ . O cabeçalho de concatenação virtual (*Virtual Concatenation Overhead* ou VCOH) é usado para especificar a sequência de concatenação e a indicação de multiquadro, além de um cabeçalho indicando o sinal cliente que está sendo mapeado. O PSI e o VCOH estão relacionados a cada um dos  $X$  quadros. O OPUk-Xv fornece uma área contígua de *payload* com taxa de  $X \times 238 / (239 - k) \times 4^{k-1} \times 2488320$  kbit/s e tolerância de  $\pm 20$  ppm.

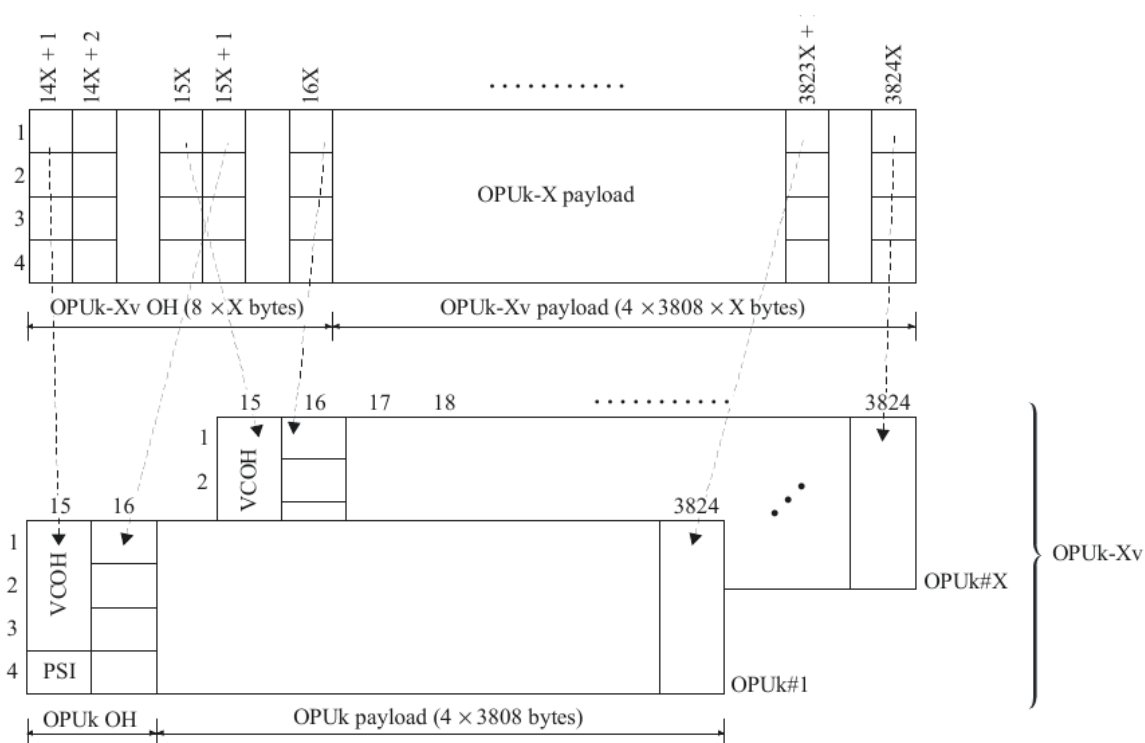


Figura 32 – Estrutura do quadro concatenado OPUk-Xv. Fonte (G.709/Y.1331, 2012)

