

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA**

MICHEL DUBIANI PEREIRA

**ASON – REDES ÓPTICAS COMUTÁVEIS AUTOMATICAMENTE
ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DO PLANO DE TRANSPORTE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2014**

MICHEL DUBIANI PEREIRA

**ASON – REDES ÓPTICAS COMUTÁVEIS AUTOMATICAMENTE
ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DO PLANO DE TRANSPORTE**

Monografia de Especialização apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Teleinformática e Redes de Computadores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Curitiba, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Teleinformática e Redes de Computadores - Área de Concentração: Informática.

Orientador: Prof. Valmir de Oliveira

**CURITIBA
2014**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que me auxiliaram em toda a minha trajetória profissional e acadêmica pois com seus conselhos, críticas, comentários pude me aprimorar cada dia mais. Dedico também à minha família e em especial minha esposa Denise pela paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por permitir a realização de mais esta etapa da vida acadêmica e profissional.

Agradeço aos colegas de classe e aos professores por compartilhar conhecimento e experiências acumuladas com os anos de trabalho e também em sala de aula.

Um agradecimento especial à minha família pelo apoio e compreensão durante o período em que estive dedicado a este trabalho.

À Universidade Técnica Federal do Paraná pela disponibilidade do espaço necessário e infraestrutura visando o melhor desenvolvimento das aulas.

Ao Orientador, Prof. Valmir de Oliveira pela orientação no desenvolvimento do trabalho.

EPÍGRAFE

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”

(Isaac Newton)

RESUMO

PEREIRA, Michel Dubiani. **ASON – Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente, Estudo da Tecnologia do Plano de Transporte**. 2014. 50p. Monografia (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores) – Programa de Pós-Graduação em Teleinformática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Com o desenvolvimento das redes DWDM as taxas de transmissão aumentaram com grande intensidade, porém características como gerenciamento e controle da rede não acompanharam esta evolução pois as redes DWDM não contem recursos que permitem este controle. Neste contexto foi desenvolvida a tecnologia ASON (Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente) que trazem conceitos de roteamento e resiliência de tráfego na camada física implementando o gerenciamento central da rede DWDM. Sua arquitetura básica consiste em 3 planos: Plano de Transporte, Plano de Controle e Plano de Gerencia. No Plano de Transporte é utilizada uma tecnologia que foi desenvolvida em paralelo mas com o mesmo intuito. Trata-se da OTN – Rede Óptica de Transporte, esta tecnologia adapta conceitos das redes SONET/SDH ao mundo DWDM provendo transparência, maior capacidade de monitoramento e melhora a detecção e correção de erros que existia nas tecnologias anteriores.

Palavras Chave: redes ópticas, DWDM, ASON, OTN, FEC

ABSTRACT

PEREIRA, Michel Dubiani. **ASON – Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente, Estudo da Tecnologia do Plano de Transporte.** 2014. 50p. Monografia (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores) – Programa de Pós-Graduação em Teleinformática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

With the development of DWDM transmission rates increased with great intensity, however characteristics as management and control of the network did not show this trend DWDM networks because it contains features that allow this control. In this context was developed the ASON (Automatically Switchable Optical Network) technology that brings concepts of routing traffic and resilience in the physical layer implementing central management of DWDM network. Its basic architecture consists of three plans: Transport Plane, Control Plane and Management Plane. In the Transport Plane, a technology that was developed in parallel but with the same purpose is used. It OTN - Optical Transport Network, this technology adapts concepts of networks SONET / SDH to DWDM world providing transparency, greater tracking ability and improves detection and correction of errors that existed in previous technologies.

Keywords: optical networks, DWDM, ASON, OTN, FEC

Tabela de Figuras

Figura 1. Estrutura OTH.....	12
Figura 2. Alguns protocolos suportados pelas redes OTN.....	14
Figura 3. Arquitetura de uma Rede Óptica Comutável Automaticamente.....	15
Figura 4. Diagrama ilustrando a relação entre algumas normas OTN da ITU-T.	23
Figura 5. Hierarquia OTN.....	24
Figura 6. TCP's das camadas OTN.	24
Figura 7. Estrutura básica de transporte OTN.	25
Figura 8. Exemplo de multiplexação em redes OTN.....	27
Figura 9. Funções da adaptação e terminação da OTS.....	29
Figura 10. Funções de terminação da OTS.....	30
Figura 11. Funções da adaptação entre as camadas OTS e OMS (a) OTS _n /OMS _n _A_So, (b)OTS _n /OMS _n _A_Sk	30
Figura 12. Estrutura das interfaces OTN.	31
Figura 13. Estrutura Frame G.709 OTN.	32
Figura 14. Campos do ODU Overhead.....	34
Figura 15. Monitoramento de conexões tandem.....	36
Figura 16. BER corrigida em relação à potência de recepção para situação com e sem FEC.....	39
Figura 17. Relação teórica entre BER de entrada e BER de saída com FEC utilizando RS (255, 239) de acordo com a ITU-T G.975.	39
Figura 18. Exemplo de solução com e sem uso de multiplexação OTN.....	41
Figura 19. Estrutura de mapeamento com uso de SDH.	43
Figura 20. Estrutura de mapeamento sem uso de SDH.	44
Figura 21. Comparação de facilidades de gerenciamento em sistema com e sem gerenciamento OTN.	46
Figura 22. Comparação entre etapas para identificação de falha ou degradação com e sem gerência OAM OTN.....	47

Lista de Siglas

AMP – Asynchronous Mapping Procedure
ASON – Automatic Switched Optical Network
ATM – Asynchronous Transfer Mode
BER – Bit Error Rate
BMP – Bit-Synchronous Mapping Procedure
DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing
FC – Fiber Channel
FEC – Forward Error Correction
GbE – Gigabit Ethernet
Gbps – Gigabits per second
GFP-F – Frame-Mapped Generic Framing Procedure
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP – Internet Protocol
ITU-T – International Telecommunication Union - Telecommunication
Standardization Sector
km – quilômetro
LAN – Local Area Network
MAN – Metropolitan Area Network
Mbps – Megabits per seconds
MPLS – Multiprotocol Label Switching
MPLS-TP – Multiprotocol Label Switching - Transport Profile
GMPLS – Generic Multiprotocol Label Switching
OADM – Optical Add-Drop Multiplexer
OAM – Operation, Administration and Maintenance
OCh/OChr – Optical Channel
ODU – Optical Data Unit
OLT – Optical Line Terminator
OMS – Optical Multiplex Section
ONT – Optical Network Terminal
ONU – Optical Network Unit
OPS – Optical Physical Section
OPU – Optical Payload Unit

OTN – Optical Transport Network
OTS – Optical Transmission Section
OTU – Optical Channel Transport Unit
PMD – Polarization Mode Dispersion
QoS – Quality of Service
ROADM – Reconfigurable Add-Drop Multiplexer
SAN – Storage Area Network
SDH – Synchronous Digital Hierarchy
SONET – Synchronous Optical Network
STM – Synchronous Transport Module
Tbps – Terabits per second
TCM – Tandem Connection Monitoring
TDM – Time Division Multiplexing
TS – Timeslot
WDM – Wavelength Division Multiplexing

Sumário

1	INTRODUÇÃO:	11
1.1	Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente - ASON	14
2	Objetivos	18
3	OTN – OPTICAL TRANSPORT NETWORK	19
3.1	Introdução	19
3.2	Recomendações ITU referentes às Redes OTN	22
3.3	Estrutura de Camadas	23
3.4	Estrutura do Frame G.709 OTN	32
3.4.1	Overhead	33
3.4.2	Alinhamento	33
3.4.3	OTU Overhead	33
3.4.4	ODU Overhead	34
3.4.5	OPU Overhead	35
3.5	Tandem Connection Monitoring	35
3.6	Forwarding Error Correction – FEC	36
4	Valor Agregado pela OTN	38
4.1	Transmissão Confiável e Eficiente em Custo	38
4.2	Multiplexação de Diferentes Protocolos e Transparência	40
4.3	Operação, Administração e Gerenciamento (OAM)	44
4.4	Gerenciamento Individualizado de Cada Comprimento de Onda	47
4.5	Capacidade de Constante Evolução	47
5	Conclusão	48
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO:

Atualmente as necessidades dos serviços de transmissão em banda larga tiveram um grande aumento ocasionando na crescente demanda por redes para o escoamento destes serviços. Redes que forneçam altas taxas de transmissão, transparência e baixo custo são cada vez mais desenvolvidas e redes ópticas como as baseadas em multiplexação por comprimento de onda denso (DWDM – *DenseWavelengthDivisionMultiplexing*) que permitem enlaces com grandes distâncias e altas taxas de transferência de bit surgiram como alternativa viável neste cenário.

A multiplexação por comprimento de onda (WDM) permite que vários canais sejam transmitidos na mesma fibra óptica onde cada canal utiliza uma faixa dentro do espectro óptico transportando informações distintas e utilizando técnicas de modulação e codificação também independentes permitindo que cada canal tenha sua própria taxa de transmissão, a soma destas taxas resulta na taxa de transmissão total na fibra.

Nas redes DWDM tradicionais a capacidade de gerenciamento e controle são limitadas impedindo que haja garantias de confiabilidade, proteção/restauração e qualidade de serviço, neste cenário surge a discussão a respeito de redes ópticas inteligentes como a Rede de Transporte Óptico (OTN – *OpticalTransport Network*) definida na Recomendação G.709 pela *InternationalTelecommunications Union - Telecommunications*(ITU-T) cuja primeira versão foi aprovada em 2003 e as Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente (ASON – *AutomaticSwitchedOptical Networks*) definida na Recomendação G.8080 pela ITU-T cuja primeira versão foi aprovada também em 2001.

A tecnologia OTN surgiu no final da década de 90 como sucessora das redes SONET/SDH e foi normalizada pela ITU-T em 2003. A rede OTN é compatível com os padrões e tecnologias anteriores a ela. Esta define uma hierarquia de transporte óptica OTH (*OpticalTransportHierarchy*) estruturada em duas etapas, representadas na Figura 1. A primeira etapa é realizada no domínio elétrico, onde se forma a frame OTU-k estruturada numa ordem hierárquica assim como na SONET/SDH. A segunda etapa é realizada no domínio óptico, onde se forma

o módulo de transporte ótico OTM- $n.m$ (*Optical Transport Module*), onde n representa o número de canais óticos e m é dependente do tipo de sinal, sendo 0 para canais de bit rate misto e tomando os valores de k (OTU k , $k = 1, 2, 3, 4$) em sinais de bit rate fixo. Esta segunda etapa é baseada na tecnologia DWDM. Os sinais OTU k permitem taxas de 2,5 Gbps, 10 Gbps, 40 Gbps e 100 Gbps, para $k = 1, 2, 3$ e 4, respectivamente. Ao lembrar o crescente aumento de tráfego de dados nas redes nos últimos anos e com o aparecimento da necessidade de transmissões a 100 Gbps.

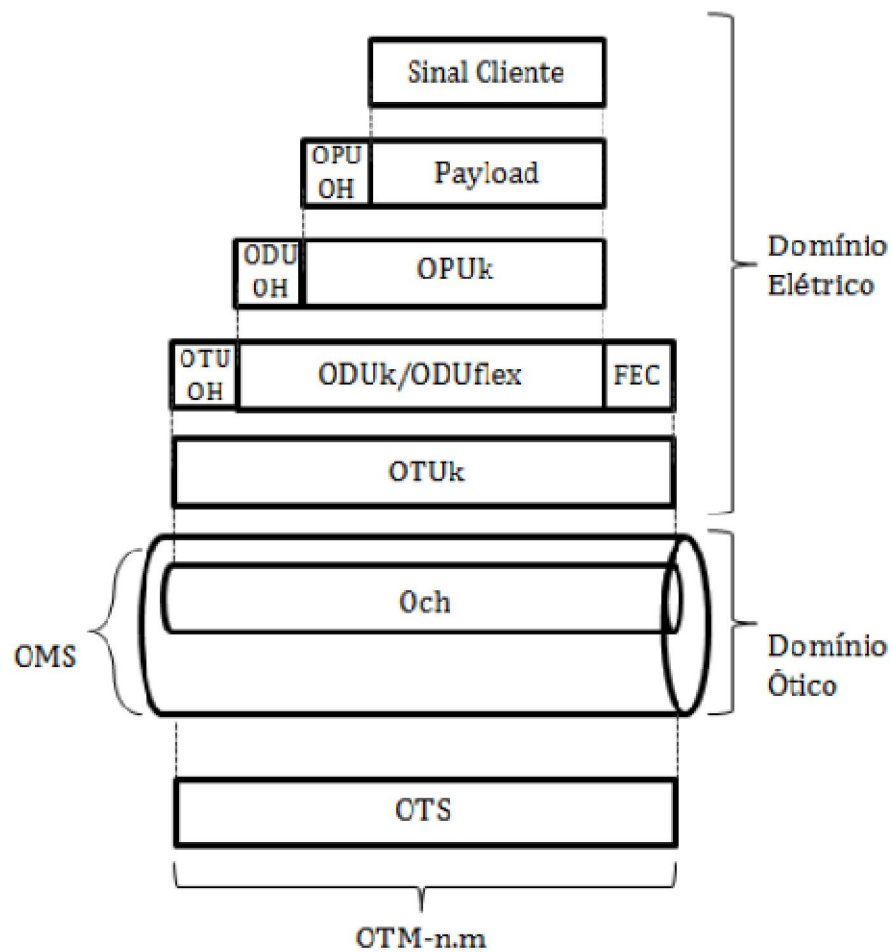


Figura 1. Estrutura OTH.

