

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TELEINFORMÁTICA E REDES DE
COMPUTADORES

VINICIUS AYRES RAMOS

**REDES IP/WDM E IP/OTN: utilizando as redes de transporte de
forma inteligente**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2015

VINICIUS AYRES RAMOS

**REDES IP/DWDM E IP/OTN: utilizando as redes de transporte de
forma inteligente**

Monografia de Especialização, apresentado ao Programa de Pós Graduação em Teleinformática e Redes de Computadores, do Curso de Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Valmir de Oliveira, Dr

CURITIBA
2015

TERMO DE APROVAÇÃO

VINICIUS AYRES RAMOS

REDES ÓPTICAS IP/DWDM E IP/OTN: utilizando as redes de transporte de forma inteligente

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 25 de julho de 2015, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Teleinformática e Redes de computadores, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Augusto Foronda, Dr.
Coordenador de Curso

ORIENTAÇÃO

Prof. Valmir de Oliveira, Dr.
UTFPR

BANCA EXAMINADORA

Prof. Augusto Foronda, Dr.
UTFPR

Prof. Valmir de Oliveira, Dr.
UTFPR

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que nos deu o dom da vida e me ajudou em cada etapa deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre me ensinaram desde cedo o valor da educação e fizeram todos os esforços possíveis e imagináveis para que eu pudesse seguir minha jornada pelo conhecimento.

À minha namorada Júlia, que esteve comigo durante o curso e sempre me apoiou e abriu mão de momentos juntos para que este trabalho fosse possível.

Ao meu professor e orientador Valmir de Oliveira, sempre paciente e criterioso, guiando cada passo deste trabalho. Aos demais professores do programa de especialização, que compartilharam um pouco de seu conhecimento conosco.

Aos professores participantes da banca de qualificação e defesa deste trabalho, pela disponibilidade, gentileza e, principalmente, pelas pertinentes observações, essenciais para o aprimoramento do presente estudo acadêmico.

RESUMO

RAMOS, Vinicius Ayres. REDES IP/DWDM E IP/OTN: utilizando as redes de transporte de forma inteligente. 2015, 49 f. Monografia (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O tráfego de dados vem aumentando significativamente e as operadoras de telecomunicações estão ajustando suas redes para suportar essa nova demanda. Há diversas maneiras de fazer a expansão do *backbone* da rede, sendo que, atualmente, dois modelos são predominantes. O primeiro é conectar diretamente os roteadores IP através de enlaces WDM (IPoWDM). O segundo é criar redes OTN, que agregam não só o IP, mas outros tipos de tráfego da rede (IPoOTN). As redes de comunicações ópticas, como o WDM, o SDH e o OTN foram analisados para entendermos as vantagens e desvantagens de cada uma. Posteriormente, trabalhos de diversos autores, empresas e entidades científicas que escreveram sobre o assunto foram analisados, de forma a identificar as sinergias entre os trabalhos. Chegou-se a conclusão de que as redes OTN são uma poderosa ferramenta, com custo por bit menor do que roteadores e que vem ganhando tração no mercado. Por outro lado, alguns protocolos, como o MPLS, facilitaram a transmissão de pacotes IP via WDM e podem ser uma boa alternativa para redes já estabelecidas e com menor previsão de crescimento.

Palavras chave: OTN. Redes Ópticas. WDM.

ABSTRACT

RAMOS, Vinicius Ayres. REDES IP/DWDM E IP/OTN: utilizando as redes de transporte de forma inteligente. 2015, 49 f. Monografia (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Data traffic has increased significantly and telecommunication carriers are setting their networks to support this new demand. There are several ways to make the backbone expansion, and currently two models are prevalent. The first is to connect directly IP routers via WDM links (IPoWDM). The second is to create OTN networks which add not only the IP, but other types of network traffic (IPoOTN). Optical networks, such as WDM, SDH and OTN are analyzed in order to understand the advantages and disadvantages of each one. Later, papers from different authors, companies and scientific institutions were compared to identify synergies between them. The conclusion is that the OTN networks are a powerful tool, with lower cost per bit than routers, which is gaining traction in the market. On the other hand, some protocols, such as MPLS, facilitated the IP packet transmission via WDM and may be a good alternative to already established networks and lower prediction growth carriers.

Keywords: Optical Network. OTN. WDM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução do número de bits por segundo-km, a partir de 1850.....	17
Figura 2 - Diagrama de Transmissão Óptica.....	18
Figura 3 - Espectro Eletromagnético	19
Figura 4 - exemplo de uma rede com camadas hierarquizadas.....	20
Figura 5 - Princípio Básico da Transmissão de Luz na Fibra Óptica.....	21
Figura 6 - Modos de Propagação em uma Fibra Óptica Multimodo	23
Figura 7 - Janelas de Transmissão	24
Figura 8 - Bandas na Terceira Janela de Transmissão	25
Figura 9 - Exemplo de rede CWDM	26
Figura 10 - Diagrama de um sistema DWDM com 4 canais.....	27
Figura 11 - Esquema de um OADM.	28
Figura 12 - Quadro STM-1	30
Figura 13 - Multiplexação de 4 STM-1 em um STM-4.....	31
Figura 14 - Diferentes tipos de serviço em um mesmo comprimento de onda.....	33
Figura 15 - Módulo de Transporte Óptico (OTM)	35
Figura 16 - Estrutura Linear do OTN	35
Figura 17 - Monitoramento do TCM nas redes OTN	36
Figura 18 - Introdução de OTN Switches	38
Figura 19 - Recursos Dinâmicos com OTN e seu plano de controle.....	40
Figura 20 - Arquiteturas de Core da Rede	41
Figura 21 - Caminho do Tráfego IP	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Canalização SDH.....	32
Tabela 2 - Taxas padrão de ODUs e OTUs	37
Tabela 3 - Mapeamento das Hierarquias OTN.....	37
Tabela 4 - Parâmetros das Redes IPoWDM e IPoOTN	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	FORMULAÇÃO DA SITUAÇÃO PROBLEMA	11
1.3	OBJETIVOS	13
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	13
1.5	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	14
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	REDES ÓPTICAS	16
2.2	FIBRA ÓPTICA	20
2.3	SISTEMAS WDM	25
2.4	REDES SONET/SDH.....	29
2.5	REDES OTN	32
2.5.1	Estrutura do Quadro OTN	34
2.5.2	Hierarquias de Multiplexação OTN.....	36
2.5.3	Propriedades Avançadas das redes OTN	38
2.6	ARQUITETURAS DE REDE	40
3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46

1 INTRODUÇÃO

A maior penetração dos serviços de telecomunicações e o crescente aumento do consumo de dados por usuário levaram as operadoras a enfrentar um novo tipo de desafio. Enquanto suas receitas por usuário permanecem praticamente estáveis, o consumo de dados é cada vez maior.

As operadoras de telecomunicações precisam planejar o crescimento de sua rede para suportar o aumento tráfego, com velocidades mais altas e maior confiabilidade, ao mesmo tempo em que tentam ser mais eficientes e reduzir ao máximo seus custos.

Segundo Jacob (2013) o desafio das operadoras consiste em fazer o tráfego de dados um prioridade, através da escolha de uma infraestrutura adequada, que permita crescer com flexibilidade para os novos serviços e, principalmente, com controle de custos.

Infinera (2013) pondera que projetar a rede de uma grande operadora de telecomunicações é uma tarefa complexa e que não há um modelo único que sirva para todas as outras. Cada uma deve ser estudada com cuidado, levando as considerações sobre o legado existente, serviços transportados, previsão de crescimento, investimento disponível, dentre outros.

1.1 FORMULAÇÃO DA SITUAÇÃO PROBLEMA

As grandes operadoras possuem complexas redes de telecomunicações com a missão de trocar dados entre seus usuários e outros sistemas dentro e fora de sua rede, como a internet. Este sistema forma a espinha dorsal das operadoras e é conhecido como *backbone*. Em geral, os equipamentos do *backbone* possuem funções bem definidas de transmissão, comutação ou roteamento. A complexidade e o custo de transmissão de cada bit aumentam nas camadas de níveis superiores, como o roteamento, que necessita de mais energia para analisar cada pacote que entra na rede. Porém, esta camada possui outras grandes vantagens, como a multiplexação estatística e vários níveis de qualidade de serviço (QoS).

Desta forma, é necessário bastante cuidado para projetar as redes de telecomunicações. É essencial que estejam claras as vantagens e desvantagens de

cada tecnologia envolvida. Uma escolha errada pode custar milhões de dólares para a empresa e trazer dificuldades para competir em um mercado altamente concorrido.

Desde que o IP (*Internet Protocol*) se consolidou como o protocolo da camada de redes, diversos sistemas foram utilizados para transportá-lo. Outros protocolos, como o MPLS (*Multi Protocol Label Switching*), foram desenvolvidos para tornar o custo de transporte do IP menos oneroso.

As redes ópticas, que utilizam a fibra óptica como meio de transporte, se tornaram a principal forma de transmissão de dados de alta capacidade. Ramaswani *et al.*, (2012) definiram as redes de Hierarquia Digital Síncrona (SDH) como sendo a primeira geração de redes ópticas, mesmo informando que na verdade elas são de uma hierarquia superior, que utiliza os serviços da rede óptica para fazer o transporte de dados.

A tecnologia de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Ondas (WDM) aumentou significativamente a quantidade e a velocidade das transmissões ópticas e é utilizada por redes de hierarquia superior, como SDH, OTN, MPLS, IP, ATM e Ethernet para transmissão de dados.

O transporte de dados relacionados ao protocolo IP, que eram feitas via redes SDH nos anos 80 e 90, passaram a ser feitas diretamente sobre o WDM nos anos seguintes, utilizando a rede WDM apenas como uma rede de transporte, mas sem se preocupar com fatores como monitoração de desempenho, detecção de falhas e multiplexação de hierarquias. As Redes Ópticas de Transporte (OTN) surgiram com objetivo de endereçar estas questões.

Porém, como as redes IP/MPLS já estavam consolidadas, surge a dúvida para as operadoras de telecomunicações se vale a pena investir em um novo paradigma de rede (OTN), que reconhecidamente tem um custo menor por bit, ou se a estratégia que tem funcionado até agora, baseada em IP/MPLS, é suficiente para suportar o crescimento da rede.

No Brasil, essa discussão também acontece. Algumas operadoras optaram por continuar o transporte do IP através do WDM (IPoWDM), enquanto outras seguiram para o caminho de transportar o IP via redes OTN (IPoOTN). Fabricantes, operadoras e instituições acadêmicas têm diferentes visões sobre qual é a forma mais eficiente de projetar as redes de telecomunicações. A dúvida que persiste é: IPoWDM ou IPoOTN?

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as duas principais opções disponíveis para que as operadoras de telecomunicações montem suas redes de transporte de dados: IPoWDM ou IPoOTN. Os seguintes objetivos específicos podem ser listados:

- Apresentar as principais características de cada tecnologia, através da revisão da literatura, para que se possa entender como ocorreu a evolução da tecnologia até chegarmos ao ponto onde estamos.
- Apresentar, também através da revisão da literatura, as vantagens e desvantagens de cada uma destas tecnologias, para que a decisão seja tomada com o maior número de subsídios possível.
- Identificar a percepção dos diferentes autores que escreveram sobre o tema, comparando as principais sinergias entre seus trabalhos.
- Propor estratégias para que o gestor de rede avalie em quais circunstâncias uma tecnologia é mais vantajosa do que a outra para seu projeto.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos aplicados ao presente trabalho, detalhando os instrumentos utilizados para explicar e responder ao problema da pesquisa. Para a classificação da pesquisa foi utilizada a taxonomia proposta por Gil (2008) que qualifica a natureza da pesquisa com base nos seus objetivos e nos procedimentos técnicos realizados.

Em relação ao seu objetivo, pode-se afirmar que a presente pesquisa é descritiva e explicativa, uma vez que procura estudar as características de determinada segmento (comunicações ópticas) e identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de fenômenos, como a escolha de tecnologias IP/DWDM para a rede das operadoras ou a escolha pela tecnologia IP/OTN. Gil (2008, p.28) afirma que as pesquisas descritivas, juntamente com as exploratórias,

são habitualmente realizadas por pesquisadores preocupados com a atuação prática e são as mais solicitadas por empresas comerciais e instituições educacionais.

