

Redes Metropolitanas

O dimensionamento de uma rede de acesso preparada para as demandas atuais e futuras que utilize determinada tecnologia capaz de oferecer elevada largura de banda aos usuários finais, possibilitando a esses o acesso aos múltiplos novos serviços, não é garantia de que o serviço será entregue com a qualidade desejada. Para que a experiência do usuário seja minimamente satisfatória, o restante da rede deverá estar dimensionado para suportar o tráfego demandado pelos clientes da rede. Parte fundamental da rede e que pode ser o gargalo para o atendimento aos usuários são as redes metropolitanas, que fazem a conexão entre as redes de longa distância interurbanas e regionais e as redes de acesso, sendo elas também início e fim de conexões com demanda localizadas em mesma área geográfica. A Figura 34 mostra uma visão geral das redes metropolitanas e suas conexões, com toda a complexidade exigida para o atendimento a distintos tipos de aplicações e conexão com diversos segmentos de redes.

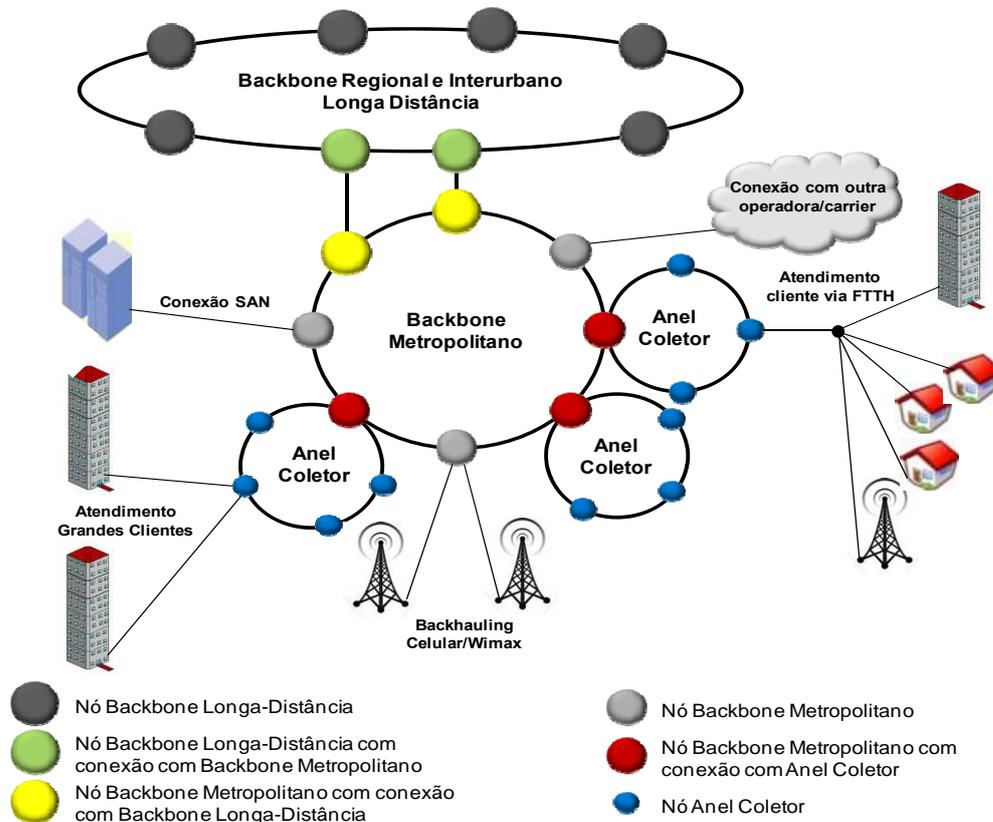


Figura 34 - Visão geral das redes metropolitanas ilustrando suas conexões e diversidades de atendimentos.

O aumento do consumo de banda no acesso impulsionado pelas novas aplicações, sobretudo aplicações de vídeo sob demanda e IPTV, leva a necessidade de armazenamento do conteúdo nas redes metropolitanas, mais próximo dos usuários. Esse aumento do consumo de banda é também dado pelo aumento do acesso a conteúdos sob demanda, individualizados, e não mais conteúdo apenas *broadcast*, como oferecido até então. Essa mudança de perfil de consumo introduz, além da necessidade de capacidade, necessidade também de uma rede mais dinâmica, ou seja, uma rede que possa ser reconfigurada e expandida com facilidade e rapidez. Além do suporte ao tráfego demandado pelos usuários residenciais e comerciais, as redes metropolitanas atuam também provendo conexão a grandes clientes corporativos, servindo de base para *backhauling* de telefonia celular, conectando clientes com demanda de armazenamento de dados e servindo como infraestrutura de transporte de tráfego de redes de outras operadoras ou *carriers*, entre outras aplicações. A Figura 34 anterior também mostra algumas dessas aplicações. Além desse requisito de servir como infraestrutura de transporte de elevada capacidade para conexão de distintos tipos de clientes com as mais diversas aplicações, há também a grande preocupação com os custos, pelo fato dessa rede estar próxima ao usuário final e pelo fato das redes metropolitanas estarem localizadas em áreas urbanizadas, implicando em dificuldade para lançamento de novas fibras e de uso de dutos existentes. Pode-se concluir então que o dimensionamento de uma rede óptica metropolitana exige bastante critério na escolha da solução tecnológica ideal. Essa escolha deve considerar diversos fatores tais como a flexibilidade, a capacidade, a facilidade de operação, robustez de transmissão, os mecanismos de proteção e o custo da rede.

Esse capítulo faz um levantamento das opções de solução disponíveis para uso em ambiente metropolitano considerando os fatores acima com especial destaque para o uso de soluções baseadas em OTN e ROADM, pelos motivos detalhados também ao longo desse capítulo. Antes desse levantamento é prospectada a capacidade requerida nessas redes e ao final é feito um comparativo dos investimentos de capital (Capex) e do custo total de posse da rede (TCO) associados a algumas arquiteturas visando a, assim como no caso da análise feita para as redes de acesso GPON, construir uma rede com capacidade que possa

atender às demandas atuais, mas que esteja preparada para atender às demandas projetadas.

4.1

Levantamento de Capacidade Requerida pela Rede Metropolitana

Para a prospecção da capacidade requerida pelas redes ópticas metropolitanas será considerada uma rede localizada em um grande centro urbano, com potencial para atender a distintas aplicações, como as mostradas na Figura 34. A prospecção de capacidade considerará então as aplicações e premissas abaixo descritas nos dois próximos subitens.