As principais vantagens da OTN face à SDH são melhor técnica de correção de erros usando FEC, transparência perante vários protocolos, melhor escalabilidade e monitorização de conexões *Tandem TCM* (*Tandem Connection*

Monitoring), possibilitando a monitorização de até seis ligações. Um dos benefícios das redes OTN é o fato de introduzirem uma técnica decorreção de erros, FEC mais avançada que as presentes no SDH e nas tecnologias anteriores. O FEC na Rec. G.709 é baseado no algoritmo de *Reed-SolomonRS* (255,239), adicionando bits redundantes ao sinal para detecção e correção de erros para que os dados inseridos na rede possam ser recuperados. Na Rec. G.975.1 são descritos FEC que utilizam algoritmos distintos do *Reed-SolomonRS* (255,239), com maiores ganhos de código, utilizados em ligações submarinas transatlânticas. Além disto, o FEC também melhora os efeitos da dispersão no sinal, melhora a relação sinal-ruído óptica OSNR até cerca de 6 dB permitindo, para uma mesma probabilidade de erro de bit BER (*Bit Error Rate*) ou qualidade de transmissão QoT, um nível de sinal até 6 dB abaixo do nível necessário sem correção de erros.

Dito de outro modo, para o mesmo nível de potência, permite uma melhor QoT sendo que um BER de 10^{-4} sem FEC pode chegar a um BER inferior a 10^{-12} . Este fato possibilita (Tafal, 2013):

- Requisitos de regeneração menos rígidos;
- Distâncias mais elevadas;
- Maior número de canais;
- Redução dos efeitos não-lineares que degradam a OSNR;
- Maior facilidade na introdução de elementos de rede óticos, já que a sua introdução acarreta uma perda de potência.

A OTN é um padrão que permite o transporte transparente de vários sinais. Suporta diversos tipos de sinais incluindo sinais SDH e *Ethernet*, a diferentes taxas, como esquematizado na Figura 2, mantendo as suas características originais e transportando-os de forma transparente. Permite que os cabeçalhos de controle de qualquer sinal sejam transmitidos nos cabeçalhos do frame OTUk de forma a evitar a sobrecarga causada pelo uso de vários protocolos. Isto significa que podem ser transportados vários sinais STM-N sem necessidade de modificação de nenhum dos cabeçalhos SONET/SDH.

Outra vantagem da OTN está na escalabilidade. As tecnologias anteriores a ela, como a SONET/SDH, foram criadas para transporte de sinais de voz, daí a granularidade destas ser bastante elevada. A OTN tendo sido desenvolvida

para transporte de serviços com taxas muito mais elevadas, por exemplo *Ethernet*, tem uma granularidade mais fina e uma estrutura de multiplexação menos complexa, possibilitando um transporte mais eficiente de vários sinais cliente simultaneamente (Bernardo, Tronco, Lessa, & Mobilon, 2011). Há ainda a questão de que por vezes um sinal de uma operadora tem de ser transportado, num segmento do caminho por ele percorrido, na rede de outra operadora. A operadora inicial tem de conseguir monitorar o segmento do caminho na rede da outra operadora. Este tipo de ligações é denominado de conexões *Tandem*. A OTN inclui monitorização destas ligações através do campo TCM do cabeçalho ODU permitindo até seis conexões *Tandem* ao passo que a rede SONET/SDH apenas permite uma.

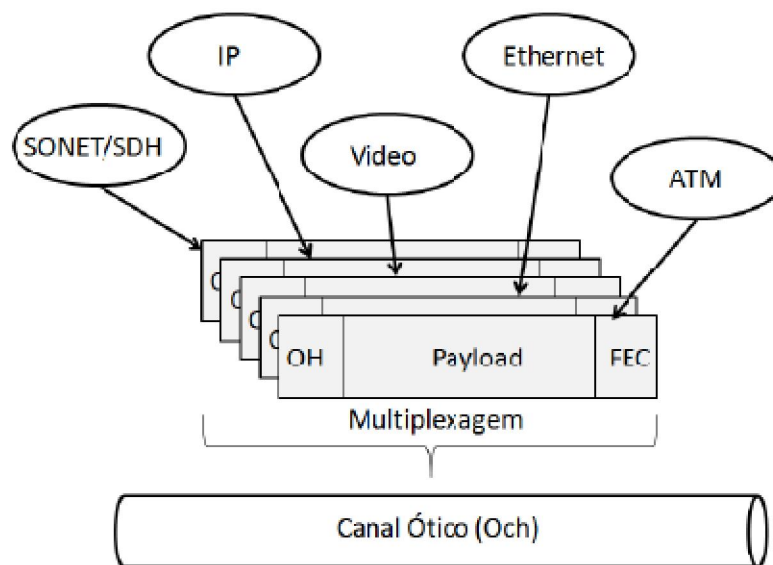


Figura 2. Alguns protocolos suportados pelas redes OTN.

1.1 Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente - ASON

As redes ASON foram projetadas para prover conexões fim-a-fim entre os elementos de rede óptica através de um sistema inteligente de gerenciamento e controle assim satisfazendo os requisitos de resiliência, Engenharia de tráfego e policiamento a fim de prover QoS, segurança e confiabilidade. A Figura 3 apresenta uma arquitetura genérica de uma rede ASON e seus elementos. A rede ASON pode ser subdividida em três planos distintos:

- I. Plano de Transporte – Responsável pelo transporte dos serviços fim-a-fim, seja unidirecional ou bidirecional e detecta o estado das conexões (exemplo: falhas e degradações nas fibras e equipamentos). A principal tecnologia utilizada neste plano é a OTN, objeto deste estudo, que será detalhada a seguir.
- II. Plano de Controle – Desempenha a função de engenharia de tráfego e controle das conexões, através de interfaces de sinalização entre os planos de transporte e gerencia controla a configuração, o estabelecimento e encerramento das conexões. O plano de controle também faz a função de restaurar as conexões através do restabelecimento das informações referentes ao estado da conexão.

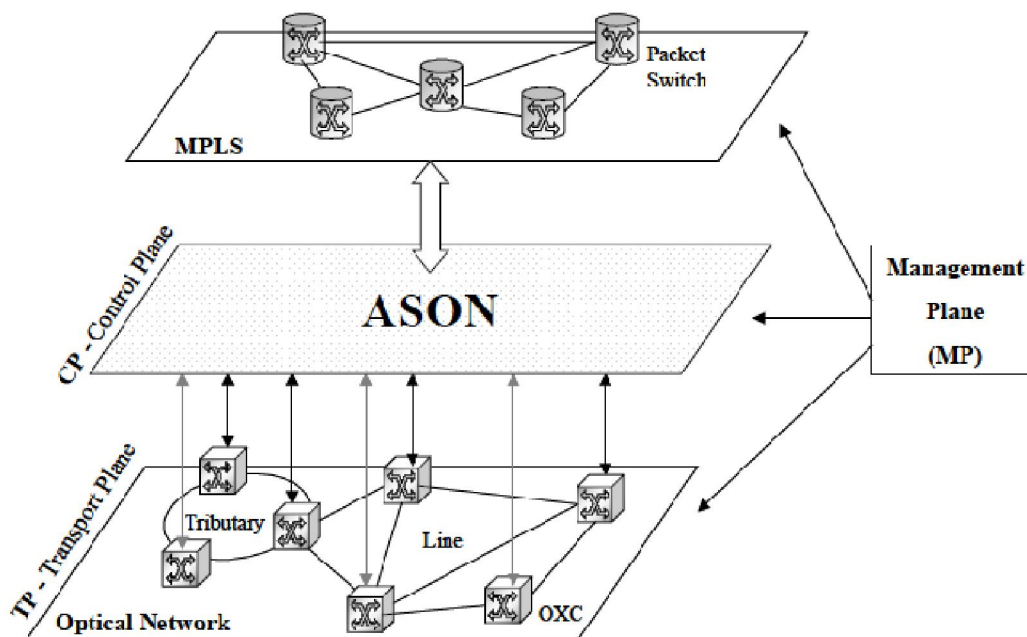


Figura 3. Arquitetura de uma Rede Óptica Comutável Automaticamente - ASON

- III. Plano de Gerencia - desempenha as funções de gerenciamento, tais como: falhas na rede, verificação de desempenho da rede, configuração dos elementos de rede e segurança aos planos de transporte e controle. Com base nestes três planos que compõem o ASON é possível habilitar sua inteligência através da interconexão entre a interface cliente e a interface óptica de modo a escolher um caminho mais curto com custo mínimo. O ASON

habilita a configuração de cada OXC escolhido e define um caminho óptico para transportar um tráfego baseado no protocolo orientado à conexão fim-a-fim. Este protocolo é capaz de ativar a restauração e proteção óptica distribuída no plano de transporte. Quando ocorre uma falha no OXC ou mesmo num enlace óptico, um conjunto de sinalização é trocado entre os planos a fim de reconfigurar um novo caminho óptico e manter o QoS exigido pelos usuários finais.

O plano de controle pode gerar 3 tipos de conexão como:

- Permanente - conexão estabelecida através da configuração de cada NE via sistema de Gerencia ao longo de um caminho óptico com os seus parâmetros requeridos pré-definidos para estabelecer uma conexão fim-a-fim.
- Levemente-permanente – Conexão na qual apenas o NEs inicial é definido via Plano de gerencia, as demais configurações como rotas ópticas e NEs intermediários são realizada pelo Plano de Controle
- Comutada – Conexão configurada diretamente pelo equipamento “cliente”. Este solicita uma conexão ao Cross-connect óptico onde a requisição é tratada pelo Plano de Controle e a conexão é estabelecida.

A restauração das conexões em caso de problemas envolvendo fibras, equipamentos pode ser feita de 3 maneiras(Dante, 2005):

- Reparo Global: quando o mecanismo de recuperação do sistema verifica um novo caminho a partir da origem da conexão, ocasionando uma maior velocidade na recuperação do serviço.
- Reparo Local: O mecanismo de recuperação atua apenas no enlace com problemas, apresentando soluções apenas ao seu trecho sem que haja verificação global de novos caminhos para o serviço, em caso de rompimento de fibras é possível que este mecanismo não consiga restaurar todos os sistemas pois as suas opções podem estar saturadas.
- Rota Pré-Planejada: Neste caso o caminho de recuperação está previamente definido na rede tornando o restabelecimento do serviço mais rápido que o reparo local porém em caso de rompimento catastrófico os caminhos pré-planejados de todos os serviços podem

estar compartilhando os mesmos recursos ocasionando um colapso pois estes recursos são limitados.

Os mesmos protocolos de sinalização e roteamento utilizados pelo MPLS poderão ser usados também no ASON desde que eles satisfaçam as exigências do OTN. Há outros protocolos de roteamento no domínio IP que podem ser aplicados ao ASON sob as mesmas condições. São eles: RIP (*Routing Information Protocol*), IGRP (*Interior Gateway Routing Protocol*) e EIGRP (*Enhanced Interior Gateway Routing Protocol*). Estes protocolos adicionam o rótulo “estendido” ou “*” para indicar que são aplicáveis ao OTN e, conseqüentemente, ao ASON. Exemplos: *OSPF-Extended*, *CSPF**, *CR-LDP**, *RSVPTE**, *LMP-Extended* e *BGP-Extended*.

Para a atribuição de comprimentos de onda, muitos algoritmos clássicos são utilizados no ASON, tais como: *First-Fit* (FF), *Least-Used*(LU), *Most-Used*(MU), *RelativeCapacityLoss*(RCL) e *DistributedRelativeCapacityLoss*(DRCL).

2 Objetivos

Apresentar a tecnologia OTN (ITU-T G.709) que é aplicada dentro das Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente em seu Plano de Transporte.