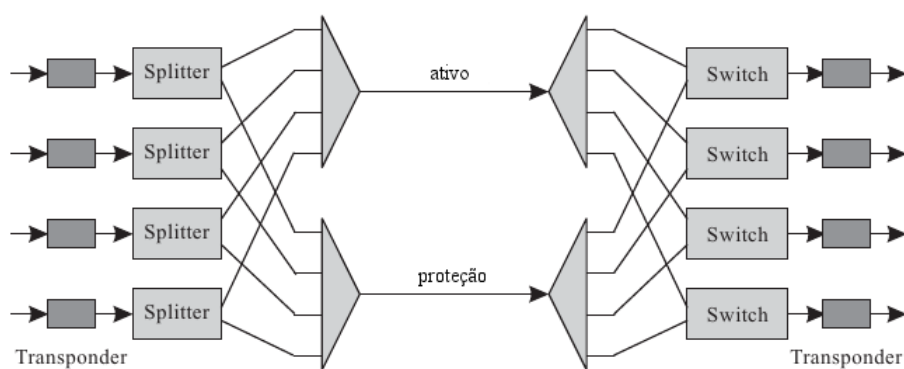
## 6 Mecanismos de proteção

Neste capítulo serão introduzidas formas de proteger uma rede óptica, seja ela do tipo SONET, SDH ou do padrão aqui estudado, OTN. A proteção ocorre nas camadas ópticas, que consiste no canal óptico (*Optical Channel* ou OCh), multiplexação óptica (*Optical Multiplexer Section* ou OMS) e camada de transporte óptico (*Optical Transport Section* ou OTS). Até o momento essas camadas não foram abordadas no trabalho, porém serão tratadas nesta etapa apenas no contexto da proteção das redes ópticas, suas configurações e funcionalidades. Serão abordadas as proteções realizadas tanto na camada OCh quanto na OMS conforme (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010).

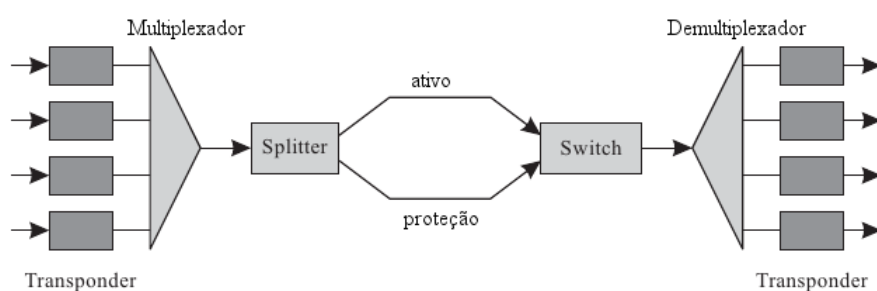
### 6.1 Esquemas de proteção de uma rede óptica

A proteção nas redes ópticas acontece na camada óptica da hierarquia, mais especificamente nas camadas OCh e OMS. Na camada OCh, a restauração de um caminho que foi removido, seja por falha nos lasers transmissores (perda do laser ou do equipamento) ou rompimento da fibra óptica, é dada por *lightpath*, ou seja, por cada  $\lambda$  na rede. Já na camada OMS, a restauração ocorre para um grupo de *lightpaths* em uma conexão, não sendo possível restaurá-los separadamente. Os esquemas possíveis de proteção para cada uma das camadas serão abordados nas subseções seguintes.

Em termos de processamento, não há grandes diferenças entre uma proteção realizada na camada OCh com outra realizada na camada OMS, porém o custo na implementação de ambas são diferentes. A Figura 33 apresenta uma proteção 1+1 pela camada OCh e pela camada OMS. Observa-se nela que mais equipamentos de distribuição de um sinal (*splitter*) e acoplamento de sinal (*switch*) são necessários na proteção pela camada OCh, já que o tratamento é individualizado por  $\lambda$ , o que já não ocorre com o apresentado na parte (b) da Figura, que adiciona uma rota de proteção para a rota operante. Os *splitter* e *switch* são chaves ópticas que fazem essa comutação no tráfego. O custo, na camada OCh, cresce linearmente com o número de canais que precisam ser protegidos e são transportados na rede, o que por outro lado, numa proteção pela camada OMS, o custo é fixo e menor. Se apenas um pequeno número de canais precisam de proteção, então o custo na camada OCh não é maior do que quando operado na camada OMS, podendo se caracterizar como uma vantagem tendo em vista o maior controle por canal.



(a) Proteção 1+1 na camada OCh.



(b) Proteção 1+1 na camada OMS.

Figura 33 – Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010)

### 6.1.1 Proteção 1+1

É uma proteção simples, onde o sinal é dividido em dois caminhos por um separador em uma extremidade, e transmitido através de duas fibras. Na outra extremidade da rede, os sinais são selecionados por um *switch* em relação à presença de luz emitida pelo laser. Se houver uma perda de sinal, é feito um chaveamento na fibra de transmissão. Ambas as fibras, neste caso, transportam o mesmo sinal deixando que o sistema faça a escolha por qual caminho deseja receber. Este esquema é inferido em redes ponto-a-ponto. O equipamento de separação do canal transmitido causa uma perda de 3 dB e o *switch* em uma perda menor que 1 dB. Além da Figura 33, a Figura 34 apresenta uma visão geral da proteção 1+1.