4.1.1

Banda larga FTTX utilizando rede GPON

Será considerada a arquitetura GPON descrita na seção 3.4.4 do presente trabalho, capaz de entregar uma banda máxima de 72 Mbps por usuário com capacidade de evoluir para rede XG-PON com banda de 288 Mbps por usuário. As demais premissas consideradas estão dispostas na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 - Premissa para prospecção de banda requerida pela rede metropolitana para atendimento a serviços banda larga com FTTH.

Quantidade total de usuários FTTX	10.000
Quantidade de usuários por rede FTTH	32
Banda consumida por canal SDTV [Mbps]	2
Banda consumida por canal HDTV [Mbps]	12
Quantidade de canais SDTV disponíveis	100
Quantidade de canais HDTV disponíveis	30

Considerou-se 5 cenários de consumo de banda tendo como variáveis a banda máxima oferecida por usuário, a banda máxima garantida (como porcentagem da banda máxima), o tipo de serviço de vídeo oferecido (*Broadcast* ou VoD), e a quantidade de televisores com canais em definição standard (SDTV) e alta definição (HDTV) em cada residência ou estabelecimento comercial. Uma vez que a banda é compartilhada por vários usuários não só no acesso mas

também em outros pontos da rede, a banda disponível aos usuários não será necessariamente a banda máxima, mas sim uma porcentagem dela, uma banda garantida pelo provedor do serviço e que poderá ser maior dependendo da quantidade de usuários solicitando banda e do serviço acessado por cada um deles. Para cada um dos cenários alterou-se uma das variáveis, como mostrado na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7 - Cenários considerados na análise.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Banda máxima por usuário [Mbps]	72	72	72	72	288
Banda garantida [% da Banda máxima]	10%	10%	40%	40%	40%
Tipo de serviço de vídeo	Broadcast	VoD	VoD	VoD	VoD
Quantidade de aparelhos televisores com SDTV por residência	2	2	2	1	1
Quantidade de aparelhos televisores com HDTV por residência	1	1	1	2	2

Como mostrado e ressaltado em negrito, a partir do cenário 2 o vídeo deixa de ser *broadcast* e passa a ser VoD. A partir do cenário 3 a banda garantida passa a corresponder a 40% da banda máxima, ao invés dos 10% considerados nos cenários 1 e 2. A partir do cenário 4 a quantidade de televisores com HDTV passa a ser 2 e a de televisores com SDTV passa a ser 1 ao invés de 1 e 2 respectivamente como ocorreu nos cenários 1 a 3. No cenário 5 quadruplica-se a banda máxima por usuário, com uso de XG-PON1.

Com esses cenários calculou-se então a banda consumida com vídeo para cada usuário, a banda consumida com vídeo em cada rede FTTH, a banda máxima consumida em outras aplicações via internet, a banda garantida para as outras aplicações via internet, a banda requerida na rede metropolitana para transporte de tráfego devido a serviços de internet, devido ao vídeo e a banda total. Os resultados estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Banda total requerida na rede metropolitana para cada cenário.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Banda consumida com vídeo por usuário [Mbps]	16	16	16	26	26
Banda consumida com vídeo em cada rede FTTH [Mbps]	560	512	512	832	832
Banda máxima para outras aplicações na internet por usuário [Mbps]	55	56	56	46	262
Banda garantida para outras aplicações na internet por usuário [Mbps]	5	6	22	18	105
Banda requerida na rede metro para transporte de internet [Mbps]	54.500	56.000	224.000	184.000	1.048.000
Banda requerida na rede metro para transporte de vídeo [Mbps]	560	160.000	160.000	260.000	260.000
Banda total requerida na rede metro [Gbps]	55	216	384	444	1.308

Para os cálculos considerou-se a seguinte nomenclatura:

- Premissas:

Q_{TOTAL_FTTX} = Quantidade total de usuários FTTX

Q_{REDE_FTTH} = Quantidade de usuários por rede FTTH

B_{CONS_SDTV} = Banda consumida por canal SDTV [Mbps]

B_{CONS_HDTV} = Banda consumida por canal HDTV [Mbps]

Q_{CANAIS_SDTV} = Quantidade de canais SDTV disponíveis

Q_{CANAIS_HDTV} = Quantidade de canais HDTV disponíveis

- Variáveis:

B_{MAX} = Banda máxima por usuário [Mbps]

B_{GARANT} = Banda garantida [% da Banda máxima]

Q_{TELE_SDTV} = Quantidade de aparelhos televisores com SDTV por residência

Q_{TELE_HDTV} = Quantidade de aparelhos televisores com HDTV por residência

- Resultados:

$B_{CONS_VIDEO_USUARIO}$ = Banda consumida com vídeo por usuário [Mbps]

$B_{CONS_VIDEO_REDEFTH}$ = Banda consumida com vídeo em cada rede FTTH [Mbps]

$B_{MAX_OUTRASAPLIC}$ = Banda máxima para outras aplicações na internet por usuário [Mbps]

$B_{GAR_OUTRASAPLIC}$ = Banda garantida para outras aplicações na internet por usuário [Mbps]

$B_{REDEMETRO_INTERNET}$ = Banda requerida na rede metro para transporte de internet [Mbps]

$B_{REDEMETRO_VIDEO}$ = Banda requerida na rede metro para transporte de vídeo [Mbps]

$B_{REDEMETRO_TOTAL}$ = Banda total requerida na rede metro [Gbps]

Uma vez definidas as nomenclaturas, detalha-se a seguir a metodologia de cálculo de cada um dos resultados obtidos.