Detalhar sua arquitetura, características de multiplexação, estrutura dos frames, melhorias em relação às tecnologias anteriores.

Apresentar os mecanismos que tornam a transmissão utilizando redes OTN com custo reduzido e alta confiabilidade, além de transparentes aos mais variados tipos de aplicações.

3 OTN – OPTICAL TRANSPORT NETWORK

Assim como novas demandas aparecem no mundo das redes de comunicações, novos padrões e tecnologias surgem para supri-las. A OTN é uma tecnologia desenvolvida para ser uma evolução das redes de transporte de núcleo, combinando a tecnologia DWDM com os benefícios da tecnologia SONET/SDH e trazendo a promessa de atender as demandas por maiores capacidades de banda e melhora no desempenho das redes. Este capítulo apresenta uma visão global da OTN, suas vantagens em relação às outras tecnologias, as recomendações em que se baseia, descrição da sua estrutura, detalhamento da estrutura dos frames, FEC e monitoração de conexões Tandem.

3.1 Introdução

Na primeira geração das redes ópticas, essas eram essencialmente usadas para transmissão e aumento da capacidade (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2009), já que a fibra óptica é um meio que provê baixa taxa de erro de bits e alta capacidade de transmissão em comparação com outras tecnologias. Projetadas para serviços ponto a ponto e carregando um sinal óptico por fibra, todas as operações de comutação e outras funções inteligentes dessa primeira geração eram feitas eletronicamente, a partir de uma conversão O-E-O em cada elemento de rede.

Como exemplos dessa primeira geração podem ser citados as redes SONET e SDH, tecnologias maduras de transporte digital sobre a camada óptica, estabelecidas em praticamente todos os países do mundo. Quando SONET/SDH foi pensado, no começo da década de 80, o tráfego das telecomunicações era predominantemente de voz. Esse cenário mudou durante os últimos anos e a demanda por tráfego para internet e telefonia móvel tem crescido.

Essa demanda, até agora, tem sido suprida por uma combinação do aumento das taxas de linha (TDM – *Time Division Multiplexing*) e a transmissão de vários comprimentos de onda por uma mesma fibra (WDM - *Wavelength-Division Multiplexing*). Entretanto, conforme as redes evoluem para maiores taxas de transmissão, os limites físicos impostos pelo meio de transporte (fibra óptica) se tornam críticos. Além disso, criar multiplexadores para taxas de transmissão muito altas se confronta com a complexidade do sistema eletrônico para gerar esse sinal e efeitos como a dispersão tendem a piorar à medida que a banda de frequências utilizada aumenta como consequência de maiores taxas de transmissão.

Neste contexto tem crescido a idéia de que as redes ópticas podem fornecer funções mais complexas do que apenas uma conexão ponto-a-ponto, incorporando operações de comutação e roteamento diretamente na camada óptica, assim como o monitoramento e gerenciamento da rede em diversos níveis.

Com o objetivo de delinear essas funções bem como a arquitetura da camada óptica, a ITU criou a OTN (ITU-T G.872, 2012), (ITU-T G.709, 2012). Muitos dos conceitos usados na OTN são baseados nas redes SDH/SONET, como a estrutura em camadas, proteção e outras funções de gerenciamento. No entanto, alguns elementos-chave são adicionados como o gerenciamento de canais ópticos fim a fim no domínio óptico sem a necessidade de conversão para o domínio elétrico e a inclusão do FEC (*Forward Error Correction*) que permite um melhor gerenciamento de erros e linhas ópticas mais extensas.

A OTN oferece também suporte ao DWDM, com a transmissão de dados simultaneamente em múltiplos comprimentos de onda onde cada comprimento se comporta como uma fibra “virtual”. Desse modo, uma única fibra pode prover múltiplos canais de dados ponto a ponto.

Em seguida são detalhados alguns dos principais serviços onde a OTN oferece aprimoramentos sobre as tecnologias anteriores:

- Escalabilidade aprimorada: SONET/SDH possui uma interface que multiplexa fluxos de baixa taxa em fluxos com maiores taxas utilizando uma hierarquia TDM no domínio eletrônico. No entanto, a granularidade de banda que SONET/SDH é capaz de multiplexar está a uma ou duas

ordens de magnitude dos sinais WDM, de modo que para carregar esse tipo de sinal tem-se um aumento na quantidade e *overhead* trafegando pela rede. A OTN define um esquema de multiplexação similar ao utilizado nas redes SONET/SDH, porém transporta dados nativamente com taxas de 2,5, 10 e 40 Gbps (*Gigabit per second*) com um *overhead* otimizado para esse tipo de rede.

- Transporte transparente do sinal cliente: Alguns sinais clientes são encapsulados diretamente dentro da OTN, enquanto que em outros tipos de tráfego utiliza-se o GFP (*Generic Framing Procedure*). Desse modo a rede OTN pode transportar de forma transparente qualquer tipo de sinal digital, independente de aspectos específicos de cada cliente e é por isso chamada de encapsulador digital (*digital wrapper*). É essa transparência que permite o transporte de uma grande quantidade de tipos de serviço, entre eles: serviços de comprimento de onda, serviços SONET/SDH e algumas outras tecnologias como Ethernet, Fiber Channel, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), Frame Relay, e IP. Esses sinais são transportados sem que haja terminação do sinal cliente em cada elemento de rede, tornando possível o transporte sem alterações nas características intrínsecas do sinal original (formato, taxa de bits e *clock*).
- Capacidade de usar FEC: O SONET/SDH possui um mecanismo de FEC, porém utiliza para isso bytes não padronizados do cabeçalho. A OTN possui um campo maior e otimizado para redes OTN (ITU-T G.709, 2012). Isso permite o alcance, sem regeneração, de maiores distâncias de transmissão, uma vez que o algoritmo é capaz de corrigir uma quantidade maior de erros de bit.
- Melhor nível de TCM (*Tandem Connection Monitoring*): Redes OTN provêem suporte a até seis níveis de TCM independentes (contra um nível suportado por SONET/SDH), tornando possível o monitoramento paralelo de vários segmentos da rede. Uma explicação mais detalhada de como o TCM funciona é apresentada mais adiante, na seção referente à estrutura da OTN.

- OAM&P (*Operation, Administration, Maintenance and Provisioning*): Redes OTN provêm várias funcionalidades de Operação, Administração, Manutenção e Aprovisionamento, muitas dessas herdadas das redes SONET/SDH e expandidas para as camadas elétricas da rede OTN. Essas informações são carregadas fim a fim no frame, permitindo que informações de gerenciamento sejam transmitidas entre diferentes operadores de rede.

3.2 Recomendações ITU referentes às Redes OTN

Uma rede OTN é composta por um conjunto de ONEs (*Optical Network Element*), interconectados por links de fibras ópticas, e capazes de prover transporte, multiplexação, roteamento, gerenciamento, supervisão e mecanismos de sobrevivência para os canais ópticos contendo os sinais cliente. Uma série de recomendações é definida pela ITU a fim de padronizar a OTN. As recomendações citadas a seguir constituem o núcleo da arquitetura.

A recomendação G.805 (ITU-T G.805, 2000) descreve uma arquitetura funcional genérica das redes de transporte, que serve como base para a modelagem de todas as tecnologias para redes de transporte, como, por exemplo, ATM, SDH e OTN. Uma série de componentes arquiteturais genéricos é definida de modo a permitir a descrição funcional de uma rede de transporte independente da tecnologia utilizada.

Com base na modelagem fornecida pela recomendação G.805 a recomendação G.872 (ITU-T G.872, 2012) apresenta a arquitetura funcional da OTN, estruturando a rede em camadas do tipo cliente/servidor. Além disso, são descritas as funcionalidades específicas de cada uma dessas camadas, como funcionam as associações entre elas e o tipo de informação característica que é trafegada.

A recomendação G.709 (ITU-T G.709, 2012) define as interfaces OTN com base em uma hierarquia de multiplexação digital e óptica, especificando as taxas de bits, a estrutura dos frames, o formato dos cabeçalhos de cada camada e o formato para mapeamento de sinais clientes. É nessa recomendação que se define o funcionamento do FEC (sugestão de uso do código Reed-Solomon) e do encapsulamento digital OTN.

A recomendação G.798 (ITU-T G.798, 2012) define uma série de blocos funcionais que permitem a modelagem dos elementos da rede OTN. Os blocos funcionais baseiam-se na hierarquia de camadas da recomendação G.872 e nos esquemas de multiplexação apresentados na recomendação G.709, descrevendo as funções de adaptação e de terminação de trilhas das camadas OTN. Nessa recomendação também é detalhado como funciona a correlação de alarmes e defeitos.

A Figura 4, retirada de (Iniewski, McCrosky, & Minoli, 2008), ilustra as dependências entre algumas dessas recomendações.

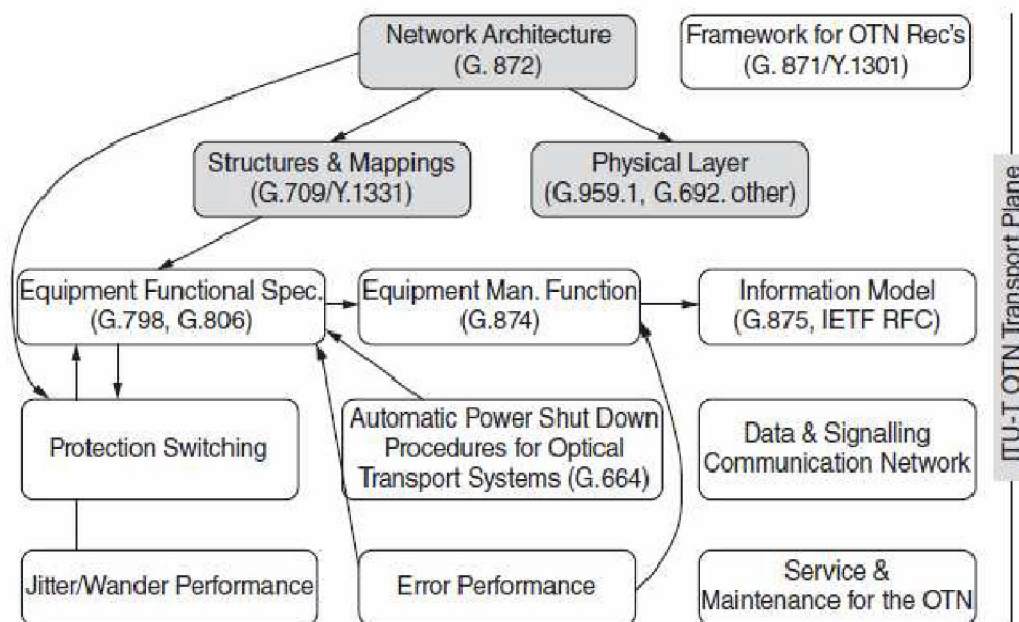


Figura 4. Diagrama ilustrando a relação entre algumas normas OTN da ITU-T. (Iniewski, McCrosky, & Minoli, 2008)

3.3 Estrutura de Camadas

A OTN tem sua arquitetura funcional dividida em camadas. Essas camadas são organizadas em duas hierarquias, uma responsável pela parte óptica, a OTH (Optical Transport Hierarchy) e outra pela parte digital DTH (Digital Transport Hierarchy) (Figura 5).

Como pode ser observado na Figura 2.3 a OTN é composta por seis camadas, definidas de acordo com as diferentes funcionalidades providas pela OTN: OPU (*Optical Channel Payload Unit*), ODU (*Optical Channel Data Unit*),

OTU (*OpticalChannelTransport Unit*), OCh (*OpticalChannelLayer*), OMS (*OpticalMultiplex Section*) e OTS(*OpticalTransmissionSection*).

Cada uma dessas camadas e suas respectivas funcionalidades são distribuídas pelarede e ativadas quando atingem seusTCP's, ilustrados na Figura 6.