Segundo Gil (2008), os meios técnicos da investigação visam garantir a objetividade e a precisão no estudo dos fatos sociais. Este trabalho utilizou os seguintes delineamentos em relação aos meios técnicos:

- **Pesquisa bibliográfica:** através da revisão da literatura foram levantados dados sobre as diferentes tecnologias de transmissão ópticas, apresentando características técnicas e do processo de evolução, que explica como chegamos até o estágio atual da tecnologia;
- **Pesquisa Comparativa:** análise dos motivos que levam a escolha de determinada tecnologia em detrimento da outra; de forma a entendermos quais condições de contorno tornam uma solução vantajosa, levando em consideração aspectos técnicos e financeiros.

Segundo Zanella (2009) a pesquisa bibliográfica faz com que o pesquisador domine o assunto e depois o utilize para dar sustentação ao modelo teórico de sua pesquisa, ampliando o conhecimento na área. Yin (2010) alerta que a revisão da literatura é um meio para um fim e não um fim em si mesmo. Ele alerta que “pesquisadores experientes revisam a pesquisa prévia para desenvolver questões mais perspicazes e reveladoras sobre o mesmo tópico” (YIN, 2010, p. 35). De forma semelhante, Gil (2008) afirma que a ampla utilização do método comparativo deve-se ao fato de possibilitar a investigação de fenômenos e ressaltar as diferenças e similaridades entre eles.

1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Segundo Zanella (2009) é necessário expor para a comunidade científica e para a sociedade em geral as dificuldades encontradas durante a pesquisa. Desta forma, seguem abaixo algumas adversidades enfrentadas durante o trabalho:

- O estudo avaliou com profundidade a camada de transporte óptico, mas uma avaliação dos protocolos de rede, como o IP, e protocolos

relacionados, como o MPLS e o Ethernet, seriam úteis para uma avaliação mais profunda.

- Os artigos tomados como base para a comparação entre IPoWDM e IPoOTN levaram em conta a realidade de outros países. Apesar de a tecnologia ser a mesma, alguns fatores locais como o alto custo de energia e o subsídio governamental a alguns setores talvez pudessem ter uma sensível influência o resultado final.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em quatro capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1 – Abrange os assuntos introdutórios, onde são apresentados a contextualização do tema, a formulação da situação problema, os objetivos, a metodologia de pesquisa e a organização do mesmo.
- Capítulo 2 – Descreve a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento do estudo. Apresenta o conceito base das principais tecnologias de transporte óptico, mostrando como se deu sua evolução para que chegássemos ao nível de desenvolvimento atual.
- Capítulo 3 - Volta-se para a análise feita por diversos autores sobre o tema e propõe algumas sinergias entre os trabalhos, que podem ajudar o operador de rede a tomar a decisão por uma tecnologia.
- Capítulo 4 - Apresenta as considerações finais e sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As crescentes taxas de transmissão de dados têm obrigado as operadoras de telecomunicações a construir *backbones* com capacidades cada vez maiores. Os sistemas de transmissão que utilizam a luz como meio de transporte foram fundamentais para que as operadoras conseguissem suprir a demanda por maior largura de banda.

Segundo Ribeiro (1999), a evolução dos sistemas de telecomunicações no início de século XXI levou a um congestionamento e saturação dos sistemas que ocupavam as faixas de frequência tradicionais, incluindo as frequências de micro-ondas. Com o avanço da tecnologia, chegou-se ao domínio de faixas de frequência cada vez mais altas, como a luz.

No decorrer deste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica dos temas chave do presente trabalho. Inicialmente, a fibra óptica e técnica de multiplexação por divisão de comprimentos de onda (WDM) serão apresentados. Posteriormente, algumas das técnicas de transmissão, como os sistemas da Hierarquia Digital Síncrona - SDH e as atuais Redes de Transporte Óptico - OTN serão detalhadas.

2.1 REDES ÓPTICAS

Uma rede de comunicação óptica provê uma infraestrutura comum por onde uma diversidade de serviços podem ser transmitidos. Estes tipos de redes têm crescido e pode prover largura de banda de uma forma flexível onde e quando necessário. As fibras ópticas oferecem maior largura de banda que os cabos de cobre e são menos suscetíveis a vários tipos de interferência eletromagnética. Por isso, tem sido o meio de transmissão preferencial para curtas e longas distâncias da maioria das operadoras de telecomunicações.

Ribeiro (1999) argumenta que os sistemas de telecomunicações são avaliados basicamente em relação a dois parâmetros: a atenuação e a largura de banda do meio. Juntos, estes dois parâmetros vão determinar a distância máxima do circuito e a taxa de transmissão máxima que poderá ser utilizada nesta distância.

Segundo o autor, as fibras ópticas superam os mais variados meios de transmissão nestes parâmetros e, por isso, chamaram a atenção do meio comercial e acadêmico.

Nunes (2012) estabelece em seu trabalho algumas vantagens significativas das transmissões por meios de fibra ótica, a saber:

- Volume de informação transmitida;
- Baixa perda;
- Imunidade eletromagnética;
- Menor peso;
- Menor tamanho;
- Segurança das informações e
- Menor valor agregado

Nunes (2012) apresentou um gráfico que mostra a evolução dos principais meios de transmissão ao longo do tempo, conforme retratado pela Figura 1.

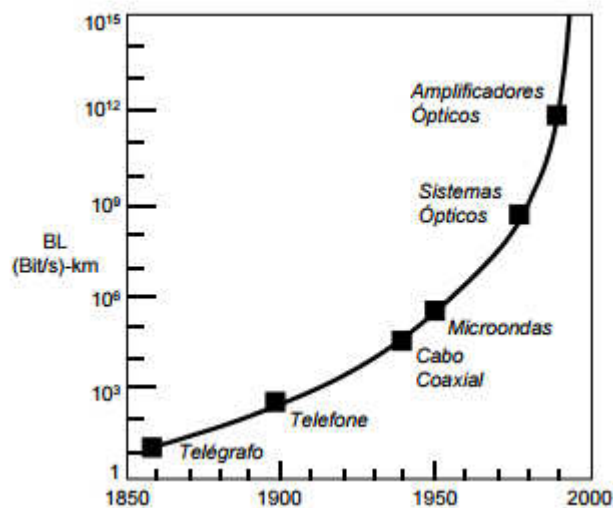


Figura 1 – Evolução do número de bits por segundo-km, a partir de 1850.
Fonte: Nunes (2012, p. 17).

Os componentes básicos de um sistema de transmissão óptico são definidos por Dutton (1998) de acordo com a Figura 2. O autor descreve os seguintes passos básicos para que ocorra a transmissão de sinais:

- Uma sequência de bits seriais em forma elétrica é apresentado ao modulador, que codifica os dados apropriadamente para transmissão na fibra;
- Uma fonte de luz (*laser* ou LED) é guiada pelo modulador e é aplicada à fibra;
- A luz viaja pelo fibra (possivelmente sofrendo dispersão e perda do sinal);
- No fim do receptor, a luz alimenta um detector (foto-diodo) e é convertida para a forma elétrica;
- O sinal é então amplificado e alimenta outro detector, que isola as mudanças individuais de estado e a temporização. Ele então decodifica a sequência de mudança de estados e reconstrói a sequência original de bits;
- A sequência de bits pode então alimentar algum dispositivo.

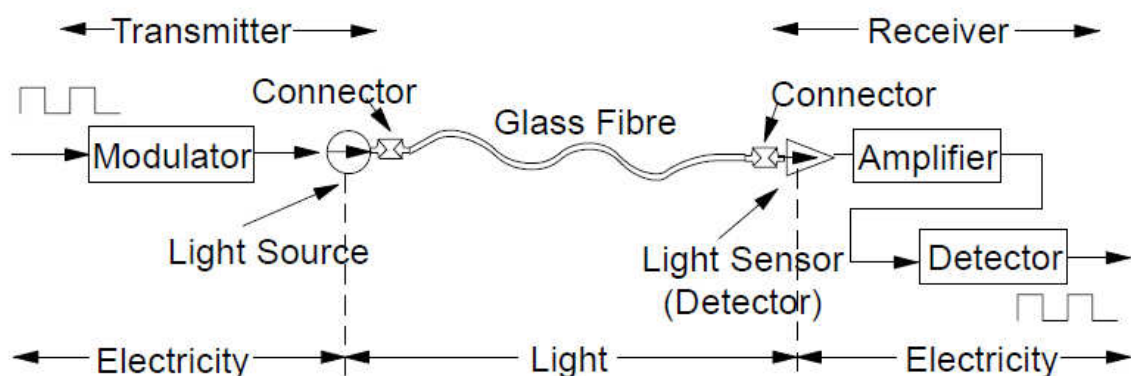


Figura 2 - Diagrama de Transmissão Óptica.
Fonte: Dutton (1998, p. 28).

É interessante notar que as comunicações ópticas atuam em uma pequena faixa de frequência do espectro, que é representada na Figura 3. Na representação podemos ver no destaque uma separação da frequência de acordo com o material utilizado na confecção da fibra óptica. Mais detalhes estarão na próxima seção, que é dedicada ao estudo das fibras ópticas.

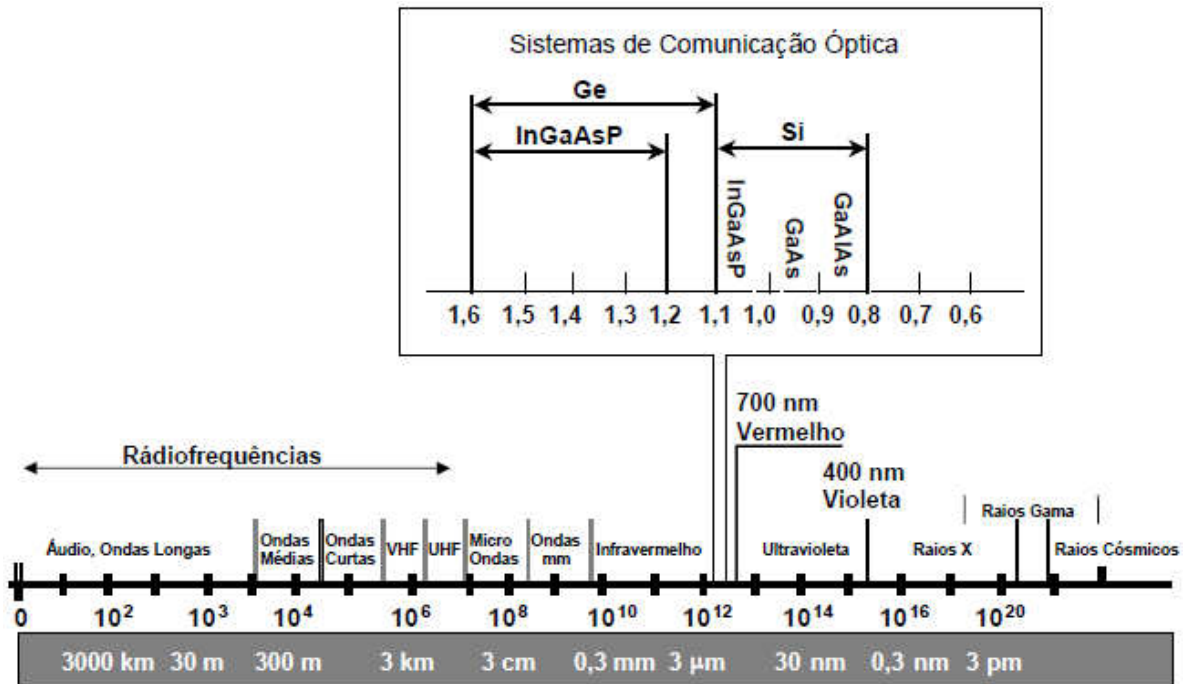


Figura 3 - Espectro Eletromagnético.
Fonte: Nunes (2012, p. 7).

Ramaswani et al (2012, p.10) afirmam que as redes ópticas podem ser separadas em duas gerações. Na primeira geração, as redes ópticas eram usadas basicamente para transmissão e para prover capacidade. As fibras ópticas proporcionavam menores taxas de erro e maiores capacidades do que os cabos de cobre, mas todo o chaveamento e outras funções de rede inteligentes eram realizados pela eletrônica. Exemplos da primeira geração de redes ópticas são os sistemas de Hierarquia Digital Síncrona (SDH) e Rede Óptica Síncrona (SONET), que serão vistos em mais detalhes nas seções seguintes.