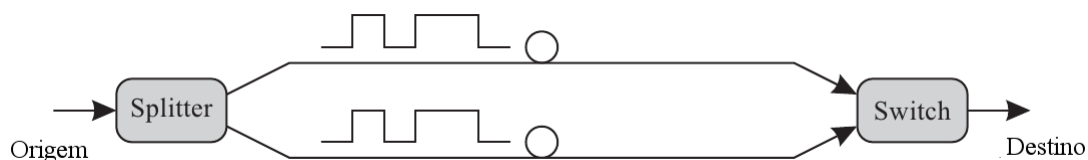


Figura 34 – Esquema de proteção 1+1. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010)

### 6.1.2 Proteção 1:1

A proteção 1:1 é similar a proteção 1+1, já que duas fibras são utilizadas para uma mesma rota. Neste caso, o sinal só é transmitido por uma delas. Para isso, é necessário que o transmissor e o receptor façam o chaveamento de caminho quando ocorra um rompimento ou falha na transmissão por uma das fibras. Logo, uma vantagem neste esquema é a fibra de proteção não ser usada a todo momento na comunicação. É usada para redes ponto-a-ponto. Na Figura 35 é apresentado a proteção 1:1.



Figura 35 – Esquema de proteção 1:1. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010)

### 6.1.3 Proteção 1:N

É uma extensão da proteção 1:1, onde N fibras transmissoras de sinal, chamadas de *working fibers* compartilham de uma mesma fibra de proteção, chamada de *protection fiber*, como mostrado na Figura 36. É possível com o esquema 1:N a proteção de qualquer uma fibra que falhe e, além disso, o sistema deve detectar que quando há falha em mais de uma fibra, apenas uma rota seja protegida com a fibra de proteção.

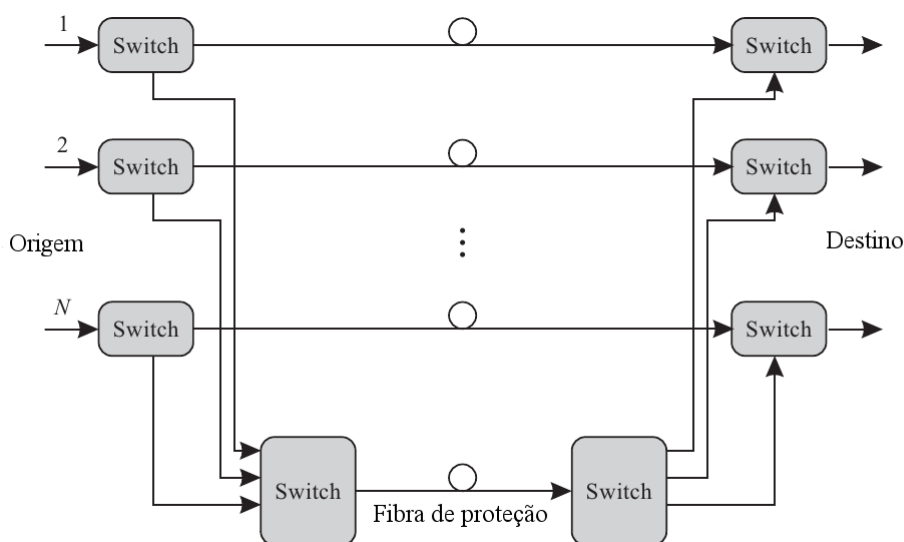


Figura 36 – Esquema de proteção 1:N. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010)

### 6.1.4 Proteção unidirecional em anel

Os esquemas de proteção tratados até o momento dizem respeito a redes ponto-a-ponto. Para as redes em anel, utilizam-se OADMs (*Optical Add/Drop Multiplexer*) para inserir ou remover sinais da rota de tráfego. Na proteção unidirecional, duas fibras interligam os nós da rede (passando antes pelos OADMs), sendo uma delas a de proteção e a outra a principal (ativa). Na Figura 37 é apresentado o fluxo de informação no sentido horário para a fibra principal e anti-horário para a fibra de proteção, além de mostrar um exemplo de tráfego (em pontilhado), entrando em um OADM e saindo por outro, do nó A para B e do nó B para A através da fibra principal ou do nó A para B e do nó B para A através da fibra de proteção.