A banda consumida com vídeo por usuário é calculada da mesma maneira para qualquer cenário e é dada por:

$$B_{\text{CONS_VIDEO_USUARIO}} = (B_{\text{CONS_SDTV}} \times Q_{\text{TELE_SDTV}}) + (B_{\text{CONS_HDTV}} \times Q_{\text{TELE_HDTV}})$$

A banda consumida com vídeo em cada rede FTTH é calculada da seguinte maneira, para o caso de vídeo broadcast (cenário 1), já que o mesmo conteúdo é enviado a todos na rede e selecionado por cada usuário dentro da grade disponível e única:

$$B_{\text{CONS_VIDEO_REDEFTH}} = (B_{\text{CONS_SDTV}} \times Q_{\text{CANAIS_SDTV}}) + (B_{\text{CONS_HDTV}} \times Q_{\text{CANAIS_HDTV}})$$

Já para o caso de VoD (cenários 2 a 5) o conteúdo é individualizado e pode ser distinto para cada usuário. Pensando no pior caso, ou seja, nenhum conteúdo comum a nenhum usuário, obtém-se:

$$B_{\text{CONS_VIDEO_REDEFTH}} = Q_{\text{REDE_FTTX}} \times [(B_{\text{CONS_SDTV}} \times Q_{\text{TELE_SDTV}}) + (B_{\text{CONS_HDTV}} \times Q_{\text{TELE_HDTV}})]$$

ou

$$B_{\text{CONS_VIDEO_REDEFTH}} = Q_{\text{REDE_FTTX}} \times B_{\text{CONS_VIDEO_USUARIO}}$$

A banda máxima para outras aplicações na internet por usuário será da por:

$$B_{\text{MAX_OUTRASAPLIC}} = B_{\text{MAX}} - (B_{\text{CONS_VIDEO_REDEFTH}} / Q_{\text{REDE_FTTX}})$$

A banda garantida para outras aplicações na internet por usuário será da por:

$$B_{\text{GAR_OUTRASAPLIC}} = B_{\text{MAX_OUTRASAPLIC}} \times B_{\text{GARANT}}$$

Com esse resultado pode-se calcular a banda requerida na rede metro para transporte de internet:

$$B_{REDEMETRO_INTERNET} = B_{GAR_OUTRASAPLIC} \times Q_{TOTAL_FTTX}$$

A banda requerida na rede metro para transporte de vídeo é igual a banda consumida com vídeo em cada rede FTTH no caso do cenário 1, pelo fato de adotar-se *broadcast*:

$$B_{REDEMETRO_VIDEO} = B_{CONS_VIDEO_REDEFTTH}$$

Para os demais cenários a banda requerida na rede metro para transporte de vídeo é dada por:

$$B_{REDEMETRO_VIDEO} = Q_{TOTAL_FTTX} \times [(B_{CONS_SDTV} \times Q_{TELE_SDTV}) + (B_{CONS_HDTV} \times Q_{TELE_HDTV})]$$

ou

$$B_{REDEMETRO_VIDEO} = Q_{TOTAL_FTTX} \times B_{CONS_VIDEO_USUARIO}$$

Finalmente calcula-se a banda total requerida na rede metro:

$$B_{REDEMETRO_TOTAL} = B_{REDEMETRO_VIDEO} + B_{REDEMETRO_INTERNET}$$

Os cenários foram projetados considerando-se uma série de premissas e variáveis que, dependendo de outras hipóteses assumidas se obteriam resultados de banda requerida total na rede metro diferente. O tipo de codificação utilizada para os sinais SDTV e HDTV, a consideração de que 3 televisores estão em uso simultaneamente e no caso do VoD acessando conteúdos distintos entre si e distintos entre todos os usuários atendidos pela rede metropolitana, além da própria banda disponível por usuário com uso da rede GPON, todos esses fatores implicam em variações na banda utilizada e impactam na banda requerida pela rede metropolitana. Por outro lado, embora prospectados, são cenários desejáveis, situações que, uma vez disponibilizadas pelos operadores de telecomunicações e provedores de serviços aos usuários, teriam aceitação, obviamente desde que o

preço não seja proibitivo. A disponibilização de VoD e banda garantida superior a 10% além de bandas máximas que superem os 200 Mbps são cenários que alavancariam as diversas aplicações descritas na seção 2, como vídeo conferência e vídeo vigilância residencial, compartilhamento de arquivos e vídeo, jogos multiusuários e ensino interativo a distância, compartilhamento de arquivos e vídeo com CDN-P2P, *host* de aplicações e televisão 3D de próxima geração.

4.1.2

Conexão para grandes clientes corporativos, SAN (*Storage Area Network*), conexão com outras operadoras e *carriers* e *backhauling* celular

O atendimento a usuário com GPON e disponibilização de banda mais elevada com serviço de VoD implica em se ter nas redes metropolitanas uma capacidade bastante relevante, mesmo considerando o cenário 1, com banda requerida superior a 50 Gbps, chegando a mais de 1 Tbps no cenário 5, para as premissas consideradas. Entretanto, as redes metropolitanas devem ser compartilhadas para outras aplicações, como forma de maximizar seu uso e diluir os investimentos do operador de telecomunicações. A Figura 34 mostrou algumas outras aplicações, como atendimento a grandes clientes, conexão tipo SAN e conexão para *backhauling* celular.

No caso de atendimento a grandes clientes, verifica-se atualmente a demanda cada vez maior por conexões em alta velocidade para conexão tipo LAN to LAN entre dois escritórios ou entre filial e matriz localizados na mesma região metropolitana ou em regiões geográficas atendidas por redes distintas, fazendo uso nesse caso também da rede interurbana de longa distância. Outra aplicação é a conexão IP de alta velocidade, havendo a necessidade de conexão do cliente a um ponto da rede metropolitana que tenha saída para a rede *internet*. Para esse tipo de aplicação a demanda é por circuitos dedicados Gigabit Ethernet ou 10 Gigabit Ethernet, com alta disponibilidade. A demanda por circuitos de voz e troncos E1 baseado em TDM é cada vez menor, embora ainda existam como legado.

Organizações de todos os tamanhos estão cada vez mais dependentes da disponibilidade de seus sistemas de tecnologia da informação, algumas até fixando os objetivos de disponibilidade em cinco noventa e nove (99,999%). A essa

dependência soma-se a preocupação com desastres, naturais ou não, como o de onze de setembro de 2001 nos Estados Unidos. Assim, verifica-se a necessidade de conexões para replicação de base de dados ou armazenamento remoto de informação, como forma de prevenção para recuperação de desastres, utilizando como alternativa para isso arquitetura de armazenamento dedicada chamada SAN. A Associação das Indústrias de Rede de Armazenamento (SNIA - *Storage Network Industry Association*) define a SAN como uma rede especializada de alta velocidade cujo principal propósito é transferir dados entre sistemas de computadores, como servidores, e elementos de armazenamento. Uma rede SAN é formada por uma infraestrutura de comunicações que provê conexões físicas e uma camada de gerenciamento, que organiza as conexões, os elementos de armazenamento, e os sistemas de computadores de maneira que os dados sejam transferidos de forma segura. Assim como no caso de circuitos *ethernet* de alta velocidade para atendimento a grandes clientes, nesse caso também haverá necessidade de conexão entre dois sites do cliente (configuração *Server to Server*), entre um site do cliente e uma empresa especializada em serviços de armazenamento de dados (configuração *Server to Storage*) e também pode existir a demanda de conexão entre dois sites especializados em armazenamento (configuração *Storage to Storage*), podendo os dois ou mais sites estar localizados na mesma rede metropolitana ou estar em localizações geográfica distintas, também nesse caso sendo necessária a conexão através da rede interurbana de longa distância. A particularidade desse tipo de aplicação é com relação aos protocolos utilizados e a maior sensibilidade com relação aos atrasos de propagação pela rede. Os protocolos mais utilizados são o *Fiber Channel*, protocolo de transporte aprovado pela *American National Standards Institute* (ANSI), e o FICON (*Fiber Connection*), funcionalmente similar ao *Fiber Channel*, mas padronizado pela IBM. No caso do *Fiber Channel*, estão padronizados o 1GFC, 2GFC, 4GFC, 8GFC, 10GFC, 16GFC e o 20GFC, com taxa de transmissão de 1 Gbps até 20 Gbps.