Já a segunda geração, ainda de acordo com estes autores, possui certa inteligência na camada óptica, trazendo funções anteriormente realizadas pela eletrônica, como roteamento e chaveamento, para a camada óptica. Ramaswani *et al.*, (2012) chamam esta segunda geração de rede de comprimento de onda roteado. A rede provê caminhos de luz para seus usuários, como terminais SDH e roteadores IP. Os caminhos de luz são conexões ópticas levadas fim-a-fim de um nó de origem até um nó de destino através de um comprimento de onda em cada enlace intermediário. Nos nós intermediários da rede, os caminhos de luz são roteados e chaveados de um enlace para outro.

A Figura 4 ilustra como a camada óptica cria estes caminhos de luz para transportar serviços de camadas superiores. Neste caso, os caminhos são utilizados por elementos de rede IP e SONET. A camada IP realiza a multiplexação estatística de sequências de pacotes em sequências de maior velocidade, enquanto a rede SONET multiplexa circuitos de baixa velocidade em hierarquias de maior velocidade.

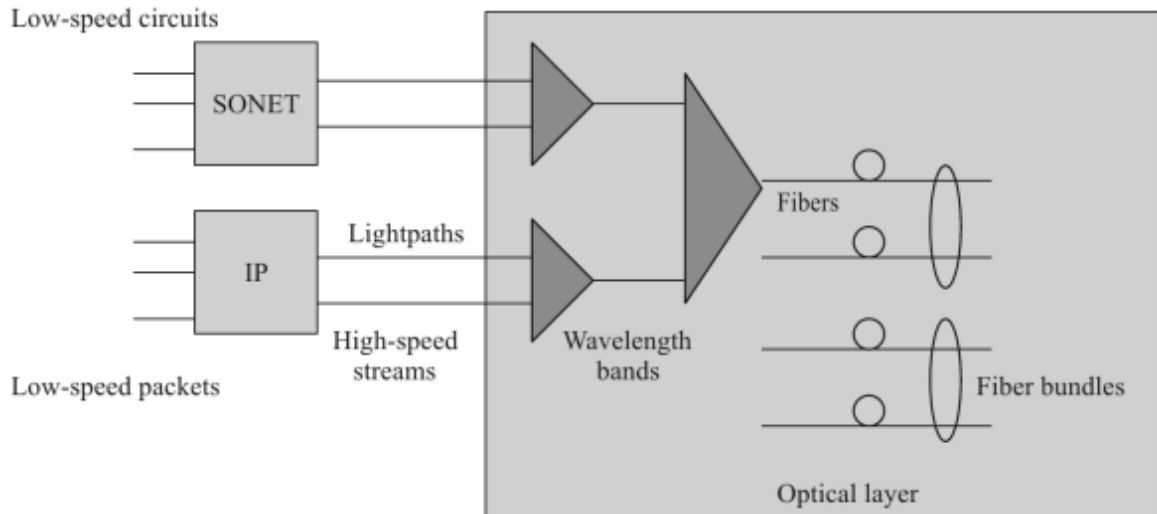


Figura 4 - exemplo de uma rede com camadas hierarquizadas.
Fonte: Ramaswani et al (2012).

A seguir serão detalhados alguns princípios básicos de transmissão em fibra óptica para posteriormente detalharmos as redes ópticas de primeira e segunda geração.

2.2 FIBRA ÓPTICA

Podemos definir a fibra óptica como um filamento flexível e transparente, fabricado a partir do vidro e tão fino quanto um cabelo humano. Dutton (1998) a define como um vidro cilíndrico muito fino, muito longo e com características especiais. Quando a luz entra em uma das pontas, ela viaja confinada dentro da fibra até a sua outra extremidade. A fibra consiste basicamente de duas partes: o núcleo e uma camada de revestimento ao redor do núcleo (*cladding*), que vamos chamar neste trabalho de casca. O núcleo tem um índice de refração (n_1) maior do que a casca (n_2), o que significa que a fronteira entre estas duas camadas vai atuar como um espelho. A Figura 5 ilustra a estrutura de uma fibra óptica.

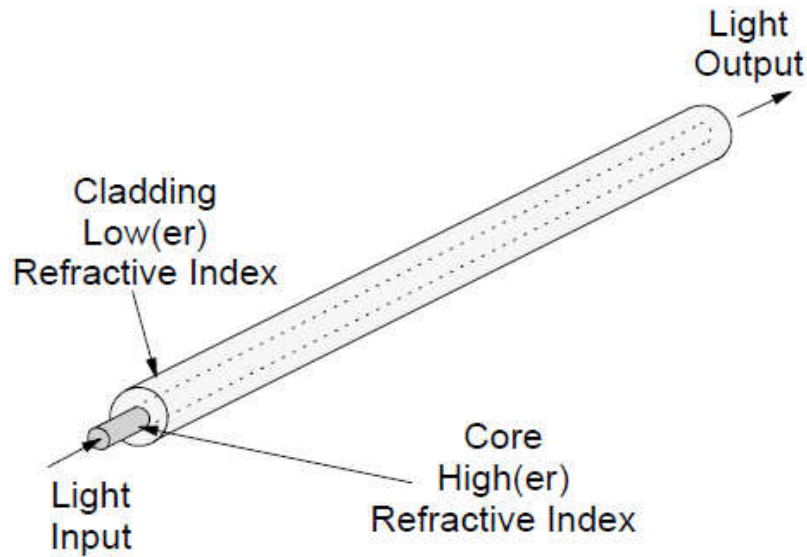


Figura 5 – Princípio Básico da Transmissão de Luz na Fibra Óptica.
Fonte: Dutton (1998, p. 49).

Quando um pulso curto de luz, enviado de uma fonte como um *laser*, é transmitido através de uma fibra óptica, ele será modificado (degradado) durante seu trajeto pela fibra. Ele chegará a outra extremidade mais fraco, deslocado no tempo e distorcido de outras maneiras. Abaixo são listadas principais razões para estes comportamentos:

- **Atenuação:** impurezas contidas no vidro podem absorver partes da energia da luz. Além disso, variações na uniformidade do vidro causam espalhamento da luz. A intensidade destes dois fenômenos é dependente do comprimento de onda da luz e das características da fibra, porém, nas fibras atuais, a maior parte da atenuação é proveniente do espalhamento.
- **Potência Máxima:** há um limite prático na quantidade de potência que pode ser transmitida em uma fibra. O motivo é que um campo eletromagnético intenso no núcleo causa alguns efeitos não lineares no sinal quando há uma potência elevada.
- **Polarização:** a fibra óptica é cilíndrica e simétrica, mas contém pequenas imperfeições. Estas imperfeições podem alterar a polarização da luz que está viajando.

- **Dispersão:** é um fenômeno relativo aos atrasos relativos na propagação dos modos. É como se um pulso curto se tornasse mais longo e ultimamente se juntasse com o pulso de trás, fazendo com que a recuperação da sequência de bits seja prejudicada. Há diversos tipos de dispersões, mas os mais importantes são: dispersão cromática, dispersão modal e dispersão do guia de onda. A dispersão cromática, ou dispersão do material ocorre porque cada comprimento de onda viaja em velocidades diferentes na fibra. Sendo assim, um comprimento de onda chega antes do que outros e o pulso do sinal se dispersa. Quanto mais estreita for a largura espectral da fonte luminosa, menos a dispersão do material. Já a dispersão modal ocorre devido às diferentes distâncias percorridas por cada modo de propagação no seu trajeto pela fibra. Quanto maior a distância, maior será a diferença entre os modos. Por fim, a dispersão do guia de onda ocorre em função da variação do índice de refração do núcleo e da casca ao longo da fibra. Ele é mais comum em fibras com um único modo de propagação (monomodo).
- **Ruído:** apesar do grande benefício das fibras de não absorver ruídos externos, existem alguns tipos de ruídos provenientes dos componentes do próprio sistema. Um exemplo é o ruído modal, causado pela interação do canal (fibras e conectores) com o sinal transmitido, gerando flutuações aleatórias da potência do sinal do receptor.

Todos estes efeitos indesejáveis foram estudados e vem sendo aperfeiçoados pelos pesquisadores ao longo do tempo. De acordo com Ramaswani *et al.*, (2012) os primeiros testes com a fibra óptica ocorreram em meados da década de 60, quando mostrou-se que uma fibra de vidro poderia funcionar com uma guia de ondas para conduzir a luz sem que ela se espalhasse. Porém, foi na década de 70 que este tipo de transmissão realmente decolou, com as fibras multimodo (MMF). Este tipo de fibra possui núcleos com diâmetro da ordem de 50 a 85 μm e o sinal consiste de múltiplos raios de luz, que tomam diferentes trajetórias ao longo da fibra. Cada um destes diferentes trajetos corresponde a um modo de propagação. O sinal é refletido para cima e para baixo quando encontra com a superfície que liga o núcleo e a casca. A Figura 6 ilustra este conceito de propagação de forma simples.

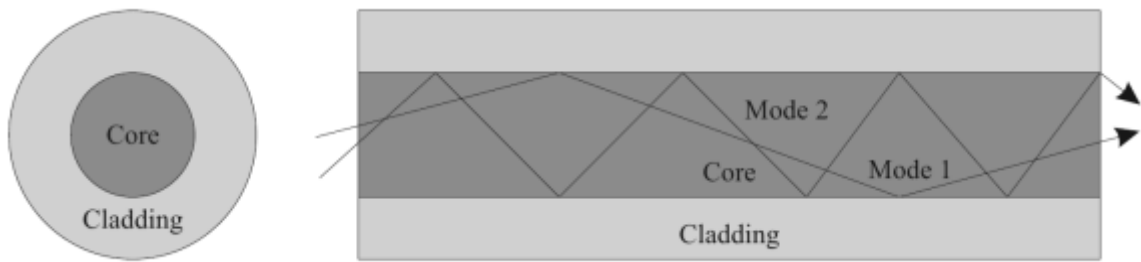


Figura 6 - Modos de Propagação em uma Fibra Óptica Multimodo.
 Fonte: Ramaswani *et al* (2012).

A próxima geração de sistemas implementados ocorreu em meados da década de 80, com as fibras monomodo (SMF), que chegaram para eliminar a dispersão modal, vista anteriormente. Fibras monomodo possuem núcleos com diâmetro relativamente pequeno, da ordem de 8 a 10 μm , onde toda energia em um sinal de luz viaja na forma de um único modo. Este tipo de fibras possibilitou um aumento da largura de banda a ser transmitida e um maior espaçamento entre os regeneradores ópticos.

Na fibra óptica, a atenuação varia de acordo com o comprimento de onda que está sendo trafegado e disto resulta outra importante característica: as janelas de transmissão. Estas janelas correspondem a comprimentos de onda onde a atenuação é menor, conforme mostra a Figura 7. Segundo Ramaswani *et al.*, (2012) os picos de atenuação que separam as janelas de transmissão são primariamente devidos a absorção pela hidroxila (OH^-) residual na fibra de sílica.

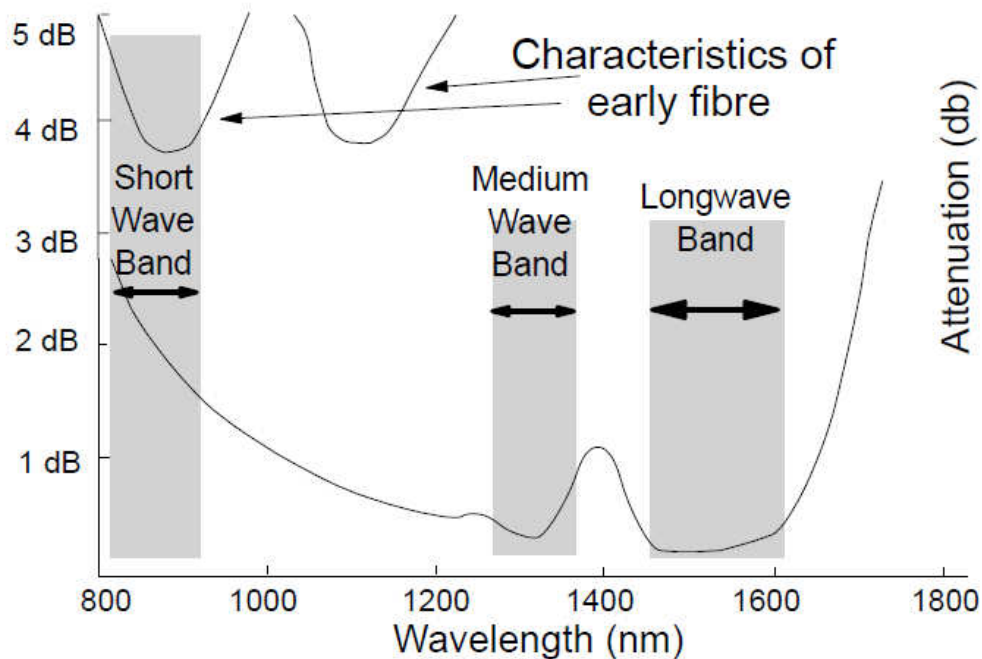


Figura 7 - Janelas de Transmissão.
Fonte: Dutton (1998).