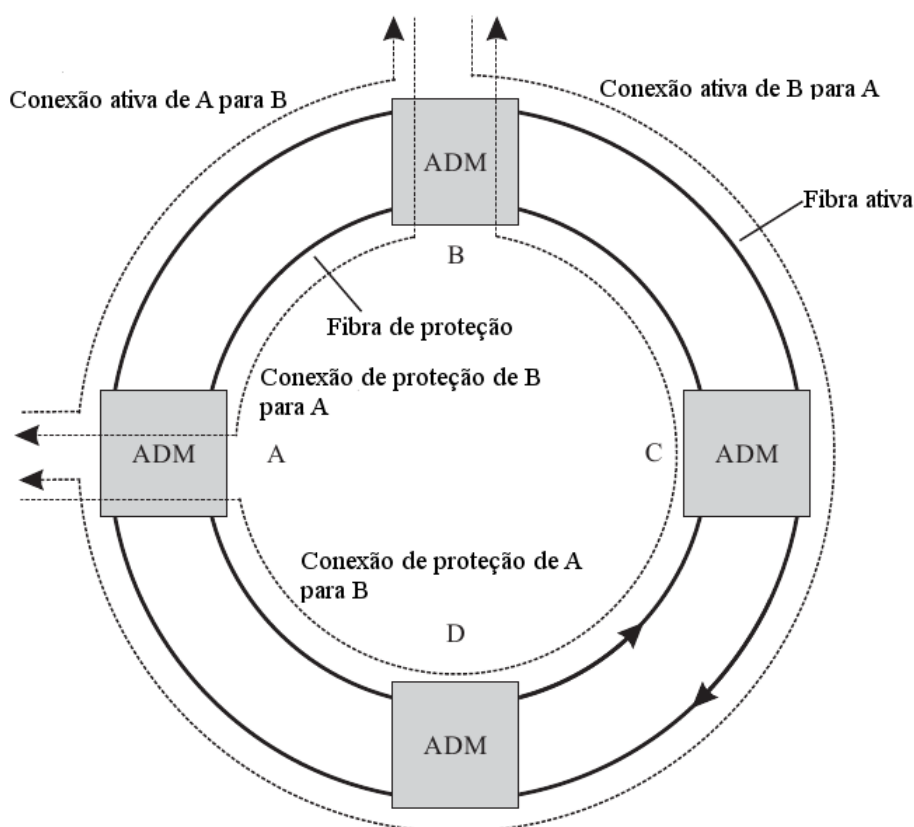


Figura 37 – Esquema de proteção unidirecional para redes em anel. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010)

### 6.1.5 Proteção bidirecional em anel

A comunicação bidirecional em uma rede em anel é feita por duas fibras, cada uma se comunicando em uma direção. Isso implica numa comunicação mais eficiente já que é escolhido o menor caminho para alcançar o o nó de destino. Assim, diminui o congestionamento da rede, fazendo-se melhor uso de sua capacidade. A proteção acontece quando adicionam-se outras duas fibras, cada uma com um sentido de

transmissão. A Figura 38 apresenta em tracejado a comunicação entre os nós A e B e mostra também as fibras ativas (externas) e de proteção (internas).