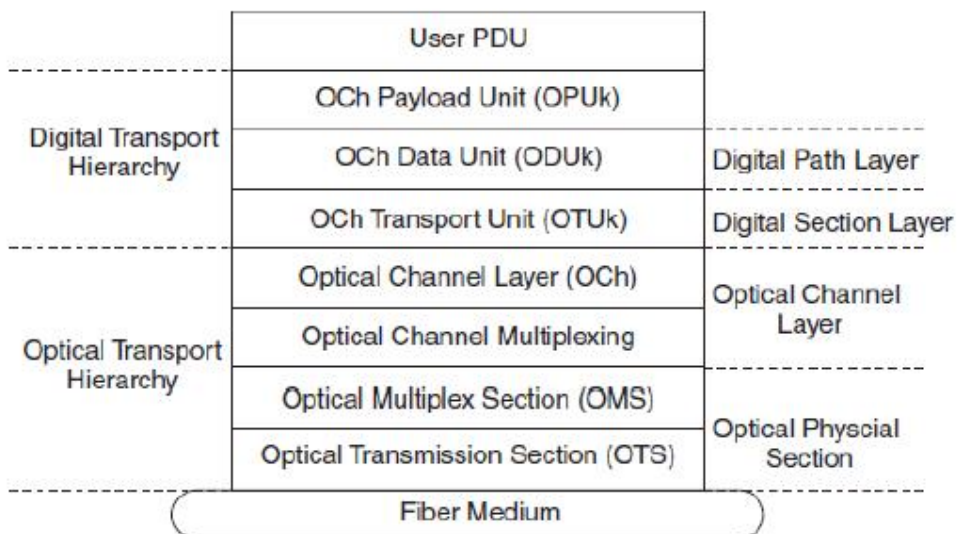


Figura 5.Hierarquia OTN. (Iniewski, McCrosky, & Minoli, 2008)

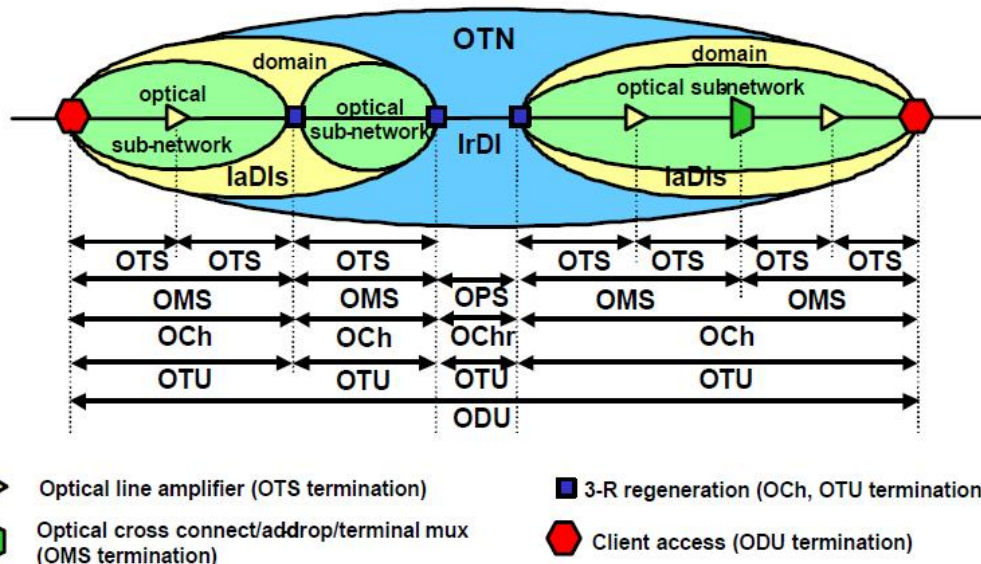


Figura 6.TCP's das camadas OTN.

Conforme descrito na seção anterior, as camadas são baseadas no conceitocliente/servidor, de modo que cada camada fornece um serviço para a camada imediatamenteacima na hierarquia. Para que o mapeamento do sinal cliente respeite este conceito, eles sãoencapsulados usando a estrutura ilustrada na Figura 7.

Como ilustrado na Figura 7, para se criar um frame OTU, o sinal cliente éprimeiroadaptado na camada OPU. Essa adaptação consiste em ajustar a taxa do sinal cliente à taxa daOPU. Seu cabeçalho contém informações que suportam a adaptação do sinal cliente epermitem operações de justificação para ajuste da taxa de transmissão. Uma vez adaptado, aOPU é mapeada em uma ODU.

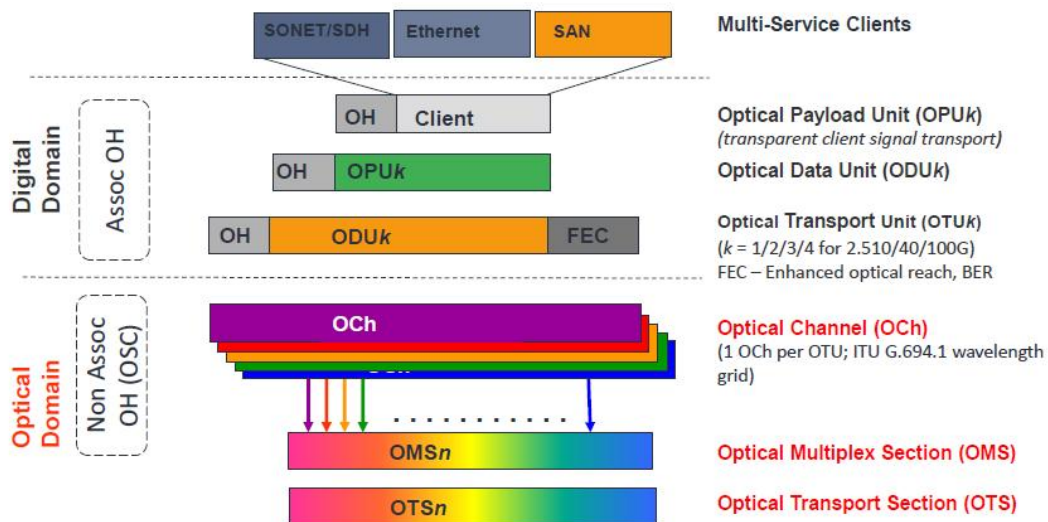


Figura 7. Estrutura básica de transporte OTN (Valiveti).

A ODU mapeia a OPU e adiciona o cabeçalho necessário para garantir supervisão fim-a-fim e a monitoração de até seis níveis de conexões tandem. A ODU também realiza a multiplexação digital e se apresenta como um caminho digital fim-a-fim para o sinal cliente.

Finalmente, a ODU é mapeada na OTU, que provê alinhamento de quadros, assim como monitoramento de sessões e o FEC. Segundo a G.709, uma estrutura de frame OTU completa (OPU, ODU e OTU) é capaz de fornecer funcionalidades de OAM&P através das informações presentes nos cabeçalhos (Torres, 2010).

Seguindo a estrutura apresentada na Figura 7, OTUk's (k = 1,2,3 e 4, explicados a seguir) são transportados usando a OCh, camada onde cada canal OTU recebe um comprimento de onda específico. Cabe ressaltar que as terminações de trail OTU coincidem com as terminações de trail OCh, uma vez que é nesse ponto que acontecem as conversões digital/óptico e óptico/digital. Em seguida, vários canais podem ser mapeados na OMS, responsável por multiplexar os comprimentos de onda gerados na OCh, e então transportados pela camada OTS que fornece um caminho óptico entre dois NEs (*Network Element*). Para cada uma das camadas OCh, OMS e OTS há um cabeçalho próprio, com propósitos de gerenciamento no nível óptico. Esses cabeçalhos são transportados em um canal separado do payload (*out-of-band*) chamado de canal supervisor ou OSC (*Optical Supervisory Channel*).

Conforme se observa nos parágrafos anteriores, as camadas digitais são geralmente representadas com a abreviação do seu nome acrescida da letra k, como em OPUk, ODUk e OTUk. A letra k representa o nível na hierarquia digital e, por conseguinte, as diferentes taxas de transmissão suportadas. Na OTN, conforme as taxas aumentam o tamanho dos *frames* OTU permanece o mesmo. Maiores taxas de transmissão são atingidas simplesmente aumentando a taxa de transmissão do *frame* OTU. Essa é uma grande diferença em relação ao conceito tradicional usado nas redes de comunicação (SONET/SDH), com a transmissão acontecendo a cada 125 μ sec. Na tabela 2-1 são mostradas as aproximações para algumas das taxas nominais da OTN.

Tabela 2.1: Taxa nominal de bits definida na (ITU-T, G.709, 2009).

Nível na hierarquia digital	Cliente OPU payload (kbit/s)	Taxa de bits ODU (kbit/s)	Frame OTU Taxa aproximada (kbit/s)
0	1 238 954.310	1 244 160	Sinais ODU1, 2, 3 ou 4
1	2.488.320	2.498.775,13	2.666.057,14
2	9.995.276.962	10 037 273.924	10.709.225,32
3	40.150.519.322	40 319 218.983	43.018.413,56
4	104.355.975.330	104 794 445.815	111.809.973,57
ODUflex para sinais clientes CBR	Taxa de bits do sinal cliente	$239/238 \times$ Taxa de bits do sinal cliente	Sinais ODU2, 3 e 4

ODUflex para sinais clientes mapeados em GFP-F	238/239 x taxa de sinal ODUflex	Taxa de bits configurável	Sinais ODU2, 3 e 4
2e	10 356 012.658	10 399 525.316	ODU3 e ODU4

Com essa definição de níveis da hierarquia digital, é possível multiplexar sinais de diferentes taxas de *bits* em um único *frame* OTUk. Um exemplo de multiplexação pode ser observado na Figura 8, onde uma OPU1 é mapeada em uma ODU1; quatro ODU1's são multiplexadas em uma ODU2, que é então encapsulada em uma OTU2, criando o FEC correspondente a essa configuração.

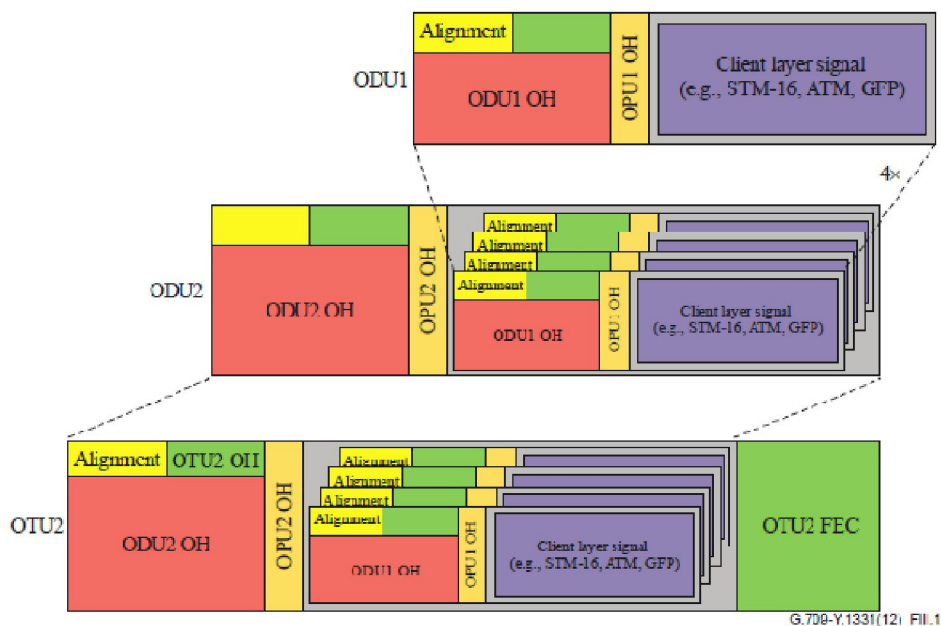


Figura 8. Exemplo de multiplexação em redes OTN (ITU-T, G.709, 2009).

A especificação inicial da (ITU-T, G.709, 2003) introduzia três tipos de ODU (i.e. ODU1, ODU2 e ODU3) assim como especificado na Tabela 2.1. Conforme explicado esses ODUk podem ser mapeados diretamente em um OTUk (Optical Channel Transport Unit-k, k=1,2 ou 3) ou mapeados em um ou mais *Tributary Slots* (Slots Tributários) de um OPUj (com k<j).

A última revisão da recomendação (ITU-T, G.709, 2009) introduziu novas características à OTN dando origem aos seguintes tipos de ODU: ODU0, ODU4, ODU2e, ODU3e1 e ODU3e2. A nova hierarquia de multiplexação define

um LO (*LowerOrder*) ODU_j que pode ser mapeado diretamente em um OTU_j, ou multiplexado em um HO (*High Order*) ODU_k (com $j < k$).

No caso de um LO ODU_j mapeado em um OTU_j, os seguintes mapeamentos são definidos: ODU1 em OTU1, ODU2 em OTU2, ODU3 em OTU3, ODU4 em OTU4 e ODU2e em OTU2e. No caso da multiplexação de um LO ODU_j em um HO ODU_k, uma nova granularidade de *Tributary Slot* é introduzida (i.e. 1,25Gbps) e os seguintes modos de multiplexação estão definidos:

- ODU0 em ODU1 (com granularidade de TS de 1,25Gbps);
- ODU0, ODU1, ODUflex em ODU2 (com granularidade de TS de 1,25Gbps);
- ODU1 em ODU2 (com granularidade de TS de 2,5Gbps);
- ODU0, ODU1, ODU2, ODU2e e ODUflex em ODU3 (com granularidade de TS de 1,25Gbps);
- ODU1, ODU2 em ODU3 (com granularidade de TS de 2,5Gbps);
- ODU0, ODU1, ODU2, ODU2e, ODU3 e ODUflex em ODU4 (com granularidade de TS de 1,25Gbps);
- ODU2e em ODU3e1 (com granularidade de TS de 2,5Gbps);
- ODU2e em ODU3e2 (com granularidade de TS de 1,25Gbps).