Dutton (1998) classifica as três janelas de transmissão da seguinte forma:

- **Banda de comprimentos de onda curtos (primeira janela):** comprimentos de onda ao redor de 800 a 900 nm que foram usados nas primeiras fibras nas décadas de 70 e 80. Além de ser um vale de atenuação nas fibras da época, necessita de fontes e detectores ópticos de baixo custo.
- **Banda de comprimentos de onda médios (segunda janela):** banda ao redor dos 1310 nm que era utilizado no final da década de 80. Apesar de fontes e detectores ópticos mais caros, a atenuação de apenas 0,4 dB/km a torna muito atraente, principalmente para sistemas de longa distância. Além disso a dispersão do material é quase nula nessa janela.
- **Banda de comprimentos de onda longos (terceira janela):** é a banda entre 1510 e 1600 nm e que possui a menor atenuação disponível nas fibras ópticas atuais, ao redor de 0,25 dB/km. É utilizada desde a década de 90 e requer fontes e detectores ópticos mais sofisticados. Baseado na disponibilidade dos amplificadores, a terceira janela de transmissão é dividida em três regiões principais: banda S, banda C e banda L. A banda C, que fica entre 1530 e 1565 nm é a banda utilizada por

sistemas WDM convencionais com amplificadores dopados por érbio. Já a banda de 1565 a 1595 nm, é chamada banda L e é utilizada por sistemas WDM de alta capacidade. Por fim, a banda abaixo de 1530 nm é chamada banda S e utiliza amplificadores de Raman para prover amplificação nesta faixa (RAMASWANI *et al.*, 2012). A Figura 8 ilustra as três bandas da terceira janela de transmissão.

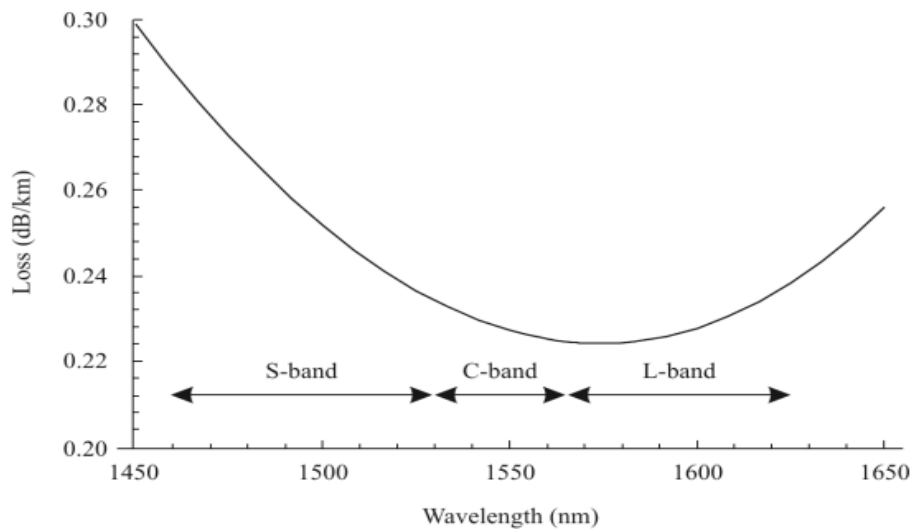


Figura 8 - Bandas na Terceira Janela de Transmissão.
Fonte: Ramaswani *et al* (2012).

2.3 SISTEMAS WDM

A Multiplexação por Divisão de Comprimentos de Onda (WDM) é a tecnologia básica das redes ópticas atuais. É uma técnica que utiliza a fibra para carregar muito canais ópticos separados e independentes. Dutton (1998) faz uma analogia com os canais de TV para entendermos os sistemas WDM. Cada canal é transmitido em uma frequência de rádio diferente e nós utilizamos um “sintonizador” para escolhermos o canal que vamos assistir.

Há muitas variações dos sistemas WDM. Uma forma simples pode ser construída utilizando 1310 nm como um comprimento de onda e outro comprimento em 850 nm por exemplo. Este tipo de WDM é conhecido como Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Esparsa ou CWDM. De acordo com Transmode (2015) a separação entre canais neste modo é da ordem de 20 nm e usualmente

transporta-se até 16 canais no espectro. Devido ao espaçamento maior entre os canais de transmissão, ele pode ser construído com componentes mais simples e baratos. Os acopladores seletivos de comprimento de onda são utilizados ambos para multiplexar e demultiplexar os sinais, conforme ilustra a Figura 9.

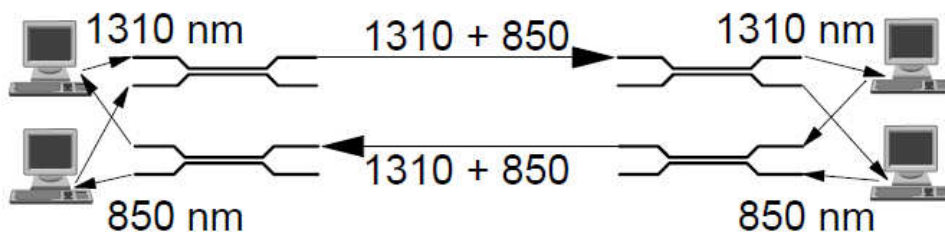


Figura 9 - Exemplo de rede CWDM.
Fonte: Dutton (1998).

Já os sistemas que utilizam a técnica de Multiplexação Densa por Divisão de Comprimentos de Onda, conhecidos como DWDM, são caracterizados por um espaçamento menor do que 0,8 nm entre os comprimentos de onda, de acordo com Profile (2000). O número de canais também é muito maior do que nas redes CWDM, podendo chegar a mais de 160 canais. Cada canal é um comprimento de onda onde o sinal deve estar. O comprimento do canal depende de diversos fatores como a linearidade do transmissor, da modulação, da estabilidade e tolerância a outros componentes do sistema.

Além da multiplicação da taxa de transmissão possibilitada pelo envio de múltiplos canais, Profile (2000) destaca que os canais podem ser adaptados de acordo com a demanda, o que possibilita que o investimento seja feita de maneira progressiva pelas operadoras. Em um sistema DWDM, a luz do diodo *laser* é lançada na entrada de um multiplexador de comprimentos de onda (MUX). Na saída do MUX todos os comprimentos de onda são então combinados e acoplados a fibra monomodo. Ao fim de um enlace de transmissão, os canais ópticos são separados novamente por meios de demultiplexação de comprimentos de onda (DMUX) e então vão para diferentes saídas. Na transmissão de enlaces longos, é necessário que haja uma amplificação dos sinais DWDM, realizada pelos Amplificadores de Fibra Óptica (OFA). A Figura 10 ilustra este esquema.

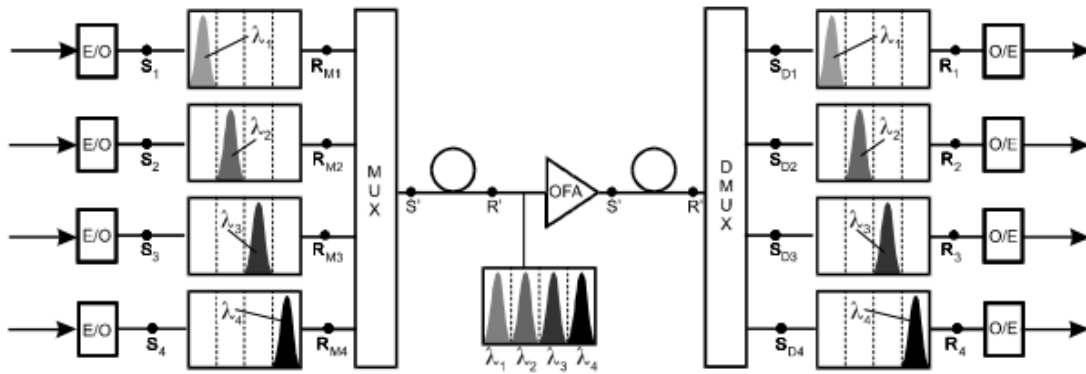


Figura 10 - Diagrama de um sistema DWDM com 4 canais.
Fonte: Profile (2000).

A transmissão DWDM coloca alta demanda nos componentes do sistema e seus parâmetros, especialmente nos comprimentos de onda que saem do diodo *laser*. Por isso, o diodo *laser* é selecionado individualmente, com um ajuste fino para o comprimento de onda central de cada canal. Para evitar a interferência da transmissão de canais adjacentes, os desvios não devem ser maiores do que 0,2 nm (Δf). Ou seja, em uma frequência de 200 THz isso corresponde a uma tolerância de 40 GHz ou 0,32 nm para cima ou para baixo. Um dado interessante é que o diodo *laser* pode ser modificado pelos seguintes fatores:

- Idade – aproximadamente 0,001nm a 0,01 nm por ano;
- Mudanças de temperatura – aproximadamente 0,002nm/K a 0,1nm/K se a temperatura do *chip* varia.
- Reflexões de retorno – basicamente devido ao espalhamento dentro da própria fibra que acaba voltando ao diodo *laser* emissor.

Já os multiplexadores e demultiplexadores proveem diversas entradas ópticas ao sistema. Cada entrada é equipada com um filtro seletor para algum comprimento de ondas e a saída destes filtros é acoplada a uma fibra monomodo. No receptor os comprimentos de onda são separados novamente por um DMUX, que é idêntico ao MUX, porém na direção oposta. Há um tipo especial de multiplexador, chamado *Optical Add/Drop Multiplexer* (OADM). Ele permite a inserção ou retirada de determinados comprimentos de onda, além de amplificar o

signal that passes through it. The OADM is necessary because not all channels have the same origin and destination. Figure 11 illustrates its operation.

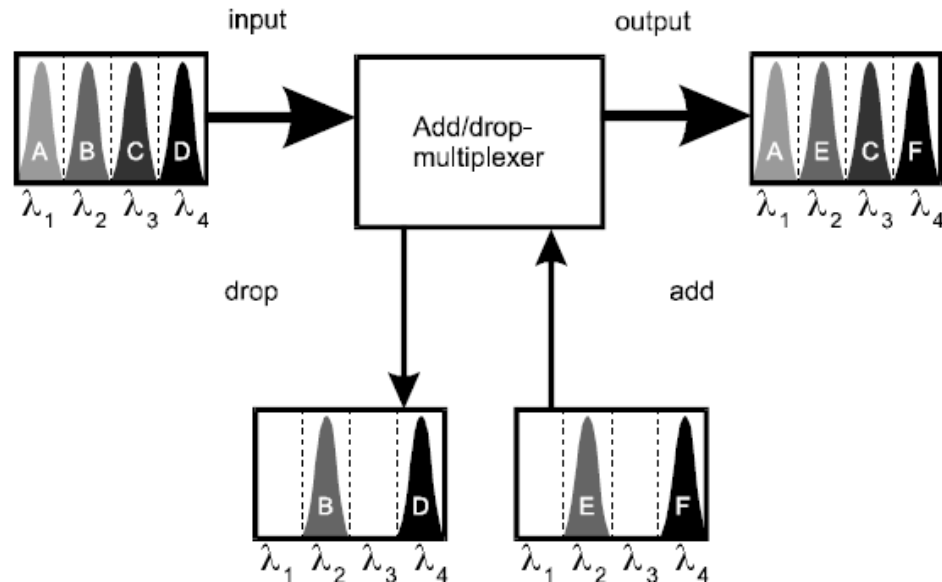


Figura 11 – Esquema de um OADM.
Fonte: Profile (2000).

Os sistemas DWDM são utilizados essencialmente para enlaces de longa distância, o que requer que o sinal seja amplificado em determinada parte da fibra. Uma maneira ultrapassada de realizar essa amplificação é através dos repetidores elétricos. Um repetidor converte o sinal óptico através de um fotodiodo em um sinal elétrico. Esse sinal é amplificado e convertido novamente em um sinal óptico. Esse processo deve ser feito para cada canal do sistema, o que torna o amplificador complexo e caro além de reduzir a taxa de cada canal. Esse tipo de solução é denominada opaca (OEO).