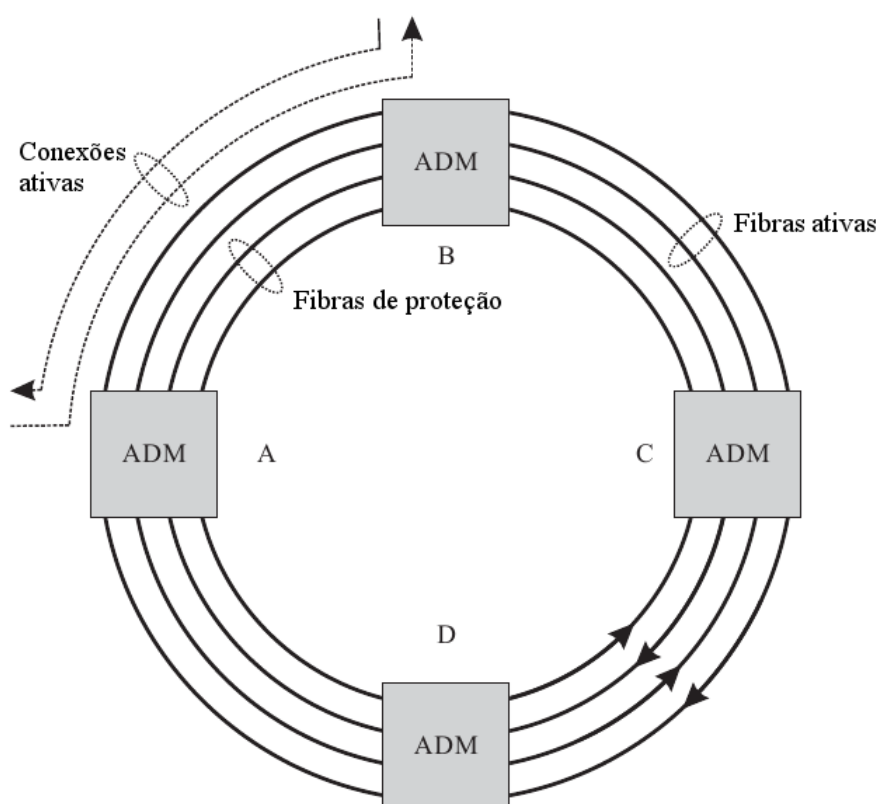


Figura 38 – Esquema de proteção bidirecional para redes em anel. Fonte (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010)

Neste esquema, são implementados dois mecanismos de proteção, o *span switching* e *ring switching*. No primeiro, quando há falha de comunicação entre dois nós, as fibras de proteção entre os nós são ativadas para reestabelecer o tráfego entre eles. No caso em que o cabo, ou as fibras, são cortados perdendo assim a comunicação entre dois nós (fibras principais e fibras de proteção), o serviço de comunicação é restaurado através da comutação por anel (*ring switching*), realizando-se o re-roteamento da comunicação dos dois nós através de nós vizinhos.

### 6.1.6 Proteção de uma rede em malha

As redes em malha são comumente usadas em vários países através das MANs (*Metropolitan Area Networks*) e, apresentam mais eficiência de proteção de banda do que as redes em anel. Segundo (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010), a eficiência do uso da banda de uma rede em malha depende de vários fatores como o fluxo do tráfego e o tipo de proteção usada. E quanto maior a rede (mais densa em relação a quantidade de nós presentes), mais benefícios a proteção pode trazer à ela. As proteções que podem ser usadas nas redes em malhas são aquelas já apresentadas

e discutidas aqui neste Capítulo. Podem utilizar 1+1, 1:1 e 1:N entre nós ou como usado nas redes em anéis, quando um ou mais anéis são interligados.

## 7 Evolução das redes OTN

Neste Capítulo serão apresentados os novos desafios das redes ópticas de transporte, as perspectivas futuras e as taxas que serão alcançadas com o desenvolvimento dessas redes segundo (MIYAMOTO; SANO; KOBAYASHI, 2012).

### 7.1 Motivação

A nova geração das redes ópticas, NG-OTN (*Next Generation Optical Transport Network*), surge para suprir a demanda atual por banda larga, seja pelo uso crescente de *smartphones* com acesso a internet com altas taxas de transmissão ou por residências que iniciam o acesso às redes de fibra óptica FTTH (*Fiber to the Home*). Dados de (MIYAMOTO; SANO; KOBAYASHI, 2012) apontam o aumento de 20% ao ano no consumo de banda, surgindo a necessidade de uma tecnologia que acompanhe esse crescimento.

A taxa de transmissão do quadro OTU4, que possui a maior taxa de bit dentre os quadros atualmente recomendados pela ITU-T (na casa dos 100 Gb) e já estudado neste trabalho, aparenta não ser mais suficiente para essa demanda por banda larga. Na Figura 39 apresenta-se um infográfico das tecnologias criadas e as taxas de bit ao longo dos anos, apresentando a idéia da nova geração das redes OTN, no caso, o quadro OTU5.