As redes metropolitanas também podem servir como infraestrutura para conexão de circuitos de outros operadores e *carriers*. Em segmentos de rede onde determinada operadora ou *carrier* não tem infraestrutura própria é comum a negociação com troca de capacidade ou mesmo aquisição de capacidade em rede de terceiro. Essa capacidade pode exceder múltiplos Gigabit Ethernet, sendo

possível a negociação para o estabelecimento de conexão com comprimentos de onda dedicados em redes WDM com capacidade de 10 ou 40 Gbps.

Aplicação de *backhaul* para telefonia celular, com crescente demanda por banda com o advento do 3G, Wimax e LTE, também exige capacidade da rede metropolitana.

Podem-se incluir ainda aplicações de transmissão de sinais de vídeo entre as estações de captação ou *headend* e a estação de tratamento e distribuição dos sinais. Para essa transmissão utiliza-se protocolo SDI (*Serial Digital Interface*), padrão de interface de vídeo padronizado pelo SMPTE (*Society of Motion Picture and Television Engineers*). Nessa situação, ao fazer uso de múltiplos canais em definição standard e alta definição e logo alta definição 3D, respectivamente com demanda de banda de 270 Mbps com protocolo SD-SDI, 1,5 Gbps com protocolo HD-SDI e 3 Gbps com o 3G-SDI, também se exige elevada capacidade de transporte da rede metropolitana. Considerando um cenário simples com 20 canais SD-SDI, 10 canais HD-SDI e 5 canais 3D-SDI teríamos já uma banda superior a 35 Gbps.

A Figura 35 ilustra esses diversos cenários de aplicações, mostrando a demanda por capacidade, diversidade de protocolos e flexibilidade exigida das redes metropolitanas.

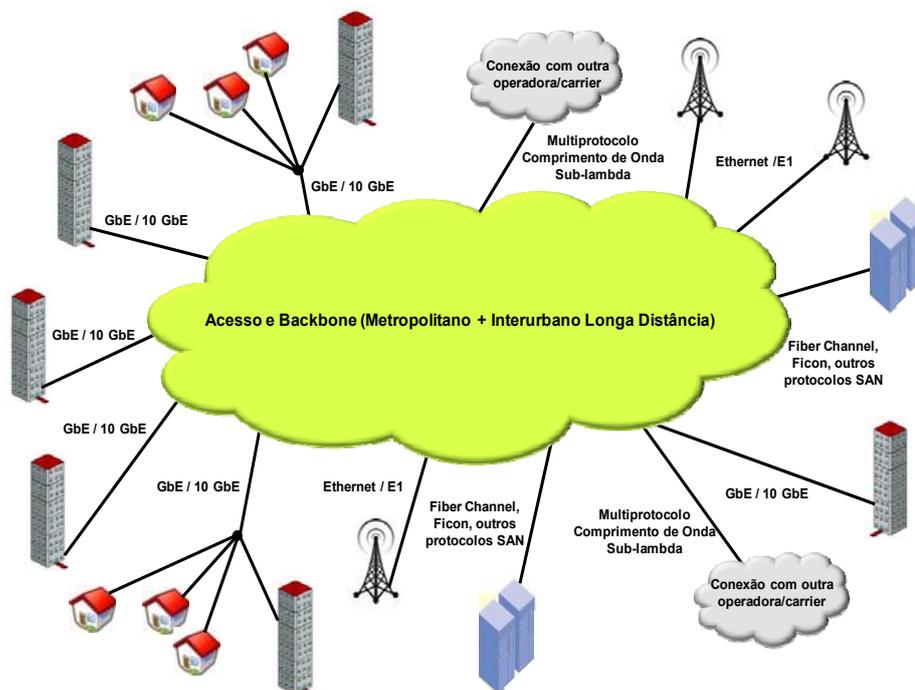


Figura 35 - Diversidade de protocolos e velocidades na agregação e capacidades de transporte exigidas das redes metropolitanas.

4.2

Opções Tecnológicas

A opção tecnológica tradicionalmente adotada para as redes metropolitanas é baseada em tecnologia SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), através da qual é possível construir redes ponto-a-ponto e em anel formadas por ADMs (*Add and Drop Multiplexers*) com elevado nível de proteção, reduzido tempo de comutação e funcionalidades avançadas de operação, administração e operação da rede. Nesse tipo de rede baseada em TDM (*Time Division Multiplexing*) utiliza-se um único comprimento de onda em 1310 nm ou em 1550 nm e taxa de transmissão de até 10 Gbps, correspondente ao padrão STM-64 da hierarquia. Está definida também a hierarquia STM-256, permitindo velocidades de 40 Gbps, embora sua utilização seja bastante reduzida. Além da escalabilidade limitada, o SDH não é o protocolo ideal para transporte de sinais ethernet, embora avanços e padronizações recentes habilitem essa possibilidade através de uso de novos protocolos que permitem a concatenação virtual dos containers que formam o quadro SDH para transporte de quadros ethernet, fast ethernet e gigabit ethernet. São os chamados SDH de nova geração. Em situações de variação rápida de consumo de banda essa adaptação propiciada pelo SDH mostra-se ineficiente, ao alocar eventualmente banda em excesso para a demanda solicitada e com pouca flexibilidade de gerenciamento. Pela concatenação realizada o SDH não tem capacidade de transporte de sinais ethernet sem compressão de banda. Adicionalmente, o SDH não prevê o suporte a outros protocolos como protocolos específicos SAN e de vídeo. Seu custo também é elevado quando comparado a outras tecnologias de transporte, resumidas a seguir.