Por isso, nos sistemas DWDM faz mais sentido que seja utilizado um amplificador óptico, que é independente da taxa de bits transportado e que opera sem converter os sinais para o âmbito elétrico. Essa é a solução transparente (OOO).

Até agora descrevemos a camada óptica propriamente dita. Nas seções seguintes serão abordadas camadas de nível superior, que podem ser chamadas de clientes da camada óptica, uma vez que utilizam seus serviços para fazer o transporte de dados.

2.4 REDES SONET/SDH

Ramaswani *et al.*, (2012) definiram as redes SDH como sendo a primeira geração de redes ópticas, mas esclareceu que na verdade elas são de uma hierarquia superior ao DWDM e CDWM, utilizando os serviços desta camada para fazer o transporte de dados. Outros clientes das redes de transporte incluem as redes OTN (que serão vistas a seguir) e os protocolos IP, Ethernet, ATM e MPLS, dentre outros.

As Redes Ópticas Síncronas ou SONET foram desenvolvidas em 1985 por um grupo de empresas americanas ligadas ao Bell Labs e se tornou um padrão de transmissão óptica utilizada nos Estados Unidos. Três anos mais tarde, a União Internacional de Telecomunicações (ITU) desenvolveu uma padronização mundial baseada no SONET, chamada de Hierarquia Digital Síncrona ou SDH. No ano de 1990 o ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) definiu que um subconjunto do padrão SDH seria o padrão para todos os países europeus e este passou a ser utilizado em todo o mundo, com exceção dos Estados Unidos e Japão (GIMABENE, 2015).

Dutton (1998) alerta que, apesar do nome, o SONET não é uma rede óptica. É na verdade um sistema de rede eletrônica desenvolvido para utilizar enlaces ópticos. Apesar disso, as redes SONET/SDH foram de imensa importância para o setor pelos seguintes motivos principais:

- Eles ofereceram uma vasta economia de custo em redes de comunicação através da redefinição da multiplexação de canais. O método de Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM) oferecido pelo SONET/SDH proporcionou maiores velocidades de uma forma mais eficiente.
- As facilidades de gerenciamento e controle da planta que essa tecnologia trouxe revolucionou o modo como as operadoras gerenciavam sua rede.
- A padronização permitiu que equipamentos de diversos fabricantes fossem usados em conjunto de forma eficiente
- Diferentes tipos de tráfego podem ser carregados no sistema;

- Diversos níveis de multiplexação e demultiplexação feitos de maneira simples, sem a necessidade de demultiplexar hierarquias mais altas para ter acesso a níveis mais baixos.

O padrão SONET foi desenvolvido para transportar os *payloads* da Hierarquia Digital Plesiócrons (PDH) norte americana, com taxas de 1,5/6/45 Mbps, conhecidos como T1, além do E1 de 2 Mbps. Já o SDH foi desenvolvido para transportar tanto os padrões PDH americanos quanto os padrões europeus (2/34/140 Mbps). Apesar de sua importância econômica e histórica, o presente trabalho não abordará com profundidade o SONET, deixando o estudo focado na tecnologia SDH a partir deste ponto.

A multiplexação do SDH combina circuitos digitais de baixa velocidade (PDH) com o cabeçalho necessário para formar o que chamamos de Módulos de Transporte Síncronos de primeiro nível (STM-1), com taxa básica de 155,52 Mbps. A Figura 12 mostra o quadro (*frame*) STM-1, que é composto por nove linhas de 270 bytes cada. Os primeiros nove bytes de cada linha carregam o cabeçalho. Os outros 261 bytes contém o *payload*.

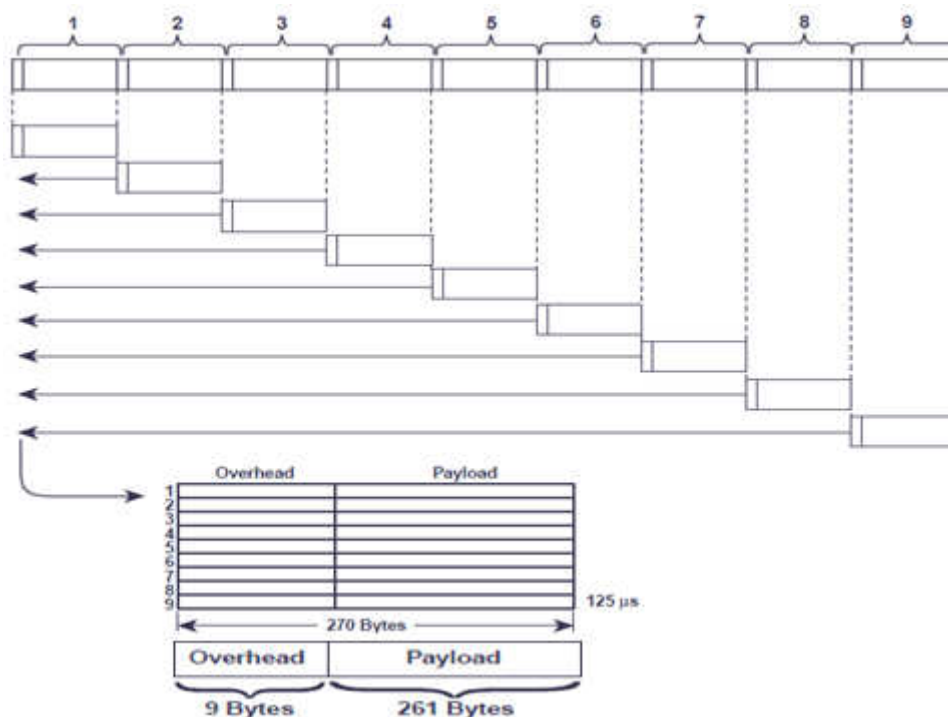


Figura 12 - Quadro STM-1.
Fonte: Adaptado de Giambene (2015).

Dentro de cada quadro, os canais de menor velocidade (tributários) podem ser carregados e normalmente ocupam um número consecutivo de colunas no *payload*. Um E1, por exemplo, ocupa quatro colunas no quadro STM-1. O T1 ocupa três colunas. É interessante notar que há certo “desperdício de banda” neste ponto, já que um E1 necessitaria de 32 *slots* e ocupa 36 (9 linhas x 4 colunas). Dutton (1998) afirma que esse “desperdício” é um preço muito pequeno a ser pago pelo enorme benefício de poder retirar um único tributário de toda uma cadeia de nível superior sem ter que demultiplexá-lo.

O SDH opera a uma taxa básica de 8 kHz ou 125 ms por quadro, de forma a integrar facilmente os serviços digitais legados nesta nova hierarquia. Em um segundo, são 8.000 quadros. A taxa de dados (*bit rate*) dá-se da seguinte forma:

Capacidade por quadro = 270 bytes/linha x 9 linhas/quadro x 8 bits = 19.440 bits/quadro

Taxa = 8.000 quadros/s x 19.440 bits/quadro = **155,52 Mbps**.

Além do STM-1, outros dois níveis de transmissão foram definidos na hierarquia SDH, o STM-4 e o STM-16. O ITU especificou que o sinal STM-4 deve ser criado pela intercalação de quatro sinais STM-1, conforme ilustra a Figura 13. A taxa básica do quadro continua 8000 quadros/s, mas a capacidade é quadruplicada, resultando em uma taxa de 622 Mbps. O STM-16 segue o mesmo princípio e é resultado da multiplexação de quatro STM-4.

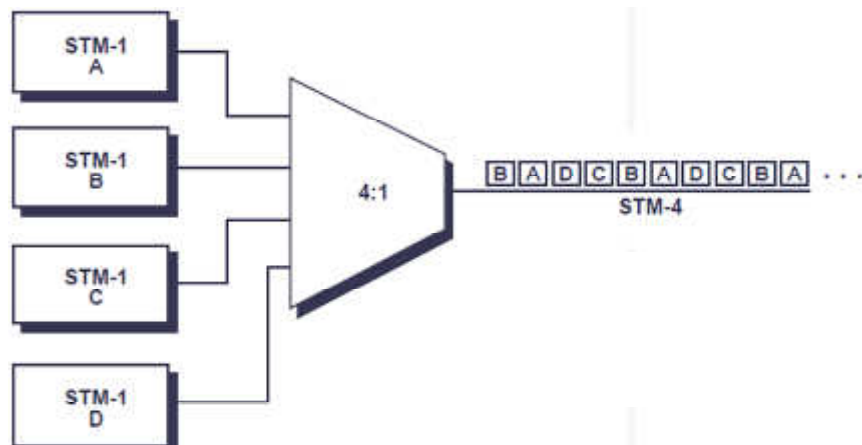


Figura 13 - Multiplexação de 4 STM-1 em um STM-4.
Fonte: Giambene (2015).

A Tabela 1 mostra um resumo da capacidade dos principais canais SDH em relação a outros tributários.

Frame	Taxa (Mbps)	Payload (Mbps)	Estrutura Típica de Tributários
STM-1	155,52	148,61	63 E-1 ou 3 E-3
STM-4	622,08	601,34	4 STM-1
STM-16	2.488,32	2.405,38	16 STM-1 ou 4 STM-4

Tabela 1 - Canalização SDH.
Fonte: o próprio autor.

A seguir o trabalho abordará uma evolução das redes SDH e que está ganhando espaço nas operadoras de telecomunicações ao redor do mundo: as redes OTN.

2.5 REDES OTN

O padrão conhecido como *Optical Transport Network* ou OTN foi desenvolvido para ser uma evolução das redes SONET/SDH. Schubert (2008) afirma que desde o final dos anos 80 as redes SONET/SDH proporcionou um meio flexível, transparente e confiável para transportar uma gama de protocolos como IP, Ethernet, *Fibre Channel* e outros. Enquanto isso, o desenvolvimento das redes DWDM durante as décadas seguintes aumentou consideravelmente a largura de banda disponível, mas sem endereçar pontos de proteção e gerenciamento inerentes a tecnologia SONET/SDH.

A implementação da tecnologia DWDM também trouxe uma nova gama de elementos de rede (NE), incluindo amplificadores ópticos, *switches*, multiplexadores e demultiplexadores. Tudo isso criou uma espécie de subcamada de itens que deveriam ser monitorados para garantir a confiabilidade do transporte de dados.

Segundo Fujitsu (2010) o objetivo das redes OTN é combinar os benefícios das redes SONET/SDH, como monitoração de desempenho, detecção de falhas, canais de comunicação e hierarquias de multiplexação, com a expansibilidade de largura de banda das redes DWDM. Em suma, as redes OTN aplicarão funcionalidades de administração, manutenção e operação (OAM) às redes ópticas DWDM. A recomendação do ITU G.709 define os padrões das redes OTN e seus benefícios podem ser sumarizados da seguinte forma:

- Transparência em relação a protocolos;
- Compatibilidade com protocolos existentes e legados;
- Possibilidade de utilizar o FEC (*Forward Error Correction*);
- Transporte óptico fim-a-fim;
- Melhora de OAM para o DWDM.

Atualmente é comum associar redes OTN com tecnologias Ethernet, mas, conforme exposto anteriormente, o OTN foi criado para gerenciar o DWDM e utilizar as redes SONET/SDH como seus clientes. Porém, a partir de 2009, ficou claro que a maioria do tráfego transportado pelo OTN era baseado em Ethernet/IP. Logo, os padrões OTN foram adaptados para alinharem-se com as características do tráfego Ethernet (LITTLEWOOD et al, 2014). A Figura 14 mostra como diferentes serviços são mapeados em um comprimento de onda comum, fornecendo uma banda de gerenciamento a taxa do serviço da taxa da linha. Além disso, o OTN inclui ajustes de tempo por serviço, para carregar tanto serviços síncronos quanto assíncronos em um mesmo comprimento de ondas.