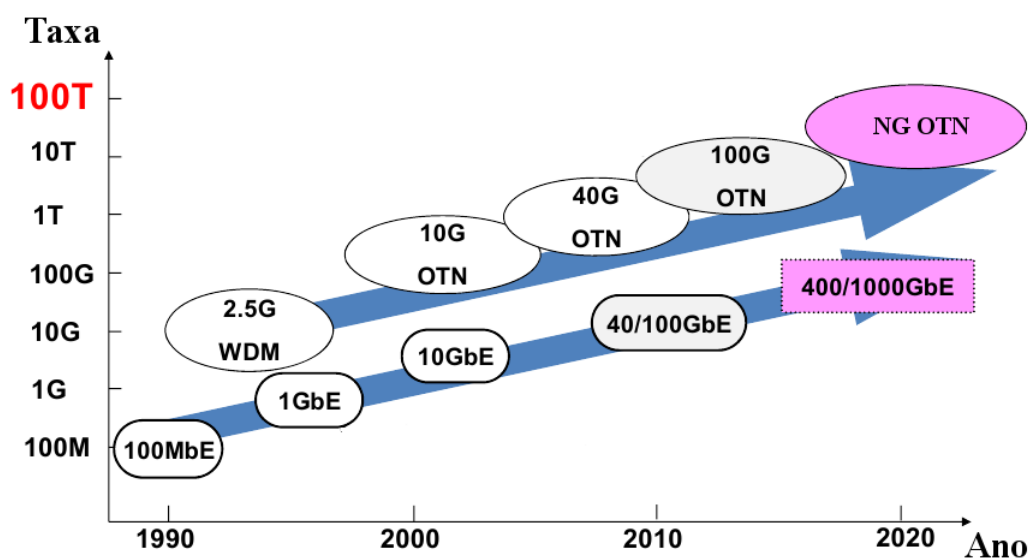


Figura 39 – Histórico e perspectivas das redes OTN. Fonte (MIYAMOTO; SANO; KOBAYASHI, 2012)



## 7.2 Surgimento da NG-OTN

Os quadros OTU $k$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ , foram criados para suportar os diversos sinais cliente que podem ser transportados ao longo da rede, como STM ou o Ethernet. Na Tabela 6 apresentam-se os sinais clientes e seu correspondente quadro e taxa do padrão OTN. Para a próxima geração das redes ópticas OTN, o quadro OTU5 será criado para transportar os novos quadros Ethernet de 400 Gb/s e 1 Tb/s, os quais serão padronizados pela IEEE 802.3 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). O OTU5 deverá se comportar assim como o OTU4, sendo obrigatório o uso do FEC.

Tabela 6 – Sinais clientes e os quadros OTN que os suportam

Sinais cliente		Quadro OTN	
STM-16	2,488 Gb/s	OTU1	2,7 Gb/s
STM-64	9,953 Gb/s	OTU2	10,7 Gb/s
STM-256	39,813 Gb/s	OTU3	43,0 Gb/s
10 Gigabit Ethernet	9,953 Gb/s	OTU2	10,7 Gb/s
40 Gigabit Ethernet	41,25 Gb/s	OTU3	43,0 Gb/s
100 Gigabit Ethernet	103,125 Gb/s	OTU4	111,8 Gb/s
400 Gigabit Ethernet ou 1 Terabit Ethernet	IEEE 802.3	OTU5	ITU-T

Na questão de desempenho para a NG-OTN, é desejável que se tenha capacidade ampliada, confiabilidade e compatibilidade com o sistema de construção, multiplexação, mapeamento e transporte do quadro com seus quadros predecessores. Deve ser compatível também com os recursos disponíveis atualmente, tal como espaçamento dos regeneradores de sinais (em torno de 100 km) e espaçamento entre canais DWDM de 50 GHz ou 100 GHz. Para o transporte de um sinal 400 Gbps, deseja-se obter uma eficiência espectral de 8 bps/Hz da banda de transmissão, o que pode ser alcançado utilizando modulação de amplitude em quadratura de 16 estados multiplexada em polarização (*Polarization Division Multiplexed Quadrature Amplitude Modulation* ou PDM-m-QAM), de ordem superior a 16 ( $m \geq 16$ ), conforme Figura 40, que é uma técnica de transmissão eficiente de alta velocidade de dados.

Em contrapartida, quanto maior a eficiência espectral devido ao formato de modulação de alta ordem, pior a relação sinal-ruído da banda de transmissão. Para poder usar altas ordens de PDM-m-QAM (e alcançar maior eficiência espectral, conforme Figura 40) é necessário aumentar a relação sinal-ruído em 10 dB. Para alcançar tais resultados, é necessário sobrepor as técnicas de amplificação em banda larga distribuída com baixo-ruído (MASUDA et al., 2009), compensação de efeitos não lineares utilizando DSP (*Digital Signal Processing*) (ODA et al., 2009) e obter alto ganho de FEC (MIYATA et al., 2010).