Outra opção é o uso de redes *metro ethernet*. Com esse tipo de rede utiliza-se a tecnologia *carrier ethernet* no ambiente metropolitano MAN (*Metropolitan Area Networks*) permitindo o acesso a internet a usuários diversos e a conexão entre as redes locais LAN (*Local Area Networks*) de empresas e outros clientes. Sua topologia pode ser bem variada, como anel, estrela, malha ou ponto-a-ponto, podendo ser implementada como *ethernet* pura, *ethernet* sobre SDH, conforme descrito acima, ou *ethernet* sobre MPLS (*Multiprotocol Label Switching*). A primeira opção é a de menor custo, embora tenha engenharia de tráfego bastante limitada, pouca escalabilidade no sentido de aumento do tamanho da rede e

elevado tempo para recuperação em caso de falhas. A segunda opção sofre com as desvantagens apontadas no parágrafo anterior. A terceira opção permite maior escalabilidade, resiliência ao adotar mecanismos como MPLS *Fast Reroute*, que permite tempos de convergência similares aos do SDH, suporte a protocolos legados e OAM (*Operation, Administration and Maintenance*) fim a fim utilizando EOAM (*Ethernet Operation, Administration and Maintenance*). Com relação às velocidades de linha padronizadas pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), já está em uso o ethernet (10 Mbps), o fast-ethernet (100 Mbps), o gigabit ethernet ou GbE (1 Gbps), o 10 GbE (10 Gbps), o 40 GbE (40 Gbps) e o 100 GbE (100 Gbps). Essa é a opção de custo mais elevado e mesmo assim não garante a capacidade e a transparência requerida por uma rede *backbone* metropolitana.

Alguns operadores de telecomunicações tem apostado em sistemas de transporte óptico baseados em pacotes P-OTS (*Packet-Optical Transport System*), tecnologia recente que combina em mesmo equipamento a transmissão óptica com multiplexação e agregação ethernet e TDM, utilizando uma matriz estatística com comutação de pacote orientado a conexão. Com essa alternativa, é possível suportar SDH e ethernet em camada 2, de forma simultânea, adaptando-se assim a diversos tipos de tráfegos. O importante apelo em termos de implementação de protocolo é o uso de MPLS-TP (*Transport Profile*), que adiciona mecanismos para suportar funções críticas requeridas no transporte, garantindo qualidade de serviço, OAM fim a fim e comutação de proteção. O objetivo de tal implementação é ter uma plataforma tecnológica de agregação, transmissão e roteamento que combine a qualidade de serviço e elevado nível de gerenciamento garantido pelos sistemas SDH ao custo e flexibilidade para suporte a crescente demanda de tráfego de dados propiciada pelo uso de protocolo ethernet. Ainda há muito debate sobre o uso massivo dessa tecnologia, principalmente na parte central das redes. Alguns operadores tem optado apenas pelo uso no acesso formando pequenos anéis em 1 GbE ou 10 GbE, enquanto outros tem optado por manter o *switching* de dados em switches e roteadores, utilizando sistema WDM para prover a capacidade e transparência requerida pelos *backbones* metropolitanos.

Com o advento do WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) incorporando facilidades de reconfiguração de comprimentos de onda na rede com

o uso de ROADM (*Reconfigurable Add-Drop Multiplexer*) e funcionalidades trazidas pela OTN (*Optical Transport Network*) tornou-se possível introduzir elevada flexibilidade para suporte as novas demandas das redes, além da multiplicação da capacidade de transmissão da rede e da fibra, com otimização do uso das fibras já instaladas. Além de permitir elevada capacidade e flexibilidade, a combinação de WDM com ROADM e OTN garante uma rede de transporte capaz de lidar com múltiplos protocolos, possibilitando a agregação e multiplexação de tráfego de baixa hierarquia, mantendo o suporte ao tráfego legado TDM e introduzindo avançadas funcionalidades de proteção, restauração de tráfego, operação, administração e manutenção da rede.

Importante apelo para o uso desse tipo de solução é a possibilidade de convivência com todas as tecnologias descritas acima como opções de redes metropolitanas, além de suportar diversos outros protocolos, com o WDM atuando como camada de transporte para esses diversos clientes. Assim, a arquitetura proposta nesse estudo atuará próxima ao meio físico, suportando grande diversidade de clientes, com elevada capacidade e transparência, ao mesmo tempo em que terá avançadas funcionalidades de OAM garantidas pelo uso de OTN além da flexibilidade na alocação de tráfego garantida pelo uso de ROADM, quando este é utilizado.

A tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é a tecnologia que permite a multiplexação de diversas portadoras ópticas em uma única fibra óptica, utilizando para isso diversos comprimentos de onda, cores da luz ou lambdas, sendo similar ao FDM (*Frequency Division Multiplexing*), mas aplicado ao meio óptico. Em um sistema WDM tem-se uma unidade de multiplexação na transmissão e uma unidade de demultiplexação na recepção, permitindo o transporte de um conjunto de sinais de um ponto para outro. A Figura 36 abaixo representa de forma genérica um sistema de transmissão entre dois pontos utilizando a tecnologia WDM com capacidade de n comprimentos de onda (lambdas), destacando as unidades de multiplexação e demultiplexação, indicadas como Mux e Demux respectivamente.

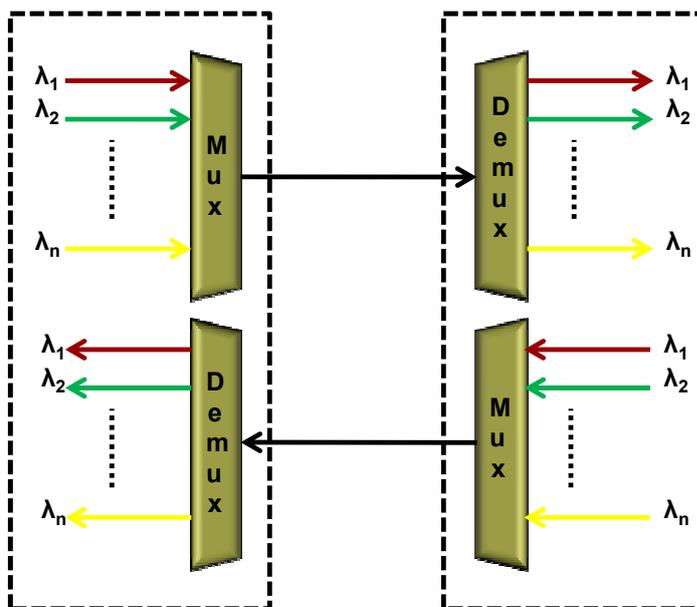


Figura 36 - Sistema de transmissão WDM genérico.