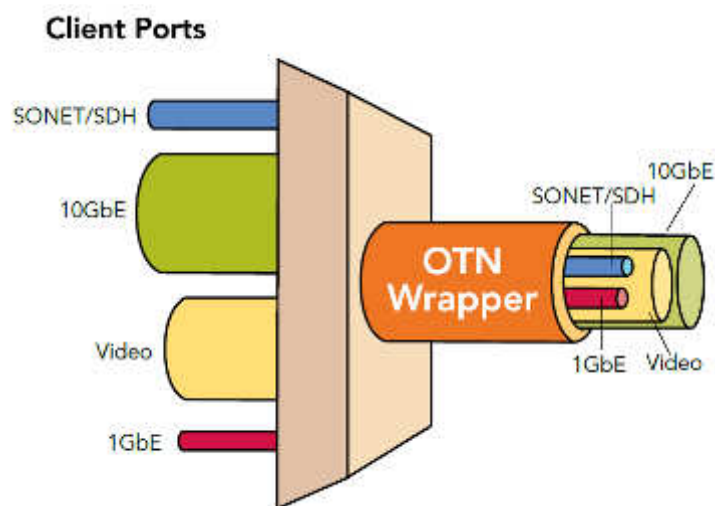


Figura 14 - Diferentes tipos de serviço em um mesmo comprimento de onda.
Fonte: Littlewood *et al* (2014).

Autores como Fujitsu (2010), Littlewood *et al.*, (2014) e Schubert (2008) concordam que a principal desvantagem da rede OTN fica no campo econômico, obrigando as operadoras a fazerem vultuosos investimentos para evoluir sua rede e

modificar seus sistemas de gerência. Porém, também é argumentado que os investimentos devem ser feitos de qualquer maneira para suportar uma demanda por tráfego cada vez maior e que os investimentos na rede OTN, oferecem um Rol (*Return of Investment*) melhor do que as redes IP/DWDM.

2.5.1 Estrutura do Quadro OTN

O quadro OTN é constituído por diversos componentes, em diferentes hierarquias, que se comunicam entre os nós da rede. O Módulo de Transporte Óptico (OTM) é a estrutura transportada entre as interfaces ópticas. Ele é constituído de duas partes: uma seção digital e uma seção analógica, conforme ilustra a Figura 15.

O OPU (Optical channel Payload Unit) contém as informações da camada cliente (*payload*) acrescido de um cabeçalho (OH – Overhead), que tem a função de mapear o tipo do serviço que está no payload. O OPU é então adicionado a um outro cabeçalho, que contém indicações de alarmes e bytes de chaveamento automático, dando origem ao ODU (Optical channel Data Unit). O ODU é acrescido do FEC e de mais um cabeçalho, com informações da camada óptica, formando o OTU (Optical Transport Unit). A camada física então mapeia o OTU em um comprimento de ondas, formando o OCh (*Optical Channel*), que é enviado pela linha óptica.

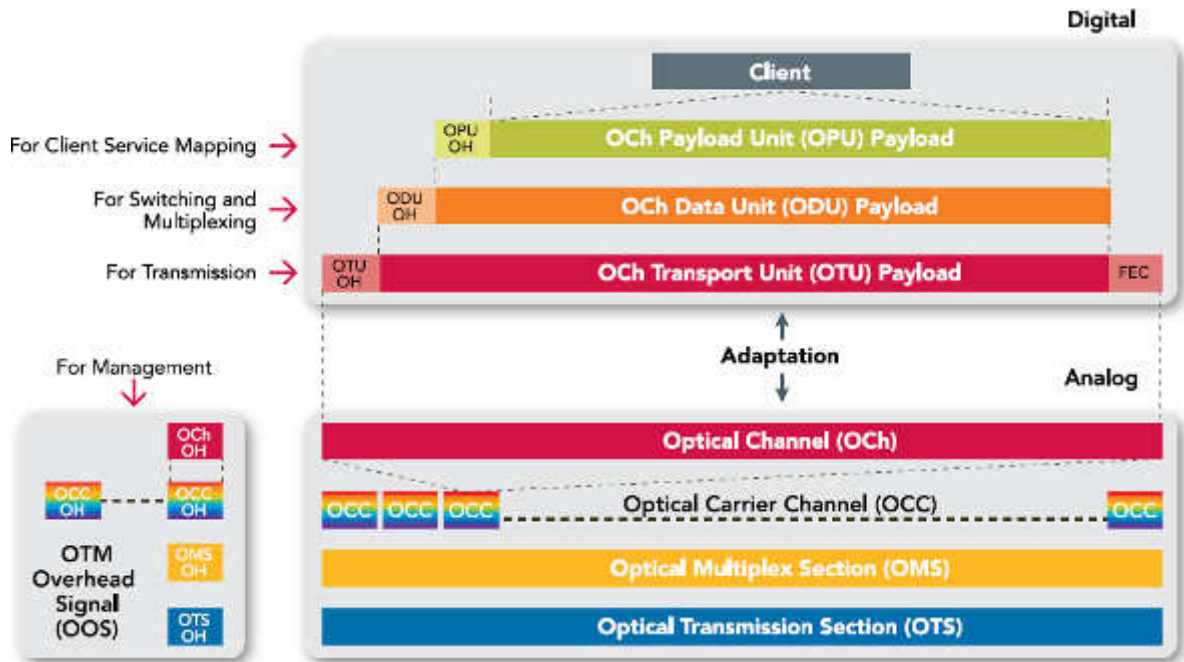


Figura 15 - Módulo de Transporte Óptico (OTM).
Fonte: Littlewood *et al* (2014).

Uma Seção de Multiplexação Óptica (OMS) encontra-se entre dois dispositivos e pode multiplexar comprimentos de onda em uma fibra. Uma Seção Óptica de Transmissão (OTS) consiste da fibra entre quaisquer dispositivos que realizem função óptica no sinal, como um amplificador de linha. A Figura 16 ilustra este conceito.

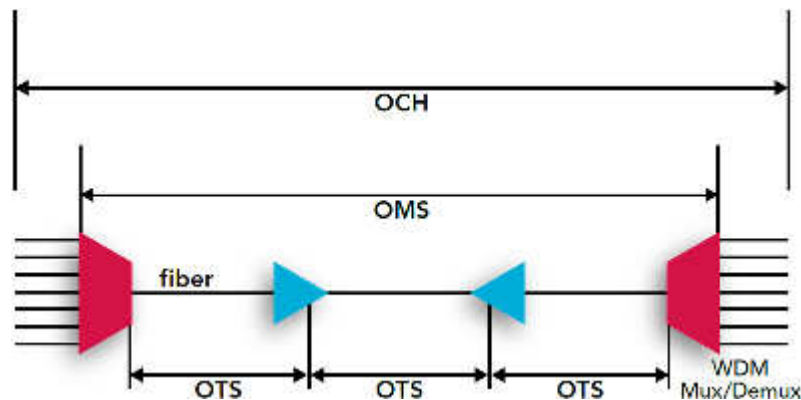


Figura 16 - Estrutura Linear do OTN.
Fonte: Littlewood *et al* (2014).

O cabeçalho OTN também oferece os bytes de monitoramento do caminho (TCM) que proveem uma função crítica de monitoração da qualidade do sinal fim-a-fim. Em grandes redes, construídas em áreas geográficas distintas, é muito comum que diversas operadoras façam o transporte dos sinais. O OTN permite que a

operadora que deseja fazer o transporte fim-a-fim monitore o sinal através de pontos definidos pelo usuário, que podem ser, por exemplo, ao entrar e ao sair do *backbone* de outra operadora, conforme Figura 17.

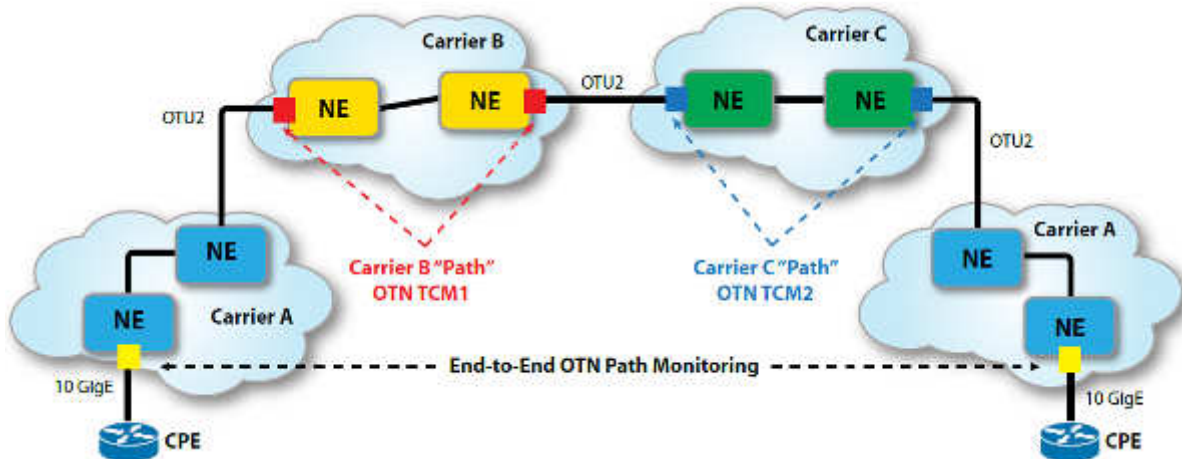


Figura 17 - Monitoramento do TCM nas redes OTN.
Fonte: Fujitsu (2010).

2.5.2 Hierarquias de Multiplexação OTN

As redes OTN permitem uma padronização das hierarquias de multiplexação, definindo exatamente como os sinais com bandas mais baixas devem ser mapeados nos *payloads* de taxas mais altas. Isso foi muito importante para as operadoras, pois anteriormente cada fabricante tinha seu próprio método de mapear hierarquias mais baixas em hierarquias de níveis superiores, o que obrigava as operadoras detentoras de grandes redes de múltiplos fornecedores a demultiplexar os comprimentos de onda de 10 ou 40 Gbps a cada fronteira entre fornecedores (FUJITSU, 2010).

O padrão G.709 definiu a taxa dos OTUs e ODUs, além do tipo de tráfego que eles devem transportar. A Tabela 2 mostra um resumo destas informações.

Sinal	TAXA (Gbps)	Otimizado para:
OTU 1	2,66	STM-16 ou OC-48
OTU 2	10,7	STM-64, OC-192 ou 10GbE WAN
OTU 2e	11,09	10GbE LAN
OTU 3	43,01	STM-256, OC-768 ou 40GbE
OTU 4	112	100 GbE
ODU 0	1,24	1000 BASE-X comprimido
ODU 1	2,5	2 ODU-0 ou STM-16
ODU 2	10,04	8 ODU-0, 4 ODU-1 ou STM-64
ODU 2e	10,4	10 GbE comprimido ou 10G Fibre Channel
ODU 3	40,3	32 ODU-0, 16 ODU-1, 4 ODU-2, STM-16 ou 40GbE
ODU 4	104,8	80 ODU-0, 40 ODU-1, 10 ODU-2, 2 ODU-3 ou 100GbE

Tabela 2 - Taxas padrão de ODUs e OTUs.

Fonte: adaptado de Littlewood *et al* (2014).

Como pode ser visto na Tabela 3, o OTN suporta multiplexação simples ou múltipla em containers de hierarquias superiores no nível da ODU. A figura XX dá uma boa idéia de como as hierarquias podem ser multiplexadas.

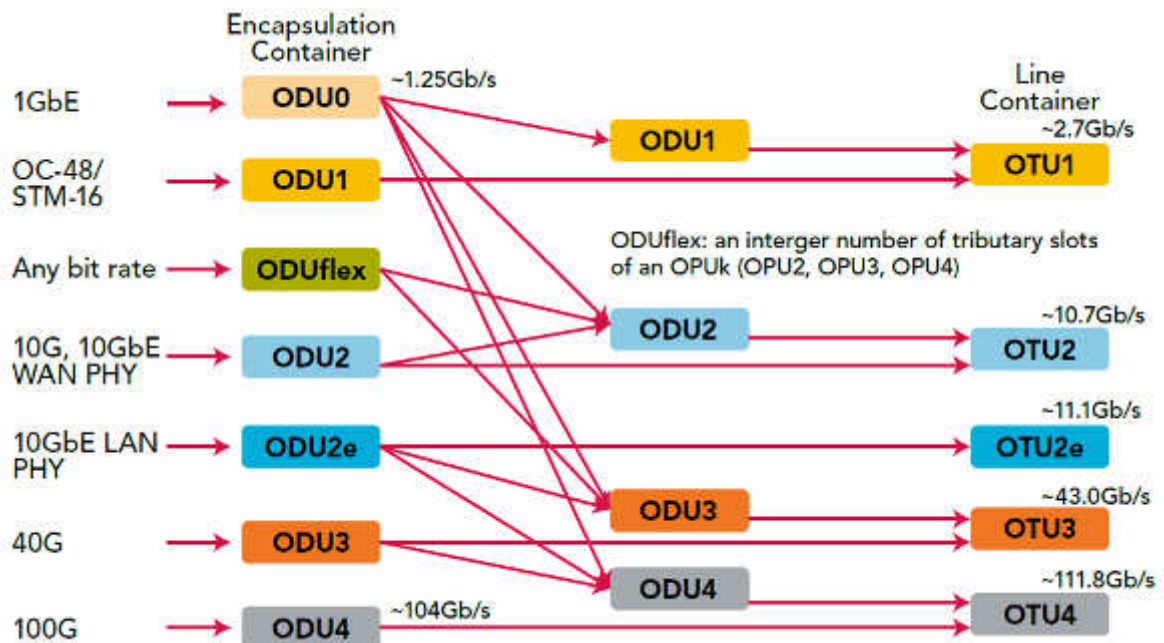


Tabela 3 - Mapeamento das Hierarquias OTN.