São muitos os desafios para se criar uma tecnologia para transmissão de alta

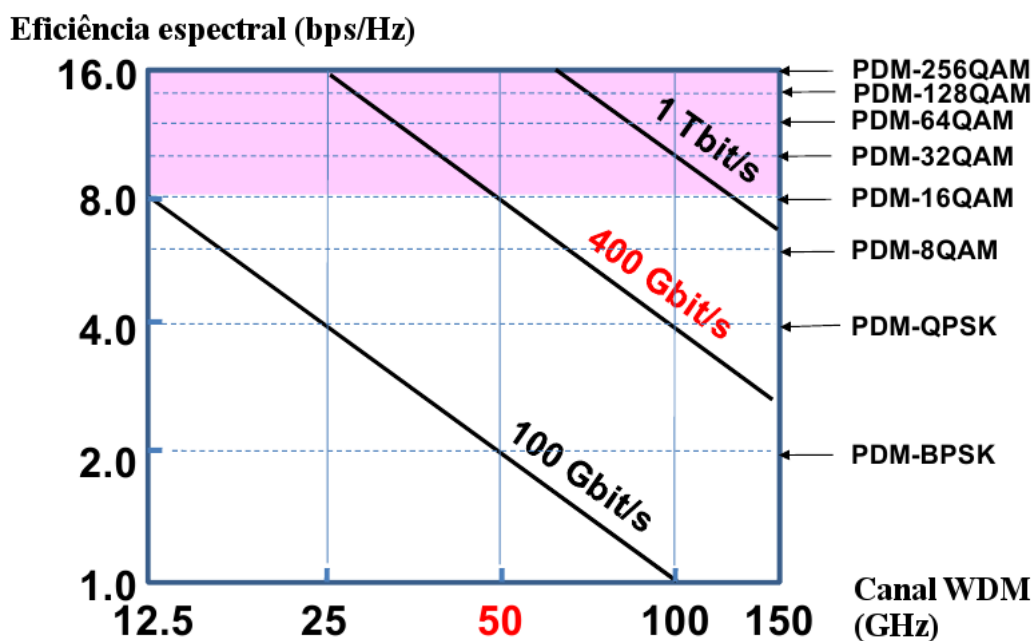


Figura 40 – Eficiência do uso da banda de transmissão em função do espaçamento WDM. Fonte (MIYAMOTO; SANO; KOBAYASHI, 2012)

taxa, suprimindo a demanda da população. Sobrepor as técnicas citadas, criando outras mais para taxas elevadas de transmissão que irão surgir com o decorrer do tempo, além de manter a coerência e criar um sistema que se adeque aos padrões internacionais como ITU-T e IEEE, mantendo a transparência e suportando o transporte das próximas gerações de sinais, são os desafios encontrado por pesquisadores e fabricantes de dispositivos ópticos ao redor do mundo.

## 8 Conclusões

Neste trabalho, levantou-se os aspectos das redes ópticas, com enfoque nas redes OTN. Foram estudadas a estrutura do quadro OTN, seu cabeçalho e as formas como são feitos os mapeamentos e a multiplexações de sinais cliente. Além disso, foram levantadas suas classificações em respeito à disposição física dos nós, às topologias e aos elementos comumente presentes nas redes. Foram apresentadas metodologias de proteção de redes ópticas ponto-a-ponto, em anel e em malha. Ao final, foram introduzidas as idéias da nova geração OTN, provindas da crescente demanda por banda larga.

Foi visto que as topologias de redes mais usadas atualmente são em malha. São usadas nas redes de acesso metropolitanas e de longa distância, *long-haul*, as quais interligam estados, países e até continentes. Para estabelecer a comunicação entre cada nó da rede, são necessários elementos que recebam o sinal óptico como os *transponders*, que tratem e transporte os sinais para dentro do domínio da rede OTN, de amplificadores, que minimizem o ruído e intensifiquem o sinal, de chaves ópticas para inserir proteção à rede e de multiplexadores de adição ou remoção de sinais.

Para que os sinais clientes possam carregar informações, tais como de suporte, manutenção e de monitoração, estes são mapeados para quadros no padrão OTN. Esse mapeamento é realizado adequando-se a taxa do sinal com a do padrão OTN, incluindo-se cabeçalhos. A estrutura típica de um quadro é de 15232 bytes para transporte do sinal e 1088 bytes para cabeçalho e FEC. O cabeçalho fornece recursos como monitoramento de conexão em cascata, de desempenho fim-a-fim e de supervisão da qualidade do sinal transportado, indicando alarmes de queda ou falha no sinal. A área destinada a FEC (1020 bytes) atua para melhorar a relação sinal-ruído pois, através do código Reed-Solomon, detecta-se, podendo até corrigir, falhas de bits no recebimento no quadro.