Dois opções de sistemas WDM estão disponíveis. A primeira delas é o CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) na qual se utiliza a região do espectro de transmissão desde 1270 nm até 1610 nm para a transmissão das portadoras ópticas. Padronizado pela recomendação ITU-T G.694.2 e G.695, o CWDM habilita a transmissão de até 18 lambdas com espaçamento entre canais de 20 nm. O fato de trabalhar com largo espectro de transmissão proíbe o uso de amplificadores ópticos, limitando a distância atingida. Acrescenta-se a isso o fato de utilizar a região de 1310 nm para a transmissão, região de maior atenuação, além da região de 1390 nm, região do pico d'água, característica intrínseca ao processo de fabricação das fibras ópticas que faz com que sinais propagados nessa região tenham maior atenuação. Fibras mais novas que seguem a padronização ITU-T G.652.C e G.652.D eliminam esse pico d'água, mas não deixam de ter maior atenuação na região de 1310 nm. Assim, pelo fato de não permitir o uso de amplificação óptica, e pelo fato de permitir pouca quantidade de canais, o uso de CWDM está restrito, de forma geral, a aplicações de redes de acesso. A segunda opção é o DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) na qual se utiliza apenas a terceira janela de transmissão, mais especificamente as bandas C (1530 nm a 1565 nm aproximadamente) e L (1565 nm a 1625 nm aproximadamente) para a transmissão das portadoras ópticas. Nessas regiões é possível utilizar amplificadores ópticos tipo EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*) e também

tipo *Raman*, as duas tecnologias de amplificação óptica mais utilizadas nos sistemas DWDM das redes de transmissão dos operadores de telecomunicações, amplificando de forma simultânea e sem conversão ao meio elétrico todos os canais presentes em um determinado sistema DWDM. O espaçamento entre canais utilizado pode ser de 200 GHz (1,6 nm), 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm) ou 25 GHz (0,2 nm). Espaçamentos ainda menores, como 12,5 GHz, também estão tecnologicamente disponíveis, mas na prática os *backbones* são construídos com espaçamento de 50 GHz ou 100 GHz, permitindo respectivamente 80 ou 40 canais em cada uma das bandas C e L. Considerando que atualmente as interfaces ópticas já podem operar em 100 Gbps por comprimento de onda, pode-se chegar a uma capacidade de 16 Tbps em uma única fibra, considerando 80 canais na banda C e 80 canais na banda L.

A Figura 37 que segue ilustra a alocação dos canais CWDM e DWDM, destacando a região de operação dos amplificadores EDFA, a atenuação na fibra e as bandas do espectro.

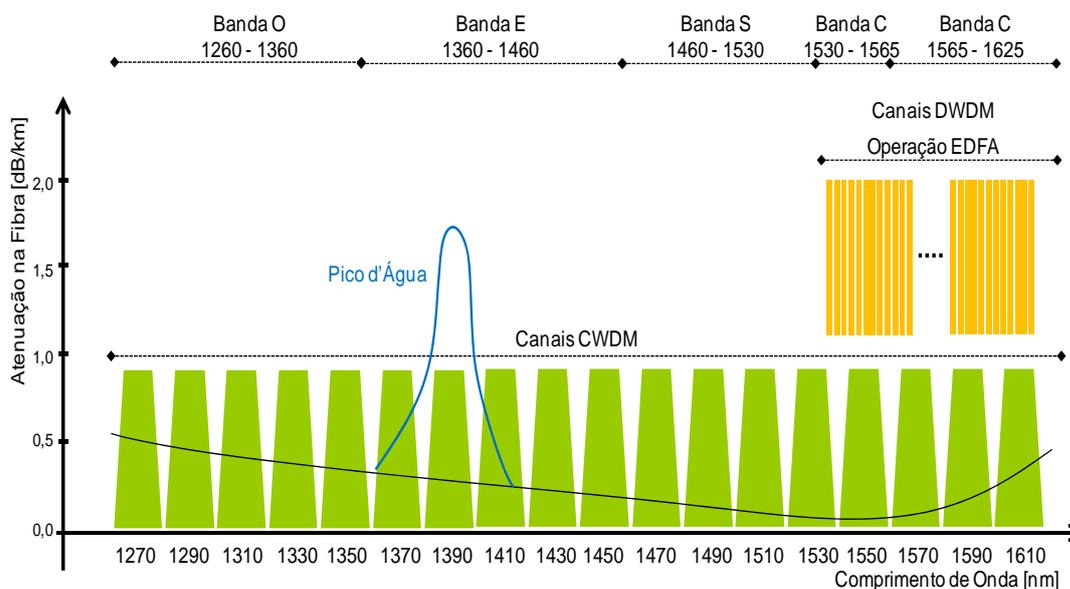


Figura 37 - Alocação de canais CWDM e DWDM.

Por sua capacidade de transmissão e alcance, ao permitir o uso de amplificadores ópticos, sistemas DWDM são utilizados na maioria das aplicações. Pelo maior volume de utilização, seu preço foi bastante reduzido, equiparando-se ao preço dos sistemas CWDM, o que restringiu ainda mais o uso de sistemas baseado nessa tecnologia. O foco dessa parte do trabalho, que como visto

demanda elevada capacidade de transporte, será então em sistemas DWDM, cujos principais elementos são:

- *Transponder* conversor de comprimento de onda

Principal elemento de um sistema DWDM. Na transmissão é responsável por receber o sinal proveniente do equipamento cliente (por exemplo, SDH, Roteador Ethernet, P-OTS) realizando a translação do comprimento de onda, recebido em qualquer janela de transmissão (850 nm, 1310 nm, 1550 nm ou mesmo dentro das grades CWDM ou DWDM), para a grade de transmissão DWDM, padronizada pela recomendação ITU-T G.694.1. Na recepção faz o processo inverso. Comumente as duas funções, transmissão e recepção, são feitas na mesma unidade. Pode incorporar funcionalidade de multiplexação e demultiplexação elétrica, fazendo *grooming* de tráfego de menor capacidade, podendo inclusive fazer agregação em camada 2, ou funcionar de forma transparente. Pode atuar ainda como unidade de regeneração elétrica, em enlaces de longa distância onde se faz necessária a re-formatação e re-temporização do sinal. Pode implementar as funcionalidades OTN (*Optical Transport Network*), detalhadas mais a frente por sua importância no cenário de transporte óptico.