Similarmente ao que acontece nas camadas digitais com o caractere k , nas camadas ópticas o caractere n indica o número de comprimentos de onda que estão sendo carregados na CI daquela camada.

Na recomendação (ITU-T, G.798, 2006) são especificados os blocos básicos usados para descrever os equipamentos OTN e o conjunto de regras pelas quais esses blocos podem ser combinados. A biblioteca de componentes especificada na recomendação contém todos os blocos funcionais necessários para descrever completamente a estrutura funcional genérica da OTN. Desse modo, para ser compatível com essa recomendação as funcionalidades de um equipamento OTN precisam ser descritas de acordo com os blocos funcionais especificados e as interconexões precisam seguir as regras definidas.

Nessa recomendação, as funcionalidades das camadas descritas anteriormente são organizadas de acordo com o lado de transmissão: lado de origem (*source*), representado por S , ou lado destino (*sink*), representado por

Sk, sendo divididas de acordo com a função dentro da camada: conexão, terminação e adaptação.

A função de conexão não está presente em todas as camadas só aparecendo nas camadas OCh e ODU. A função de conexão é representada pelo nome da camada acrescida da letra C (neste caso, OCh_C e ODUk_C). As funções de terminação são representadas pela letra TT (OCh_TT ou OMSn_TT, por exemplo) e as de adaptação por A, sendo que neste caso também se insere a camada de onde a informação está sendo adaptada, por exemplo, OMSn/OCh_A para a adaptação entre a AI da OMS e a CI da OCh.

A Figura 9 mostra uma representação da camada OTS com suas funções de adaptação e terminação, observando as convenções diagramáticas definidas na recomendação G.805.

Na Figura 10 está a representação das funções de terminação da OTS, tanto do lado origem quanto destino. Através do OTSn_RP (*OTSn Remote Point*) são enviados o conjunto de sinais RI (*Remote Information*) do lado *sink* para o lado *source*.

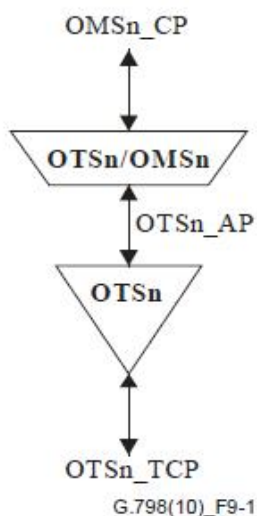


Figura 9. Funções da adaptação e terminação da OTS (ITU-T, G.798, 2006).

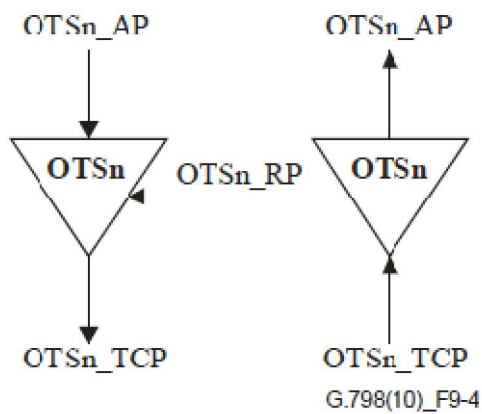


Figura 10. Funções de terminação da OTS (ITU-T, G.798, 2006).

Na Figura 11 vê-se o detalhamento das funções de adaptação relativas afonte e origem entre as camadas OTS e OMS.

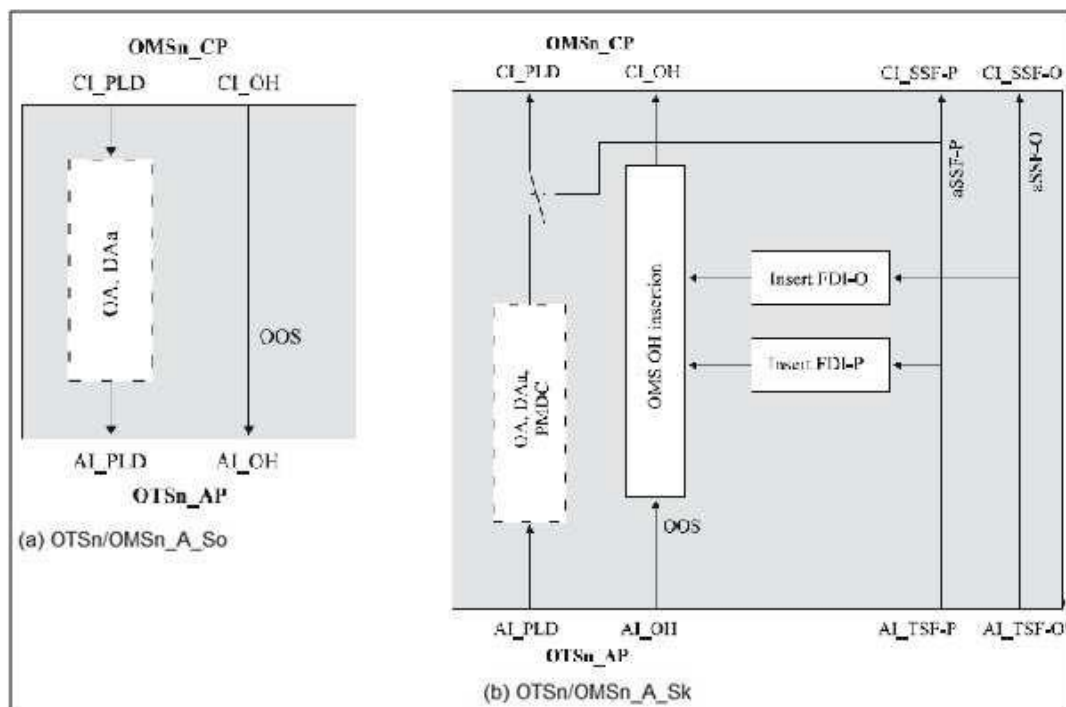


Figura 11. Funções da adaptação entre as camadas OTS e OMS (a) OTSn/OMSn_A_So, (b) OTSn/OMSn_A_Sk (ITU-T, G.798, 2006).

Além da funcionalidade completa, descrita até esse momento, a arquitetura OTN define também as especificações para um tipo de funcionalidade reduzida que simplifica as camadas da parte óptica, conforme a Figura 12. Em vez de

uma estrutura óptica com as camadas OCh, OMS e OTS, existem apenas as camadas OCh e OPS (*Optical Physical Section*) ou dependendo do caso só a OPS. Na funcionalidade reduzida não existe cabeçalho das camadas ópticas e, portanto, não existe canal de serviço nem os mecanismos de monitoramento e isolamento de falhas da camada óptica como definido anteriormente. Além disso, segundo a recomendação G.798, a OTN com funcionalidade reduzida não possui a função de conexão da camada OCh (OCh_C) e, portanto, não possui capacidade de roteamento de comprimentos de ondas.

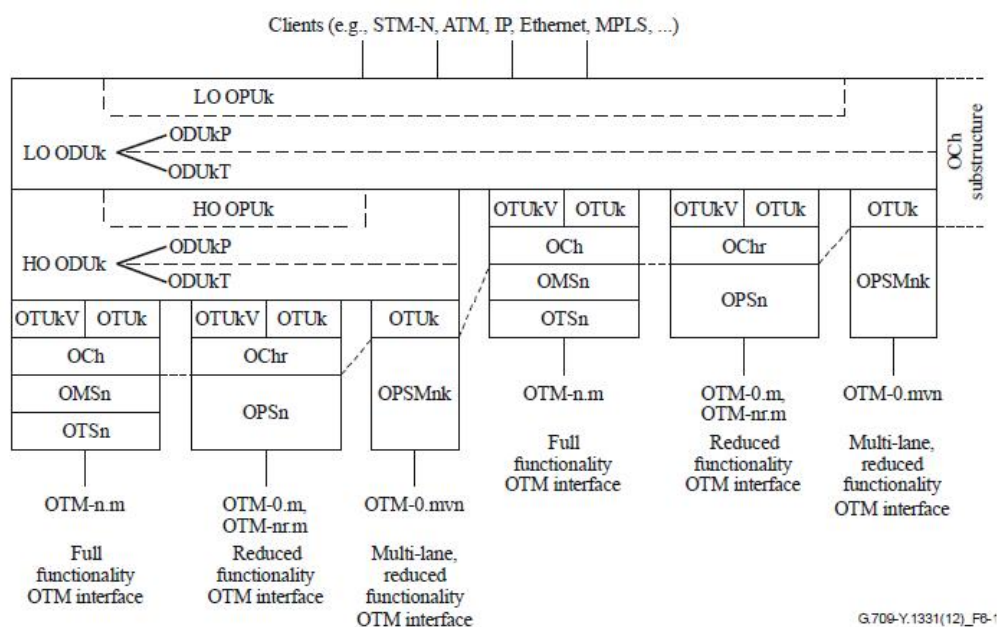


Figura 12. Estrutura das interfaces OTN. (ITU-T, G.709, 2009)

As interfaces identificadas por “*multilane*” na Figura 12 surgiram quando o IEEE 802.3 definiu uma interface paralela para as tecnologias 40GBASE-R e 100GBASE-R (*Gigabit Ethernet*) e a ITU-T escolheu definir interfaces paralelas correspondentes para as OTU3 e OTU4. O IEEE 802.3 é uma coleção de padrões do IEEE definindo a camada física e a parte relativa à subcamada MAC (*Media Access Control*) da camada de enlace de dados da Ethernet cabeada. Essas interfaces são identificadas na OTN por “*multi-lane OTN-0.mvn*” e poderiam então ser usadas em aplicações que se beneficiariam do baixo custo dos módulos PHY Ethernet. Dois sinais para a interface OTM-0.mvn são definidos, cada um carregando um sinal OTUk dividido em 4 linhas

ópticas: OTM-0.3v4 e OTM-0.4v4, carregando um OTU3 e OTU4 respectivamente (divididos entre as 4 linhas). Os formatos dos sinais OTN foram adicionados à (ITU-T, G.798, 2006), e as especificações da camada física incluídas nas recomendações (ITU-T, G.695, 2009) e (ITU-T, G.959.1, 2009) no final de 2009. Outros modos para transporte de sinais Gigabit Ethernet utilizando a OTN podem ser encontrados na recomendação (ITU-T, G-Sup.43, 2008).

3.4 Estrutura do Frame G.709 OTN

O frame definido pela recomendação G.709 é constituído de três partes: overhead, payload e FEC. Dois destes campos, overhead e payload, já faziam parte dos protocolos SONET e SDH. A novidade do padrão OTN é a inclusão de um campo exclusivo para FEC, pois seus antecessores utilizavam apenas alguns bytes do overhead para realizar esta técnica, o que limitava a capacidade de correção de erro.

A Figura 13 apresenta a estrutura detalhada do frame G.709 OTN, destacando seus campos e ilustrando sua organização em linhas e colunas.

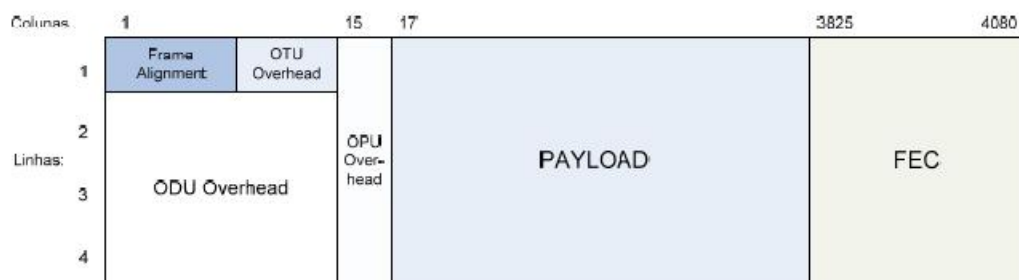


Figura 13. Estrutura Frame G.709 OTN.

O frame G.709 OTN, também chamado de multi-frame, é composto de 4 frames de 4080 bytes. Cada frame contém 16 bytes de overhead, 3808 bytes de payload e 256 bytes de FEC. Os dados são transmitidos serialmente pelo canal, iniciando-se pelo primeiro frame, seguido pelo envio do segundo frame e assim sucessivamente. O tamanho total do multi-frame, 4x4080, permanece inalterado.

para qualquer uma das taxas de transmissão vistas anteriormente, diferentemente dos padrões SONET e SDH.