Fonte: Littlewood *et al* (2014).

2.5.3 Propriedades Avançadas das redes OTN

A tecnologia OTN está evoluindo de sua função inicial de prover padrões de monitoração e qualidade do sinal às redes DWDM. Por muitos anos, as redes OTN estavam restritas ao transporte ponto-a-ponto de comprimentos de onda dedicados. Porém, segundo Fujitsu (2010) a tecnologia já se expandiu para aplicações de comutação (*switching*) e agregação.

Quando um cliente compra um serviço de 10 Gbps privado por exemplo, claramente a capacidade está abaixo das linhas de 100 Gbps. Esses serviços eram tipicamente preenchidos com transponders e muxponders conectados diretamente a uma linha óptica dedicada, utilizando um ou múltiplos comprimentos de onda. Como as linhas ópticas são dedicadas, o serviço é inflexível e o resultado é a subutilização do hardware e da largura de banda.

Uma solução é utilizar as *switches* OTN para reduzir o número de comprimentos de onda e de multiplexadores necessários. A maior parte das grandes operadoras já possuem *switches* tradicionais implantadas nos seus pontos de grande fluxo de tráfego, onde as redes de acesso se unem ao *backbone* da rede. Estes são os candidatos naturais a introdução das *switches* OTN, conforme ilustra a Figura 18.

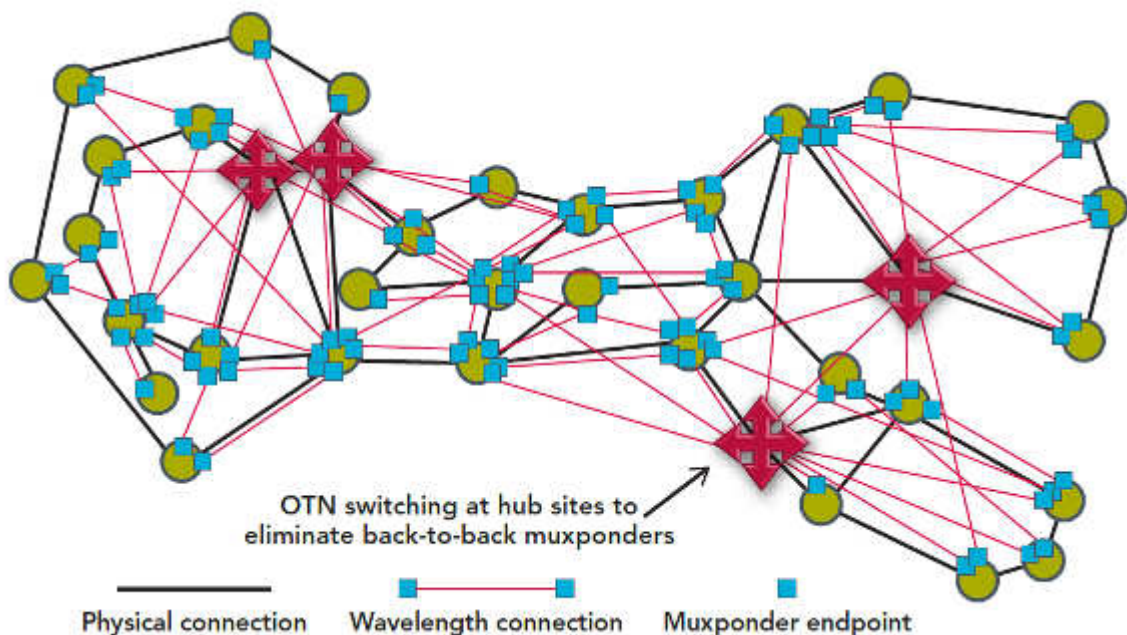


Figura 18 - Introdução de OTN Switches.
Fonte: Littlewood *et al* (2014).

A eliminação da fragmentação também faz com que as *switches* OTN tenham uma alta utilização da largura de banda, o que mantém a alta utilização dos comprimentos de onda e otimização dos DWDMs do sistema. A introdução nas *switches* OTN do ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) possibilita o direcionamento automático dos serviços e redução no número necessário de comprimentos de onda, devido ao compartilhamento de capacidades comuns. Especialmente para velocidades além do 100 Gbps, essa otimização de comprimentos de onda é mandatória.

Segundo Littlewood et al (2014), o valor das redes OTN é significativamente multiplicado quando combinado com um plano de controle ASON (*Automatically Switched Optical Network*) ou GMPLS (*Generalized Multi Protocol Label Switching*). O plano de controle automatiza muitas operações de rede, como a configuração, modificação ou desativação de serviços, além de prover restauração automática e roteamento do tráfego impactado sem intervenção humana. A rede se torna mais resiliente, suportando múltiplas falhas e oferecendo uma disponibilidade de seis nozes (99,9999%).

As operadoras podem construir redes com diversos níveis de serviços, oferecendo diversas formas de proteção contra quedas e até nenhuma proteção para serviços de baixa prioridade. Outra vantagem é que o plano de controle OTN permite detectar quedas e restaurar o sistema em tempos abaixo de 50 ms, fazendo com que a rede sequer perceba uma falha no sistema e uma mudança de rotas.

Outra possibilidade interessante é a de ter uma infraestrutura dinâmica com os planos de controle OTN. Serviços emergentes, como interconexão sob demanda para data centers, requerem grande largura de banda quase que instantaneamente. O plano de controle pode negociar dinamicamente com o sistema operacional da Cloud para provisionar novas conexões e fornecer mais largura de banda. Quando não for mais necessário, o próprio plano de controle desfaz estas conexões, conforme ilustra a Figura 19.

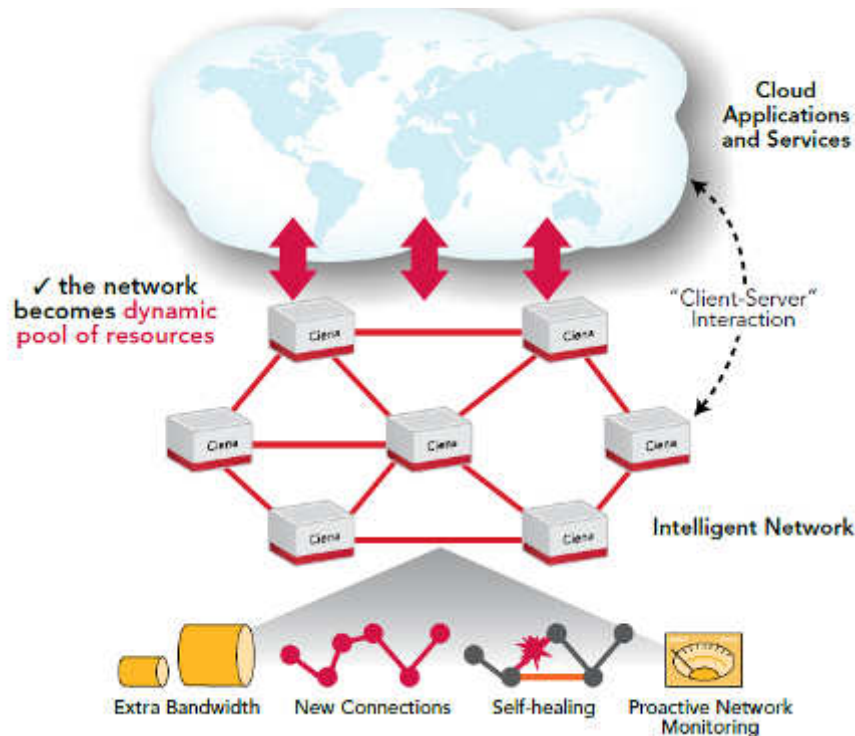


Figura 19 - Recursos Dinâmicos com OTN e seu plano de controle.
Fonte: Littlewood *et al* (2014).

2.6 ARQUITETURAS DE REDE

É importante entendermos que nas grandes redes de telecomunicações hoje temos quatro cenários de estruturação do *backbone*, conforme exposto abaixo e ilustrado na Figura 20 (INFINERA, 2013):

- **Full Core:** utiliza roteadores de Core que concentram as funções de *peering*, roteamento de pacotes e *MPLS switching*, conectados em malha através de redes DWDM com transponders e ROADMs.
- **Thin Core:** reduz o custo de processamento IP com equipamentos mais baratos que suportem MPLS, que neste caso é a tecnologia utilizada para definir o caminho dos pacotes. Além disso, as interfaces coloridas DWDM são levadas para o roteador. Essa é a tecnologia mais otimizada para o que chamamos de IP sobre DWDM (IPoDWDM).
- **Core OTN:** utilizar *switches* OTN conectados ao Core da rede em pontos de grande concentração de tráfego IP.

- **Hollow Core:** ou núcleo oco, é uma arquitetura que propõe eliminar completamente o Core IP e conectar os roteadores de acesso através de um Core de Switches OTN.

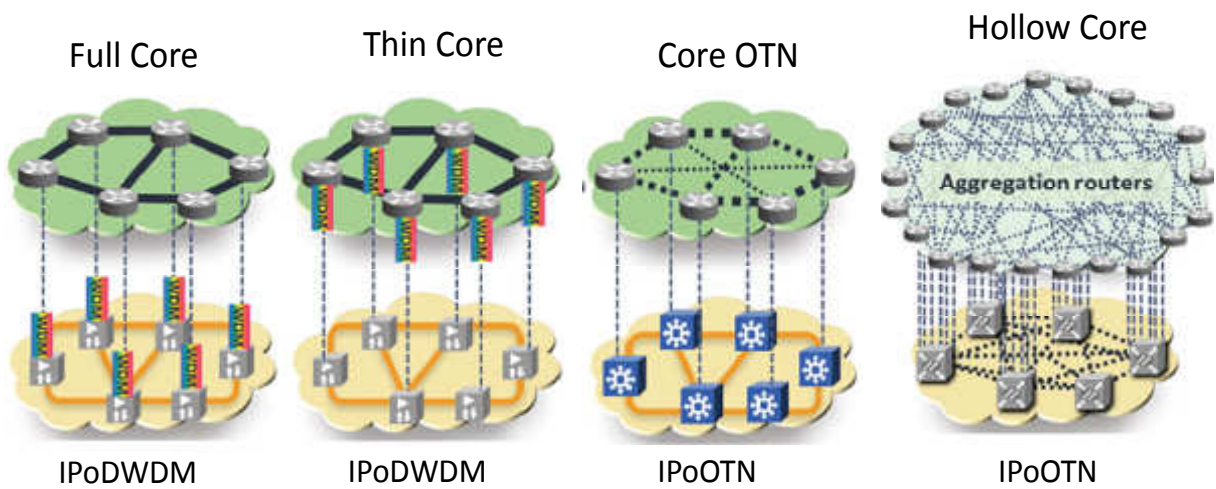


Figura 20 - Arquiteturas de Core da Rede.
Fonte: Adaptado de Infinera (2013).

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As teorias e conceitos apresentados formam um arcabouço teórico que nos permite identificar e avaliar as diferentes soluções que tem sido utilizado pelas operadoras de telecomunicações para construir sua infraestrutura de redes, em especial em relação à solução de transporte óptico utilizada.

As arquiteturas de grandes redes de telecomunicações são hierárquicas, com cada equipamento provendo uma função especializada dentre das sub-funções principais: transporte WDM, OTN *switching*, MPLS *switching* e roteamento IP. O custo da rede, medido pela complexidade de processamento e consumo de energia para cada bit trafegado, aumenta conforme chega-se as camadas superiores. O custo de energia, dissipação de calor e comutação fotônica é menor na camada DWDM do que nas outras de hierarquias superiores. Na camada IP, o cabeçalho de cada pacote deve ser inspecionado, processado e roteado para o caminho certo, o que significa mais gastos com dissipação, energia, entre outros. Seguindo esta linha, temos uma sequência crescente de custo por bit na seguinte ordem: DWDM, OTN, MPLS e IP.