Ademais, deseja-se ter confiabilidade na rede e, para isso, insere-se mecanismos de proteção nos sinais ópticos que trafegam. São realizados na camada óptica através da OMS e da OCh, onde na primeira é tratado um conjunto de canais para se proteger e na segunda protege-se canal por canal. Os esquemas 1+1, 1:1 e 1:N de proteção de rotas são usados para as redes ponto-a-ponto, enquanto nas redes em anel protege-se usando multiplexadores de adição e remoção de canais juntamente com fibras de proteção adicionadas e chaves ópticas para comutação da rota. Nas redes em malha, as técnicas citadas anteriormente são sobrepostas, pois o tratamento realizado pode ser similar ao se separar a malha maior em subconjuntos de nós.

O aumento na demanda atual por banda larga, aponta para a necessidade de se ultrapassar o limite dos 100 Gb/s dos quadros de maior taxa do padrão OTN, o OTU4, criando-se assim o quadro OTU5. Nele, deseja-se transportar os sinais de 400 Gb/s e 1 Tb/s Ethernet definidos pela IEEE 802.3, e outros mais que possam surgir nessa taxa. Logo, são muitos os desafios para se criar uma tecnologia para transmissão de altíssima taxa, suprimindo a demanda da população. Sobrepor técnicas e criar outras para taxas elevadas de transmissão que surgirão com o decorrer do tempo, além de manter a coerência e criar um sistema que se adeque aos padrões internacionais como ITU-T e IEEE, mantendo a transparência e suportando o transporte das próximas gerações de sinais, são os desafios encontrados por pesquisadores e fabricantes de dispositivos ópticos ao redor do mundo.

# Referências

G.707/Y.1322. Recommendation ITU-T, *Network node interface for the synchronous digital hierarchy*. 2007. Citado na página 30.

G.709/Y.1331. Recommendation ITU-T, *Interfaces for the Optical Transport Network*. 2012. Citado 20 vezes nas páginas 8, 9, 17, 28, 29, 30, 31, 33, 35, 37, 38, 39, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50 e 51.

GUMASTE, A.; ANTONY, T. *Dwdm Network Designs and Engineering Solutions*. First. [S.l.]: Cisco Press, 2002. (Cisco Press networking technology series). ISBN 1587050749. Citado 6 vezes nas páginas 8, 18, 19, 20, 21 e 23.

GUMASTE, A.; KRISHNASWAMY, N. Proliferation of the optical transport network: a use case based study. *Communications Magazine, IEEE*, v. 48, n. 9, p. 54–61, Sept 2010. ISSN 0163-6804. Citado na página 17.

MASUDA, H. et al. 13.5-tb/s (135 x 111-gb/s/ch) no-guard-interval coherent ofdm transmission over 6,248 km using snr maximized second-order dra in the extended l-band. In: *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*. Optical Society of America, 2009. p. PDPB5. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2009-PDPB5>>. Citado na página 59.

MIYAMOTO, Y.; SANO, A.; KOBAYASHI, T. The challenge for the next generation otn based on 400gbps and beyond. In: *National Fiber Optic Engineers Conference*. Optical Society of America, 2012. p. NTu2E.3. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=NFOEC-2012-NTu2E.3>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 18, 58 e 60.

MIYATA, Y. et al. A triple-concatenated fec using soft-decision decoding for 100 gb/s optical transmission. In: *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2010. p. OThL3. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2010-OThL3>>. Citado na página 59.

ODA, S. et al. 112 gb/s dp-qpsk transmission using a novel nonlinear compensator in digital coherent receiver. In: *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*. Optical Society of America, 2009. p. OThR6. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2009-OThR6>>. Citado na página 59.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N.; SASAKI, G. H. *Optical Networks: A Practical Perspective*. 3. ed. [S.l.]: Elsevier, 2010. ISBN 9780123740922. Citado 12 vezes nas páginas 8, 9, 17, 18, 25, 26, 49, 52, 53, 54, 55 e 56.

TANENBAUM, A. S. *Redes de computadores*. 4. ed. [S.l.]: CAMPUS - RJ, 2003. Citado na página 19.