3.4.1 Overhead

As sessões a seguir apresentarão uma explicação sobre os campos que compõem o overhead de um frame G.709 OTN.

3.4.2 Alinhamento

Como os dados são transmitidos serialmente em alta velocidade através da fibra óptica, é necessário que o receptor seja capaz de identificar corretamente o início e o fim de um frame. A capacidade de detectar o início de frame no padrão OTN é feita através do campo 'FrameAlignment', primeiro campo do frame, conforme a Figura 13.

A área reservada para alinhamento possui 3 campos. Um sinal de alinhamento de 6 bytes (FAS), um byte para indicar alinhamento de múltiplos frames (MFAS) e um campo reservado.

Dado que o byte MFAS é incrementado a cada multi-frame, este campo permite realizar o alinhamento de até 256 multi-frames consecutivos, permitindo atribuir diferentes definições a alguns campos do overhead de acordo com seu valor. O sinal de alinhamento (FAS) é reconhecido pelo valor 0xF6F6F6282828, e é a única parte do pacote que é enviada sem a técnica de embaralhamento (*scrambling*). O propósito da técnica de embaralhamento é impedir longos pulsos de 0's ou 1's, permitindo a regeneração do clock e períodos mais longos de transmissão sem alinhamento.

O receptor precisa achar o início do frame antes de começar a processar os dados de controle, e ainda deve ter a capacidade de identificar ausência de sinal, ausência de frame e perda de frame.

3.4.3 OTU Overhead

O cabeçalho OTU provê funções de supervisão entre dois pontos conectados por um único canal óptico, que possuem em suas extremidades elementos

chamados de 3R (Regeneração, Reformatação e Retemporização), responsáveis pela regeneração do sinal. Está localizado no primeiro frame, entre as colunas 8 e 14.

O OTU overhead consiste em um campo de três bytes para monitoramento de sessão (SM), dois bytes para o campo GCC0 (General Communication Channel0), utilizado para troca de mensagens entre duas terminações OTU, e um campo de dois bytes reservado para uso futuro. O propósito do campo GCC ainda não está completamente definido, porém provavelmente será usado para gerenciamento de rede ou para sinalização completa de protocolos como o G-MPLS (Generic Multi Protocol Label Switching).

3.4.4 ODU Overhead

O campo ODU overhead está localizado entre as colunas 1 e 14, nos frames 2, 3 e 4 de um multi-frame. A informação contida neste campo provê funções de gerenciamento de rede e supervisão fim-a-fim de canais ópticos. A Figura 14 ilustra os campos que constituem o ODU overhead.

Columns:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rows: 2	RES		TCM ACT	TCM6			TCM5			TCM4			FTFL	
3	TCM3			TCM2			TCM1			PM		EXP		
4	GCC1		GCC2		APS/PCC				RES					

Figura 14. Campos do ODU Overhead.

A maioria dos campos contidos no ODU overhead traz a funcionalidade TCM (Tandem Connection Monitoring). Existem seis campos TCM definidos no ODU overhead para uso em funções de gerência de redes, possibilitando que administradores de rede possam monitorar taxas de erro em diversos enlaces de uma rede de canais ópticos chaveados, este processo será detalhado na seção referente ao TCM. A partir da monitoração destes campos é possível identificar os pontos da rede em que o sinal encontra-se mais fraco, possibilitando verificar e localizar falhas. O campo APS/PCC (automatic protection switching and protection communication channel) utiliza as

informações de monitoramento para proteger a rede de roteamento em caminhos onde o sinal encontra-se degradado. O campo FTF (FaultTypeandFaultLocation) também está relacionado com funções de monitoramento de falhas na rede.

O ODU overhead contém um campo de três bytes para monitoramento de caminho (PM). Este campo tem sua estrutura muito semelhante ao campo SM do OTU overhead, porém sua função é monitorar a conexão de um caminho contendo diversos chaveamentos de canais ópticos, enquanto o SM monitora apenas uma conexão entre dois pontos interligados por apenas uma fibra óptica.

Os demais campos executam funções menos relevantes, os campos RES são reservados para futura padronização, o campo EXP é um campo experimental e não possui padronização e os campos GCC executam praticamente a mesma função que exercem no OTU overhead.

3.4.5 OPU Overhead

O OPU overhead é adicionado ao payload do frame e contém informações responsáveis por adaptar os dados de diferentes protocolos para serem transportados através do frame OTN.

Possui um campo chamado PSI (PayloadStructureIdentifier), que identifica o conteúdo do payload. Atualmente a recomendação G.709 prevê o transporte de protocolos como o SONET/SDH, ATM, GFP entre outros.

Este campo possui três bytes para controle de justificação, chamados de JC (JustificationControl), utilizados para compensar deslocamentos no payload, o que pode acontecer quando o frame transporta sinais de protocolos assíncronos. A partir destes três bytes, é feita uma votação para indicar justificação positiva (PJO), ou justificação negativa (NJO), neste caso o último campo do OPU overhead conterá dados do payload.

3.5 Tandem Connection Monitoring

Outra funcionalidade oferecida pela OTN é o TCM (*Tandem Connection Monitoring*), que possibilita a gerência e monitoração da qualidade do sinal

através de múltiplas redes. A funcionalidade TCM definida na OTN é capaz de monitorar até seis conexões tandem independentes. Conforme pode ser observado na Figura 15, várias topologias de monitoração estão disponíveis.

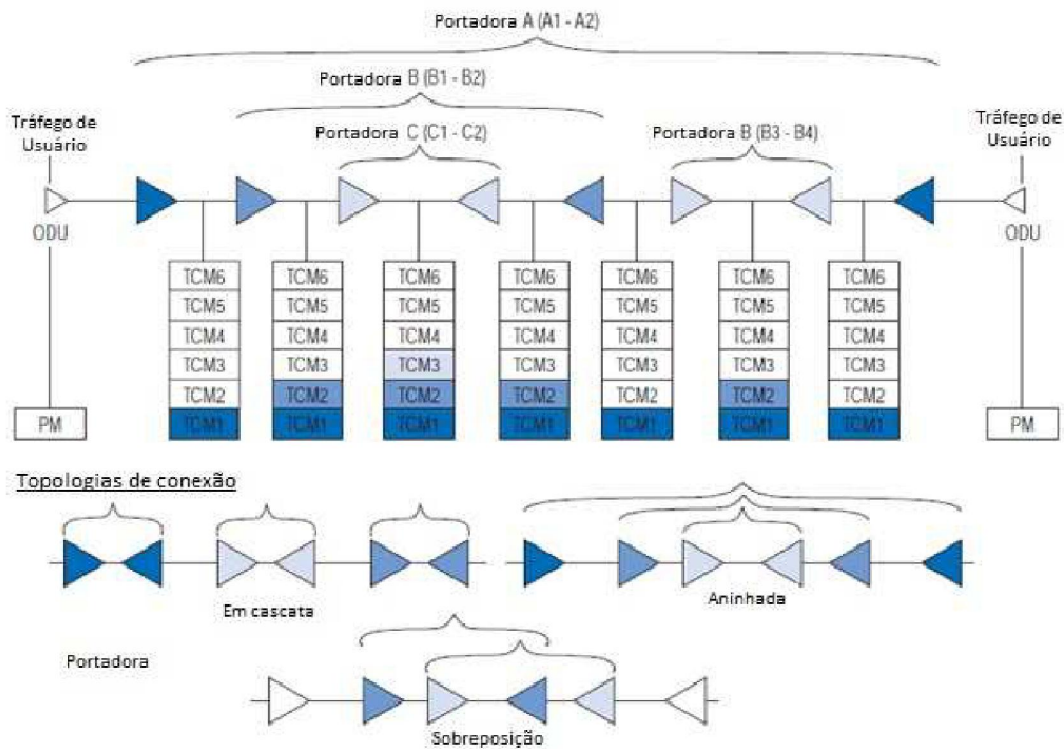


Figura 15. Monitoramento de conexões tandem (ITU-T, G.709, 2009).

3.6 Forwarding Error Correction – FEC

À medida que as taxas de transmissão aumentam e ultrapassam a barreira dos 10Gbps, a degradação do sinal, causada pelo meio de transmissão, causa um impacto significativo na taxa de erro de um canal. Para amenizar este problema e garantir a correta transmissão dos dados, mesmo em taxas elevadas, são utilizados mecanismos de correção de erros.

Algoritmos de correção de erro utilizam informações redundantes codificadas para fazer a verificação e correção de erros no momento da recepção, podendo aumentar significativamente a eficácia na transmissão de dados. Por este motivo, a inclusão de um campo específico para correção de erro no frame OTN é vista como a principal justificativa para o desenvolvimento deste padrão.

A recomendação G.709 define que o mecanismo utilizado para a correção de erros no padrão OTN é o Reed-Solomon RS(255,239). Isto significa que para cada 239 bytes de dados, são adicionados 16 bytes para correção de erro. Este código tem a capacidade de corrigir oito erros para cada 255 bytes. Dessa maneira, em cada frame podem ser corrigidos até 128 erros. Utilizando-se a técnica de entrelaçamento para o cálculo dos bytes de paridade de um frame, é possível recuperar 128 erros consecutivos.

A técnica de entrelaçamento separa um frame em 16 sub-frames de 255 bytes, sendo o primeiro byte do frame pertencente ao primeiro sub-frame, o segundo byte ao segundo sub-frame e assim sucessivamente até o 16º byte, o 17º byte é visto como o segundo byte do primeiro sub-frame.

Para cada sub-frame calculam-se 16 bytes de FEC, garantindo a cobertura contra erros em rajada. A Tabela 2 ilustra graficamente a divisão dos frames em sub-frames para o cálculo do FEC.

Tabela 2 – Divisão do frame em sub-frames.

	1	2	239	240	...	255	
1	1	17	PAYLOAD	3809	3825	FEC	4065	
2	2	18		3810	3826		4066	
3	3	19		3811	3827		4067	
4	4	20		3812	3828		4068	
5	OVERHEAD	21		3813	3829		4069	
6		22		3814	3830		4070	
7		23		3815	3831		4071	
8		24		3816	3832		4072	
9		25		3817	3833		4073	
10		26		3818	3834		4074	
11		27		3819	3835		4075	
12		12		28	3820		3836	4076
13		13		29	3821		3837	4077
14		14		30	3822		3838	4078
15	15	31		3823	3839		4079	
16	16	32		3824	3840		4080	

É importante observar que cada sub-frame corresponde a uma linha da tabela e possui um cálculo independente de FEC. Os dados são transmitidos na mesma ordem em que estão numerados na tabela, ou seja, coluna por coluna.

4 Valor Agregado pela OTN

A função da OTN é prover redes ópticas confiáveis, eficientes em custo, versáteis e de alta capacidade. Para atingir esses objetivos a OTN contém funcionalidades e mecanismos para realizar transmissão com custo reduzido e com confiabilidade que agregam valor a camada de transporte tornando possível a multiplexação e *switching* de diferentes protocolos, o transporte transparente de sinais cliente, a redução da quantidade de camadas na rede, a operação, administração e gerenciamento (OAM) para atendimentos a diferentes tipos de redes com gerenciamento individual de cada comprimento de onda. Além disso, por sua própria concepção, o OTN também agrega valor ao ser preparado para estar em contínua evolução e adaptação às necessidades de novos protocolos, com capacidade de multiplexação, mapeamento e transporte. Nos próximos subitens serão detalhados os valores acima mencionados (Graciosa, 2012).

4.1 Transmissão Confiável e Eficiente em Custo

Como mostrado na seção anterior, a G.709 inclui a funcionalidade de FEC para melhorar o desempenho da transmissão. Com o código Reed-Solomon (255,239) implementado um overhead de 6,7% é adicionado, sendo possível também o uso de FEC proprietário para aumentar ainda mais o desempenho.

Assim, o código FEC é adicionado pelo equipamento de transmissão e decodificado pelo equipamento de recepção. Como resultado desse processo, obtém-se uma melhoria na taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*). Uma taxa de erro de bit de 10^{-4} pode ser melhorada para taxas melhores que 10^{-12} , correspondendo a ganho de aproximadamente 6 dB. O gráfico da Figura 16 mostra uma situação de ganho de 5,4 dB para BER de 10^{-12} .