Infinera (2013) apresentou um estudo realizado através de modelagem computacional pela agência de consultoria Ovum para comparar a construção de um *backbone* utilizando IPoDWDM e IPoOTN. Foram usados como base dois cenários existentes: o primeiro, a construção de uma rede de um grande provedor de internet dos estados Unidos, com tráfego total de 12,6 Tb/s; e o segundo uma rede média de um país Europeu, com tráfego de 6,3 Tb/s. Dentro de cada cenário, seriam construídos dois cores de rede o primeiro chamado de super core e o segundo chamado de core externo (outer-core). No apêndice 1 são apresentadas as premissas utilizadas nos cenários IPoDWDM e IPoOTN para cada tipo de Core.

O resultado é que em ambas as modelagens o Core IPoOTN ficou cerca de 30 % mais barato do que o Core IPoDWDM. Alguns dos fatores que contribuíram para esta diferença são:

- As *interfaces* WDM utilizadas nos roteadores são muito mais caras em comparação com as *interfaces* Ethernet utilizadas na arquitetura IPoOTN;

- Enlaces IP são multiplexados na camada OTN em 100 Gbps por comprimento de onda, ou em super canais de 500 Gbps, maximizando a capacidade da rede WDM;
- O tráfego IP é mantido na camada OTN para reduzir a necessidade de roteamento da rede, eliminando nós intermediários e deixando roteadores apenas com as *interfaces* de 10/40/100 Gbps necessárias.

Porém, uma informação relevante é que este estudo considera uma rede que seria construída a partir do zero, fato que sabemos que não é a situação da maioria absoluta das operadoras, que cresce gradativamente e geralmente já tem um Core IP estabelecido.

Já a fabricante de roteadores Juniper Networks (2011) apresentou um artigo em que compara o que eles chamam de solução de comutação de circuitos (OTN) com solução de comutação de pacotes (IP). Ele reconhece que o custo do *bit* trafegado é mais baixo em hierarquias inferiores, como o WDM e o OTN, mas questiona se as soluções IPoOTN são realmente as mais eficientes. Como vimos anteriormente, uma das bases para que o OTN seja mais barato é a eliminação de saltos intermediários em uma topologia em malha. Juniper (2011) afirma que nem sempre é vantajoso desconsiderar os nós intermediários. A razão é que no IP é possível se beneficiar dos ganhos estatísticos, enquanto no OTN deve ser estabelecido um circuito (canal) com o pior caso, o que também pode encarecer a rede. A Figura 21 ilustra o exemplo dado pelo autor. Se o tráfego com origem em A tem que chegar a C passando pelo ponto B, a multiplexação estatística vai unir o tráfego de A para B com o tráfego de A para C e utilizá-lo de uma forma bastante otimizada, enquanto no dimensionamento do circuito OTN, o tráfego de pico deve ser escolhido como referência.

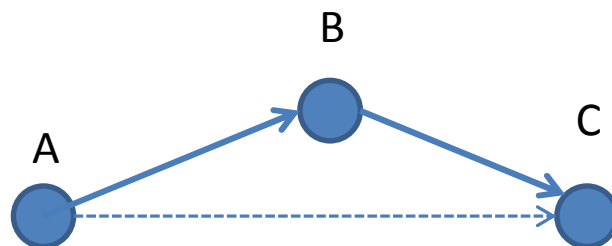


Figura 21 - Caminho do Tráfego IP.
Fonte: O próprio autor.

Juniper (2011) também realizou uma modelagem computacional para comparar cenários similares ao apresentados na seção 2.6 deste trabalho, com um cenário puramente IP/MPLS, um cenário puramente OTN e um cenário híbrido IP/MPLS/OTN. O modelo que apresentou um custo mais baixo por porta foi o modelo híbrido, mas seguido de perto pelo cenário IP/MPLS.

Esse resultado é decorrente do fato de o autor ter utilizado tráfego bastante variável durante a modelagem, o que beneficia os ganhos estatísticos do IP, em detrimento das interfaces claramente mais caras. Juniper conclui o artigo defendendo o próprio terreno e chamado de “aritmética da incerteza” o investimento em uma nova tecnologia, com novos dispositivos e um novo paradigma de conectividade.

Assim como estes artigos, uma série de empresas e autores, como Hongli (2013), Infinera (2013), Alcatel-Lucent (2015), Tsirilakis et al (2005), Ciena (LITTLEWOOD et al, 2013) defendem o seu ponto de vista e mostram cenários onde são vantajosos. Abaixo são sumarizados os pontos convergentes encontrados nestes diversos artigos e que podem ajudar na hora de tomar-se a decisão por uma tecnologia ou outra:

- Um **modelo híbrido** sempre apresenta o melhor custo-benefício. Em nenhuma modelagem o Core puramente IP ou puramente OTN foram vantajosos. No Core puramente IP (Full Core), o custo de bit trafegado é bastante elevado, graças ao preço por porta e necessidade de buffers. No Core puramente OTN (Hollow Core) as adjacências e tabelas de roteamento dos roteadores de acesso ficavam muito grandes e inviabilizavam as redes.
- O investimento em OTN representa a entrada de uma nova tecnologia na rede e requer uma série de investimentos difíceis de ser mensurados, como integração da plataforma com os sistemas de OSS (*Operations Support System*) e familiarização do corpo técnico com a tecnologia.
- A tecnologia IPoDWDM já é existente no backbone da maioria das operadoras e sua ampliação requer um investimento mais suave e menos disruptivo.
- Uma rede óptica inteligente, com a introdução do plano de controle ASON/GMPLS, pode aumentar bastante a disponibilidade do sistema e criar uma rede que se adapta as necessidades de tráfego.

- A integração do plano de controle das camadas IP e óptica, através dos protocolos emergentes como o GMPLS UNI (User-Network Interface), permitirá que as duas camadas atuem em conjunto. Assim podem oferecer uma estratégia de proteção e restauração multicamadas diferenciada, que economizará recursos de ambas as redes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um ditado comum no mercado é que se deve comutar quando puder e rotear quando precisar. Assim como no ditado, chegamos a um veredicto de que o custo de roteamento é realmente mais alto do que o custo de comutar (*switch*) ou transportar via rede OTN. As redes OTN tem ganhado popularidade nas grandes operadoras de telecomunicações do mundo, devido a flexibilidade e ao alto nível de gerenciamento que ela fornece. Porém, isso não quer dizer que elas sejam sempre vantajosas. Seu investimento inicial é alto e ela introduz um novo paradigma de transporte na rede das operadoras.

Em um mercado que movimenta milhões de dólares, a resposta não pode ser dada apenas em função da demanda no presente. Novas tecnologias estão surgindo, como as redes definidas por *software* (SDN), que terão impacto não só em como os *backbones* são gerenciados, mas em como eles são construídos.

Como proposta para elaboração de trabalhos futuros, sugere-se:

- Aprofundar e ampliar o escopo da pesquisa, de forma a mapear também os protocolos IP, MPLS e Ethernet, a fim de entender como a integração com a camada óptica pode ser vantajosa.
- Realizar um estudo econômico, para determinar se os resultados na realidade local seriam os mesmos apresentados por outros autores em diversas partes do mundo.
- Por fim, aprofundar o estudo das tecnologias emergentes de integração entre a camada IP e a camada óptica, como o GMPLS UNI, a fim de determinar a sinergia entre as camadas.

REFERÊNCIAS

ALCATEL-LUCENT. **Capitalizing on IP/Optical Control Integration**. Disponível em: <<http://www2.alcatel-lucent.com/landing/GMPLS/>>. Acesso em: 05 Jul. 2015.

DUTTON, Harry. **Understanding Optical Communications**. North Carolina: IBM Corporation, 1998.

FUJITSU Network Communications. **The Key Benefits of OTN Networks**. Richardson: 2010.

GIAMBENE, Giovanni. **The Fundamentals of SDH**. Disponível em <http://www.dii.unisi.it/~giambene/reti_di_telecomunicazioni_materiale/materiale_did_attico/Vecchio_Ordinamento_e_Specialistica/SDH_technology.pdf>. Acesso em 12 jun. 2015.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HONGLI, Liu. **IP and OTN synergy creates enhanced backbone networks**. Shenzhen: Beares Network, 2010.

INFINERA. **Better Network Economics with IPoOTN**. Sunnyvale: 2013. Disponível em: <http://www.infinera.com/pdfs/whitepapers/Infinera-WP-Better_Network_Economics_with_IPoOTN.pdf>. Acesso em 5 Jul. 2015.

JUNIPER Networks. **MPLS, OTN, AND THE RISING TIDE OF TRAFFIC**. Sunnyvale: 2011.

LITTLEWOOD, Paul et al. **Optical Transport Networking**. Hanover: Ciena, 2014.

NUNES, F. D. **Sistemas de Comunicação Óptica**. Poços de Caldas: Instituto Federal Sul de Minas, 2012. Disponível em: <<https://intranet.ifs.ifsuldeminas.edu.br/~fatima.bueno/Redes%20%C3%93pticas/Sistemas%20de%20Comunica%C3%A7%C3%A3o%20%C3%93ptica.pdf>>. Acesso em 08 Jun. 2015.

PROFILE Optische Systeme. **DWDM Systems**. Karsfeld, 2000. Disponível em: <http://imedea.uib-csic.es/~salvador/coms_optiques/addicional/profile/profileWDM.pdf>. Acesso em: 15 Jul. 2015.

RAMASWANI, K. et al. **Optical Networks: a practical perspective**. 3 ed. Massachusetts: Morgan Kaufmann, 2009.

RIBEIRO, José A. J. **Características da Propagação em Fibras Ópticas**. Instituto Nacional de Telecomunicações. Departamento de Telecomunicações. Santa Rita do Sapucaí, 1999.

SCHUBERT, Andreas. **G.709 – The Optical Transport Network (OTN)**. JDSU:2008. Disponível em: < http://www.jdsu.com/ProductLiterature/G709-OTN_wp_opt_tm_ae.pdf >. Acesso em 20 Jun. 2015.

TRANSMODE. **CWDM Cost Efficient Transport in Optical Networks**. Disponível em: < <http://www.transmode.com/en/technologies/wdm/cwmdm> >. Acesso em 10 Jun 2015.

TSIRILAKIS, I et al. **Cost Comparison of IP/WDM vs. IP/OTN for European Backbone Networks**. Athenas: ICTION, 2005.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010

ZANELLA, L. **Metodologia de Estudo de Pesquisa em Administração**. Brasília: CAPES: UAB, 2009.

APÊNDICE A

Infinera em seu estudo de casos comparando as tecnologias IPoDWDM e IPoOTN criou alguns parâmetros para comparar as redes no Super-Core e no Core Externo (Outer-Core), conforme tabela abaixo.

	IPoDWDM	IPoOTN
Super-Core	Interfaces coloridas WDM 100G conectadas a um comutador de guia de ondas ROADM. A interface 100G podia ser utilizada até 75%, antes que conexões roteador-roteador fossem adicionadas. As conexões WDM 100G saltavam roteadores intermediários.	A conexão do roteador até o WDM/OTN utilizava portas simples Ethernet 10/40/100G. Os links Ethernet eram mapeados em ODUs dos OTN switches, multiplexados e conectados com interfaces 100G WDM entre as switches para maximizar a capacidade da fibra. Essa escolha aumentou o número de possíveis conexões diretas comparado com o IPoWDM, resultado em um Super-Core mais malhado. O número máximo de adjacência de roteadores foi limitado a 32.
Outer-Core	Conectado ao Super-Core utilizando interfaces 10/40/100G baseados no tráfego. As interfaces 10/40G utilizavam Ethernet óptico de curto alcance multiplexado em um muxponder 100G WDM para maximizar a capacidade da fibra enquanto o 100G utilizava interfaces WDM integradas no roteador.	Conectado ao switch WDM/OTN convergente com interfaces Ethernet 10/40/100G de curto alcance. Os links Ethernet eram mapeados na OTN switch, multiplexado e conectado por interfaces 100G WDM entre os switches para maximizar a capacidade da fibra.

Tabela 4 - Parâmetros das Redes IPoWDM e IPoOTN

Fonte: Adaptado de Infinera (2013, p. 6).