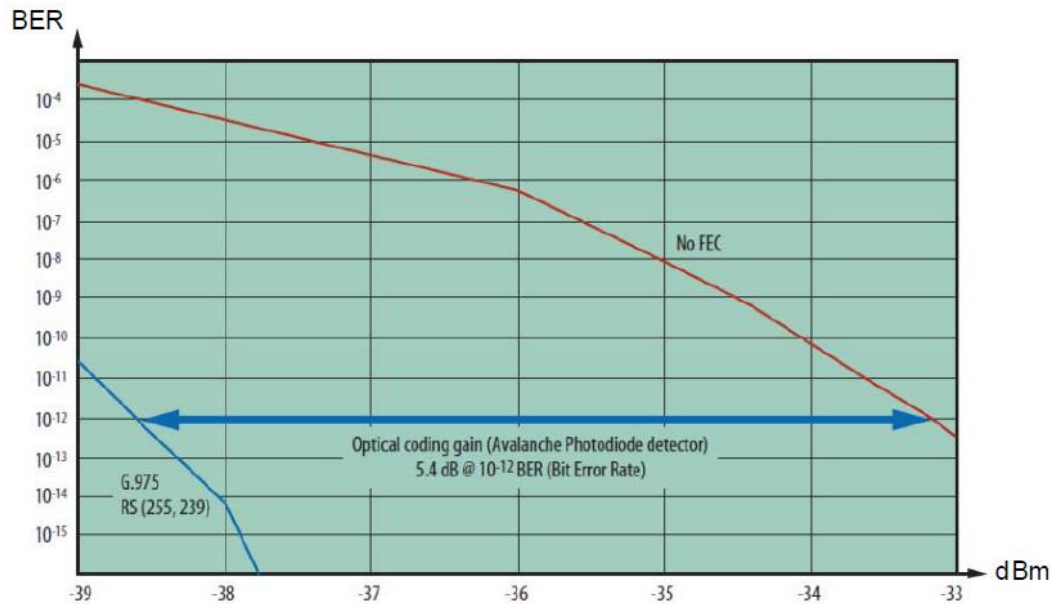


Figura 16. BER corrigida em relação à potência de recepção para situação com e semFEC.

A Figura 17 mostra uma relação teórica entre a taxa de erro de bit semcorreção e com correção feita pelo RS (255,239), de acordo com a ITU-T G.975.

BER_{entrada}	BER_{saída}
10^{-4}	5×10^{-15}
10^{-5}	$6,3 \times 10^{-24}$
10^{-6}	$6,4 \times 10^{-33}$

Figura 17. Relação teórica entre BER de entrada e BER de saída com FEC utilizando RS (255, 239) de acordo com a ITU-T G.975.

O uso de FEC traz uma série de benefícios para o desempenho do sistema de transmissão, abaixo destacados:

- Aumento da distância do enlace sem uso de amplificadores intermediários;
- Aumento da distância entre amplificadores e entre regeneradores;
- Aumento no número de canais em sistemas DWDM;

- Aumento na taxa de transmissão;
- Possibilidade de trabalhar com fibras e componentes ópticos antigos e já degradados;
- Evita uso de fibras com características ópticas especiais para enlaces de ultralonga distância;
- Permite a monitoração do desempenho do sistema e detecção de erros antes que a degradação seja percebida pelo equipamento cliente;
- Elevado desempenho para correção de erros em rajada, já que a codificação é realizada com entrelaçamento dos bytes separando os erros consecutivos.

A maior desvantagem do FEC é utilizar banda adicional, aumentando a taxa de transmissão para possibilitar a implementação da codificação.

Além do FEC utilizando RS (255,239), o ITU-T através da G.975.1 define um super FEC, com desempenho em termos de ganho de codificação superior ao FEC. A aplicação desse tipo de codificação é em sistemas de ultra longa distância, incluindo sistemas submarinos. Vários esquemas são considerados e os que utilizam uma combinação de 2 códigos FEC são comumente utilizados, como [RScode + RS code], [BCH code + BCH code], [RS code + BCH code], etc. O ganho líquido de codificação pode superar os 8 dB para taxa de erro de bit corrigida de 10-12, dependendo da codificação utilizada. Nesse caso o *overhead* devido aos bytes de redundância pode superar 25%.

4.2 Multiplexação de Diferentes Protocolos e Transparência

Para sinais com taxa de bit constante (CBR – *Constant Bit Rate*), o sinal cliente é mapeado no ODU utilizando procedimento de mapeamento assíncrono (AMP – *Asynchronous Mapping Procedure*) ou síncrono (BMP – *Bit-Synchronous Mapping Procedure*).

Sinais cliente baseados em pacote, como *ethernet*, são mapeados nos ODU utilizando GFP-F (*Frame-Mapped Generic Framing Procedure*) definido pela recomendação ITU-T G.7041. A partir do ODU, é possível mapeá-los diretamente em OTU, mapeando então em comprimento de onda DWDM, ou multiplexá-los em um ODU de maior hierarquia.

Outra importante característica tanto do transporte OTU como do mapeamento realizado é a transparência ao protocolo transportado. Com essa transparência, o transporte e mapeamento são realizados sem interferir no protocolo e aplicação cliente.

A Figura 18 ilustra um exemplo de solução sem uso de multiplexação OTN, em que se utiliza dois comprimentos de onda independentes em uma rede DWDM OTN, em comparação com a multiplexação OTN dos mesmos dois sinais cliente, mas multiplexados em mesmo comprimento de onda OTU-3.

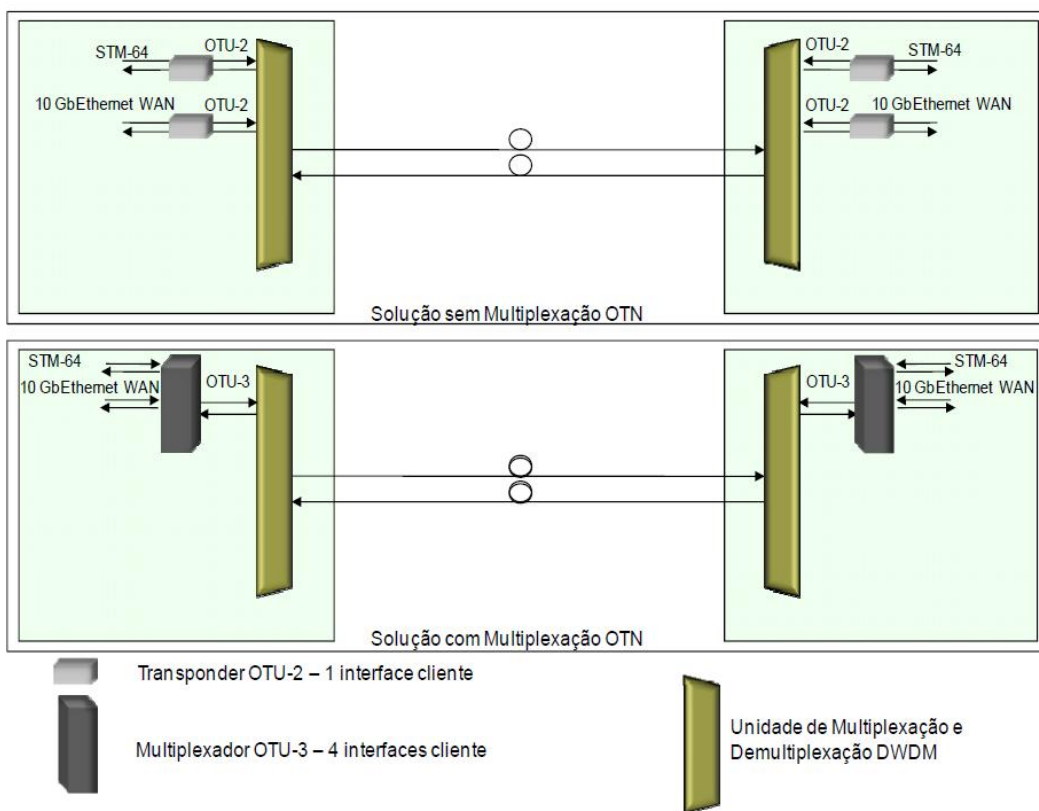


Figura 18. Exemplo de solução com e sem uso de multiplexação OTN.

Pode-se comparar o uso de solução com e sem multiplexação OTN sob diferentes aspectos, destacando-se os seguintes:

- Capacidade de Transmissão

Considerando a capacidade total de transmissão em bit por segundo ou a quantidade total de comprimentos de onda em um sistema DWDM, a capacidade de um sistema com e sem multiplexação OTN é a mesma. Ou seja,

ambos podem transmitir a mesma quantidade de lambdas para transporte de sinais agregados de alta taxa OTU-3 ou OTU-4, resultando em mesma banda total.

- Otimização do Uso de Comprimento de Onda

Um sistema com multiplexação OTN é mais eficiente em termos de otimização do uso de cada comprimento de onda. Considerando um determinado sistema DWDM dimensionado para transportar no máximo um OTU-k (k=1, 2, 3 ou 4) em cada comprimento de onda, para transportar um sinal de hierarquia inferior a essa em um sistema sem multiplexação OTN seria necessário fazer uso de um lambda dedicado enquanto em um sistema com multiplexação OTN seria possível ter o mesmo lambda transportando vários sinais mapeados em quadro ODU e multiplexados (Bernardo, Tronco, Lessa, & Mobilon, 2011).

- Consumo de Potência, Ocupação de Espaço e Custo

Um fator crítico para o uso de máquinas que fazem uso de multiplexação OTN não poderia deixar de passar pelo custo. Nesse sentido, o custo está relacionado não apenas ao custo do equipamento, mas também ao custo associado ao consumo de potência e ocupação de espaço nas estações dos provedores.

Assim, o que se verifica é que o custo, o nível de consumo de potência e a ocupação de uma máquina com multiplexação OTN são inferiores aos de uma solução compatível em termos de capacidade de transmissão mas sem utilização de multiplexação OTN.

- Redução da Quantidade de Camadas de Equipamentos na Rede

Diversas são as possibilidades de mapeamento de sinais para o transporte pelas redes de transmissão. Com a explosão do uso da internet, o tráfego de dados passou a corresponder ao maior volume de informação dentro das redes, sendo o IP com MPLS e *ethernet* o conjunto de protocolos mais utilizados. Para o transporte pode-se transmitir diretamente o *ethernet* sobre fibra óptica, ou fazer uso de WDM para prover maior capacidade. Entretanto, para se garantir maior qualidade de serviço e melhor mecanismo de proteção a arquitetura de mapeamento bastante utilizada consiste em se ter uma camada

intermediária com SDH ou SONET, mostrado abaixo pelas linhas azuis na Figura 19:

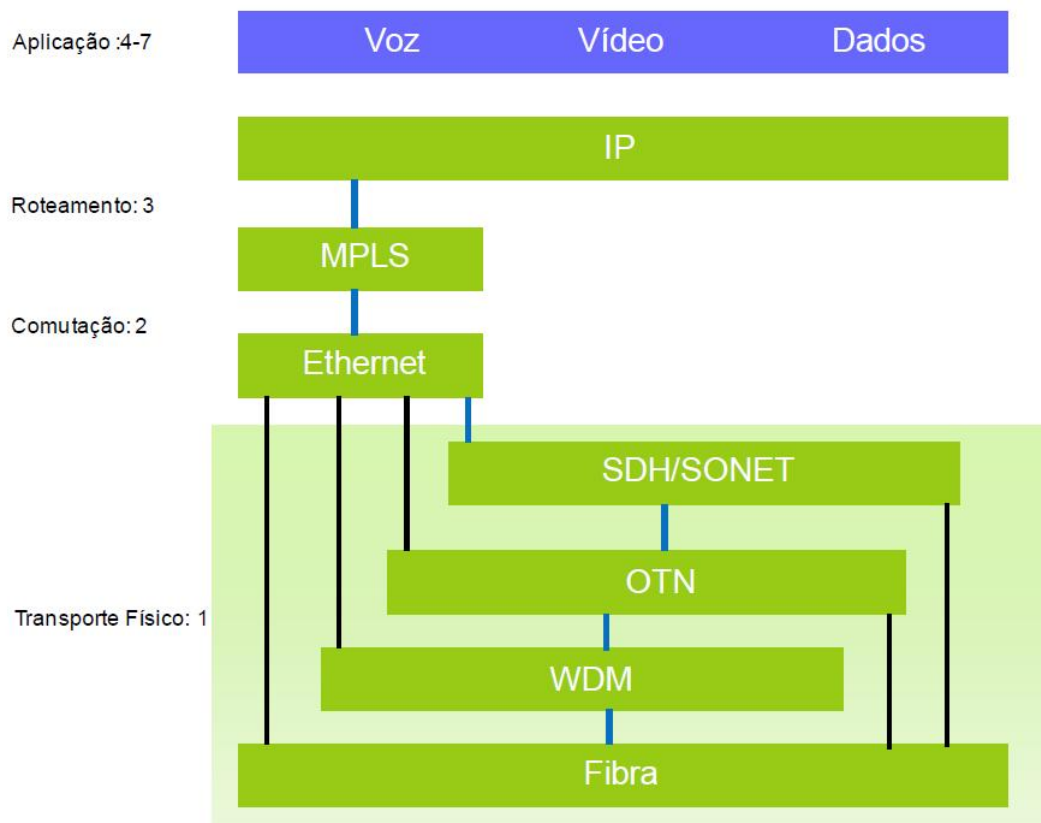


Figura 19. Estrutura de mapeamento com uso de SDH.

Com toda a flexibilidade de multiplexação introduzida pelo OTN, além das facilidades de gerenciamento, a arquitetura com mapeamento direto sobre OTN sem SDH tornou-se bastante vantajosa. Com essa nova arquitetura, mantêm-se as garantias de qualidade de serviço, mecanismo de proteção e OAM, e reduz-se a quantidade de equipamentos para adaptação, facilitando o gerenciamento, reduzindo pontos de possíveis falhas, o que aumenta a disponibilidade do sistema e consequentemente reduzindo os custos. A Figura 20 ilustra essa situação.

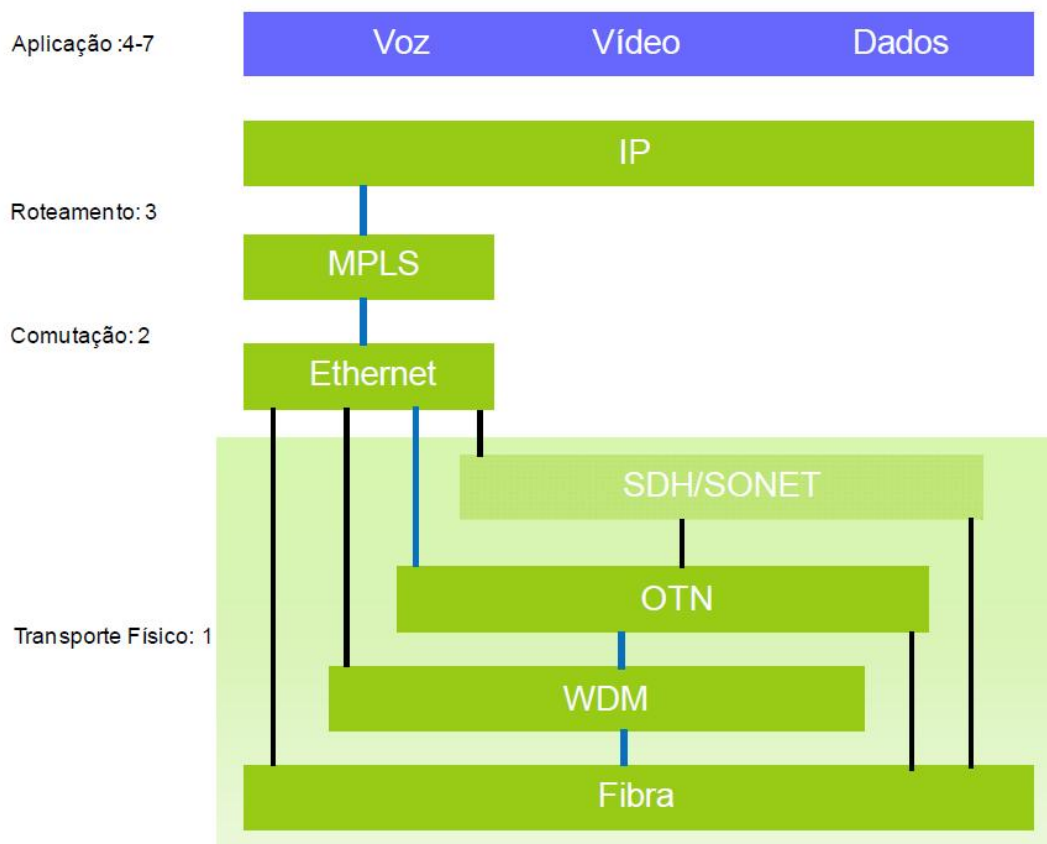


Figura 20. Estrutura de mapeamento sem uso de SDH.

4.3 Operação, Administração e Gerenciamento (OAM)

Uma característica bastante importante do OTN são as funcionalidades de OAM para controle e gerenciamento do sinal que está sendo transportado. *Bytes no overhead* são definidos para funções de OAM incluindo monitoramento, indicação de alarmes e comutação de proteção, como detalhado na seção 3.4.

Um plano de controle é utilizado, facilitando a operação da rede pelos operadores, possibilitando o provisionamento mais rápido de serviço aos clientes, e provendo a base para os serviços de largura de banda sob demanda, além de aumentar a confiabilidade e a disponibilidade da rede.

Em uma rede de transmissão em que se mapeia o sinal cliente diretamente sobre um lambda do DWDM, como no caso de um sinal SDH, torna-se bastante custoso localizar o problema no momento de uma falha ou degradação

para sua posterior correção. Isso ocorre pois o sistema de gerenciamento de um sistema DWDM sem OTN permite o gerenciamento apenas de características muito básicas do sistema, como níveis de potência de transmissão e recepção nos transponders amplificadores, desvio de comprimento de onda em relação ao comprimento de onda nominal e alarmes de falha e ausência de sinal. Não há qualquer monitoração de desempenho do sinal, ficando essa atividade restrita ao monitoramento feito pelo equipamento cliente, SDH por exemplo. Dessa forma, no momento da falha ou degradação, quem identifica o problema é diretamente o equipamento cliente, sendo então bastante difícil identificar, sem o acionamento da equipe de manutenção de campo, onde está o problema (no equipamento cliente ou no equipamento de transmissão DWDM) e em qual segmento de rede se localiza, no caso de sistema *multi-spans*. Em sistemas com uso de OTN, torna-se possível ter um gerenciamento de desempenho na camada de transmissão independente do gerenciamento feito pela camada cliente. Dessa maneira, no momento da falha ou degradação, é possível identificar com maior precisão onde está o problema (segmento da rede e camada) e corrigi-lo de forma mais rápida.

A Figura 21 ressalta as vantagens do gerenciamento proporcionado pela implementação do OTN em termos de detecção e localização de degradação, além de retorno a operação:

		Sistema sem Gerência OTN	Sistema com Gerência OTN
Degradação	Detecção	Gerência do sistema de transmissão não detecta	Gerência do sistema de transmissão detecta
	Localização	Podem ser necessárias medições com tráfego off-line, com envio de técnico c campo para segmentar o problema	Gerência provê medidas e relatórios on-line, baseado no OTN, segmentando o problema nas seções OTU
Falha	Detecção e Localização	Gerências do sistema cliente e do sistema de transmissão detectam e localizam	
	Retorno a Operação	Gerência perde capacidade de monitoração dos enlaces posteriores ao enlace que apresentou falha	Enlaces posteriores ao que apresentou falha continuam a ser monitorados

Figura 21. Comparação de facilidades de gerenciamento em sistema com e sem gerenciamento OTN.

A Figura 22 a seguir mostra um comparativo genérico entre as etapas para a identificação de uma falha em uma rede sem gerência OTN e com gerência OTN. Observa-se que a quantidade de etapas necessárias para iniciar as tarefas de correção dos problemas é bastante reduzida com o uso de OTN.

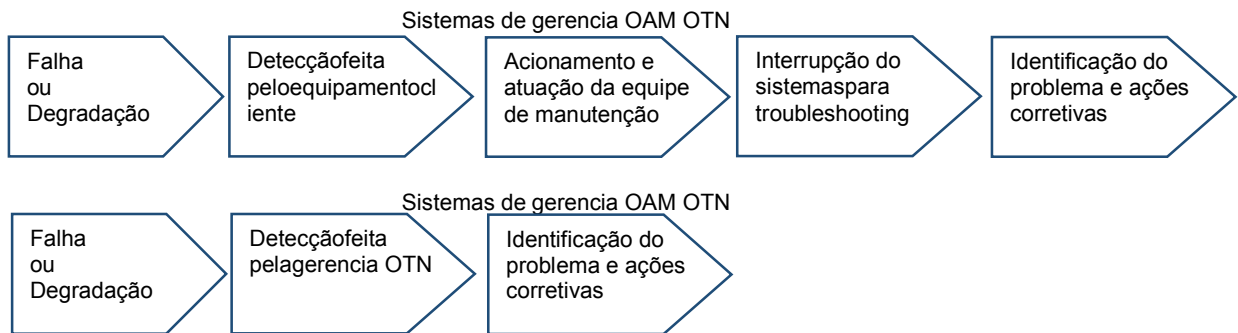


Figura 22. Comparação entre etapas para identificação de falha ou degradação com e sem gerência OAM OTN.

Além disso, em sistemas com gerência OAM OTN, é possível fazer monitoração preventiva na camada OTN, em que se pode verificar degradação do sistema antes que tal degradação seja detectada pelo equipamento cliente, fazendo uso da capacidade de detecção e correção de erros do FEC. Com isso, podem-se programar atividades de manutenção preventivas, evitando os acionamentos corretivos, sempre muito mais traumáticos e custosos, já que sempre são emergenciais.

4.4 Gerenciamento Individualizado de Cada Comprimento de Onda

No provisionamento de serviços baseados em comprimento de onda, o OTN apresenta-se como importante ferramenta de transporte, possibilitando o gerenciamento OAM individual de cada canal. Com essa funcionalidade, é possível ter o gerenciamento dos múltiplos canais de um sistema WDM independente uns dos outros, habilitando a oferta de serviços baseados em comprimento de onda, cada vez mais usual no ambiente corporativo.

4.5 Capacidade de Constante Evolução

A capacidade de adaptação às novas necessidades e serviços confere ao OTN a flexibilidade de poder estar em constante evolução, diferencial em relação às outras opções de tecnologia de transporte.

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada a Rede de Transporte Óptico (OTN) que é utilizada com principal tecnologia do Plano de Transporte das Redes Ópticas Comutáveis Automaticamente (ASON) onde apresentamos sua arquitetura, estruturas, tipos de pacotes e protocolos transportados.

A rede OTN apresenta melhorias em relação às redes SONET/SDH como implementação de campos específicos para detecção e correção de erros no frame OTN, incremento de pontos de monitoração para melhor gerenciamento da rede, transmissão transparente de diversos tipos de tecnologias como SONET/SDH, ATM, Ethernet, entre outros.

Outra característica importante das redes OTN é a otimização dos recursos em uma rede DWDM pois permite que sejam multiplexados tecnologias diversas com velocidades diferentes em um mesmo canal permitindo que os equipamentos envolvidos sejam menores, consumam menos energia e tenham, portanto, menor custo para os operadores.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (2000). *ITU-T Recommendation G.805 - Generic functional architecture of transport networks*. Genebra.
- (2012). *ITU-T Recommendation G.709 - Interfaces for the optical transport network*. Genebra.
- (2012). *ITU-T Recommendation G.798 - Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks*. Genebra.
- (2012). *ITU-T Recommendation G.872 - Architecture of optical transport networks*. Genebra.
- (2012). *ITU-T Recommendation G.959.1 - Optical transport network physical layer interfaces*. Genebra.
- Bernardo, R., Tronco, T. R., Lessa, C. A., & Mobilon, E. (jul./dez. de 2011). OTN: a evolução das redes de transporte. *Cad. CPqD Tecnologia, Campinas, v. 7, n. 2*, pp. 75-86.
- Dante, R. G. (2005). *ALGORITMOS DE ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA PARA AS REDES ÓPTICAS INTELIGENTES E TRANSPARENTES*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas.
- Graciosa, H. B. (2012). *A Transformação das Redes Ópticas no Acesso e no Anel Backbone Metropolitano: Alternativas Tecnológicas, Econômicas e Novos Serviços*. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro.
- Iniewski, K., McCrosky, C., & Minoli, D. (2008). *Network Infrastructure And Architecture*. Wiley-Interscience.
- Ramaswami, R., Sivarajan, K., & Sasaki, G. (2009). *Optical Networks - A Pratical Perspective*.
- Taful, M. C. (2013). *Otimização e Planeamento de Redes OTN Para Transporte de Tráfego Ethernet*. Dissertação de Mestrado, Lisboa.
- Torres, M. T. (2010). *UMA PROPOSTA DE FRAMEWORK PARA SIMULAÇÃO DE REDES OTN*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

Valiveti, R. (s.d.). *OTN Overview*. Acesso em Jan. de 2014, disponível em Infinera Corporation: <https://www.infinera.com/technology/files/infinera-IEEE-OTN-Overview.pdf>