- Multiplexador e Demultiplexador Óptico

O multiplexador óptico recebe diversos sinais provenientes dos *transponders*, cada um em um comprimento de onda distinto seguindo uma grade padronizada pelo ITU-T e em quantidade que dependa da capacidade para o qual o sistema foi dimensionado, e os multiplexa transmitindo-os em única fibra. O demultiplexador óptico faz o processo inverso, recebendo os sinais multiplexados em única fibra e transmitindo-os aos *transponders*, após separação de cada sinal. Funcionam de forma passiva sem realização de conversão óptico-elétrica. Podem incorporar funcionalidades de controle de nível de potência individual de cada canal, contribuindo com a automatização e operação do sistema.

- OADM e ROADM

Unidades que realizam a inserção e derivação de canais ópticos em estações intermediárias (*Optical Add-Drop Multiplexer*), sem necessidade de demultiplexação e multiplexação de todos os canais. O OADM funciona de forma passiva atuando em uma sub-banda fixa da banda que está sendo utilizada para a transmissão. Tem o benefício do reduzido custo, mas o fato de operar com banda fixa o deixa muito inflexível e inadequado para as novas redes metropolitanas. O ROADM, em que o R significa reconfigurável, é a opção mais adequada e será detalhada mais a frente. Com essa tecnologia é possível trabalhar com toda a banda e selecionar os canais individualmente a serem derivados e inseridos em cada estação, introduzindo a flexibilidade necessária a escalabilidade e operação da rede.

- Amplificadores Ópticos

Os mais utilizados são os baseados em tecnologia EDFA, que utilizam fibra dopada com íons de érbio e laser de bombeio em comprimento de onda específico para o efeito de amplificação. Podem atuar como amplificadores de potência, chamados boosters, localizados na transmissão do sistema juntos aos multiplexadores ópticos, OADMs e ROADMs, podem atuar como pré-amplificadores, localizados na recepção juntos aos demultiplexadores, OADMs e ROADMs, ou ainda como amplificadores de linha, localizados em enlaces intermediários em sistemas de longa distância. Outro tipo de amplificador utilizado, nesse caso utilizado especificamente em enlaces de longa distância, é baseado em tecnologia Raman. Esse tipo de amplificador pode ser utilizado na recepção, forma mais comum, ou na transmissão, e utiliza a própria fibra do sistema, no caso do amplificador com ganho distribuído, para dar ganho nos sinais que estão sendo transmitidos. Nessa configuração distribuída, a mais comum, um sinal de alta potência e comprimento de onda adequado é injetado na fibra e sua energia, pelo efeito Raman, é transferida para a região de interesse de propagação dos canais, em 1550 nm. O uso dos amplificadores ópticos e a determinação dos tipos a serem utilizados dependem do dimensionamento do sistema. Nesse

dimensionamento, que determinará também os pontos de regeneração óptico-elétrico-óptico do sistema, são considerados diversos fatores, destacadamente as características das fibras (atenuação, dispersão cromática e dispersão de modo de polarização (PMD)), as perdas em emendas e distribuidores ópticos, a margem de segurança de operação sistêmica, a quantidade de canais, a taxa de transmissão máxima por canal (10 Gbps, 40 Gbps, 100 Gbps), além das características dos *transponders* (potência de transmissão mínima, sensibilidade, limites de dispersão cromática e de PMD, relação sinal ruído (OSNR) mínima, tipo de modulação) e dos próprios amplificadores (potência de transmissão, nível mínimo de potência na entrada, figura de ruído).

- Compensadores de Dispersão

Utilizados em enlaces de distâncias mais elevadas quando os valores de dispersão da fibra superam os valores tolerados pelos *transponders*. A compensação mais comum é a compensação de dispersão cromática. Podem funcionar compensando todos os canais simultaneamente ou atuando sobre cada canal individualmente. Utiliza tecnologia baseada em fibra compensadora de dispersão (DCF – *Dispersion Compensating Fiber*) ou grade de Bragg. No caso da compensação de dispersão de PMD, a atuação é sempre feita por canal.

- Canal Óptico de Supervisão

Trata-se de canal em comprimento de onda fora da banda de amplificação utilizado para transmitir as informações de gerenciamento do sistema entre todas as estações que compõem o sistema de transmissão. É inserido e retirado do sistema através de um elemento multiplexador/demultiplexador de canal óptico de supervisão. Diferente dos sinais que trafegam dados de clientes, o canal óptico de supervisão é terminado em todas as estações, inclusive nas OADM ou ROADM e de amplificação de linha, de forma a coletar as informações de gerenciamento também desses elementos. Com sua utilização tem-se as informações de gerência de todos os elementos de todas as estações disponíveis em qualquer estação, possibilitando a conexão com a rede de comunicação de dados da operadora a

partir de qualquer estação, de forma a ter todo o sistema supervisionado a partir do centro de gerenciamento centralizado.

A Figura 38 ilustra a configuração de um sistema DWDM com 4 estações (A, B, C e D) formado por 2 estações terminais (A e D), uma estação de amplificação (B) e uma estação OADM/ROADM, detalhando os elementos que o compõe e a conexão entre eles:

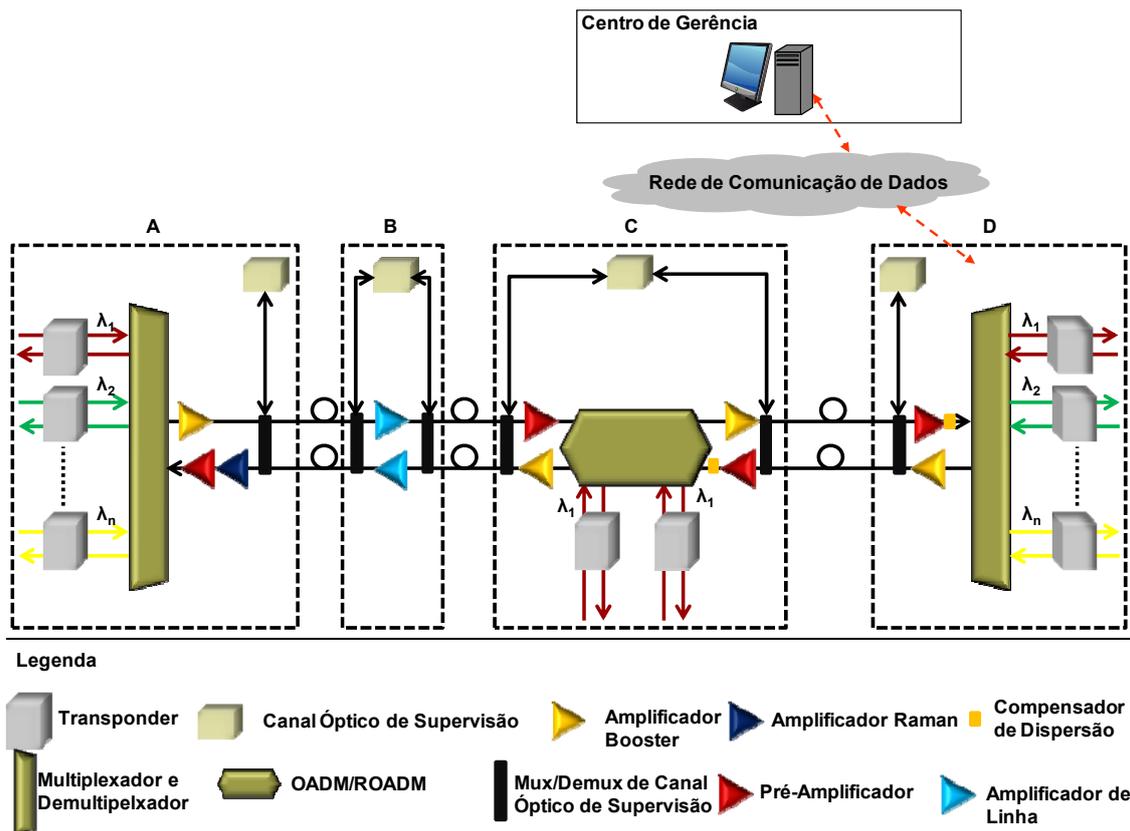


Figura 38 - Diagrama de um sistema de transmissão DWDM genérico mostrando seus elementos principais e a conexão entre eles.

4.2.1

OTN

Com o amadurecimento da tecnologia WDM, o forte aumento no tráfego nas redes de telecomunicações principalmente pela intensificação do uso da internet com necessidade de banda cada vez maior no acesso e o surgimento de novas tecnologias, passou a ser fundamental melhor gerenciar os serviços transmitidos através dos comprimentos de onda dos sistemas WDM. Dessa

maneira, o ITU-T através do SG15 iniciou os estudos da rede óptica de transporte nos anos 90, com o objetivo de avaliar quais seriam os requisitos necessários para a evolução dos sistemas de transmissão ópticos. Esse estudo culminou então com a publicação entre os anos de 2001 e 2003 das recomendações associadas ao OTN (*Optical Transport Network*), dentre elas a G.709, principal recomendação associada ao OTN.

A Figura 39 mostra a evolução cronológica dos padrões de transmissão, como mostrado em “*The Operator’s View of OTN Evolution*”, desde o PDH chegando ao WDM com OTN, habilitados principalmente pelo uso das fibras e dos amplificadores ópticos:

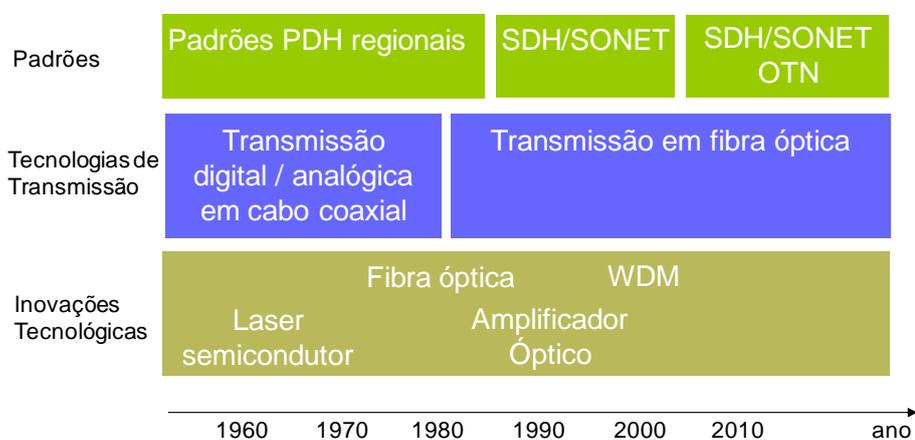


Figura 39 - Evolução nos padrões e tecnologias para as redes de transporte.

4.2.1.1

Descrição da OTN

Várias são as recomendações ITU-T que abordam aspectos relacionados à OTN. A G.872 - Arquitetura das Redes Ópticas de Transporte - tem como escopo a descrição da arquitetura funcional da rede óptica de transporte utilizando a metodologia descrita na recomendação ITU-T G.805, que leva em consideração a estrutura de rede óptica em camadas, a informação do sinal cliente, a associação entre camadas tipo cliente / servidor e a topologia de rede, provendo transmissão, multiplexação, roteamento, supervisão, melhoria de desempenho e sobrevivência da rede. A G.798 - Características dos Blocos Funcionais da Hierarquia de Equipamentos da Rede Óptica de Transporte - trata da metodologia e dos

componentes utilizados para especificar a funcionalidade da rede óptica de transporte nos elementos de rede, já incluindo suporte a 100 Gbps e mapeamento e demapeamento de diversos tipos de sinais na estrutura OTN, como STM-1 e Gigabit Ethernet. A G.959.1 - Interface da Camada Física da Rede Óptica de Transporte - descreve a interface física entre domínios (IrDI – *inter-domain interface*) da rede óptica, que pode utilizar WDM. A mais importante delas e muitas vezes até confundida com a própria OTN é a G.709, que será descrita um pouco mais em detalhes nessa seção.

A G.709 - Interfaces da Rede Óptica de Transporte - define os requisitos do módulo óptico de transporte do sinal de ordem n (OTM-n) da rede óptica de transporte em termos da hierarquia de transporte óptico (OTH), das funcionalidades do overhead para suportar redes ópticas multi-lambdas, das estruturas de quadro, das taxas de bit e em termos dos formatos para mapeamento do sinal cliente.

O início dos estudos para definir o padrão G.709 foi motivado pela necessidade de transmitir uma quantidade diversa de serviços em formato digital e de suportar a evolução das taxas de transmissão, ao mesmo tempo melhorando o desempenho da rede. A mesma recomendação também contribuiu para o início da padronização das redes totalmente ópticas. Sua estrutura em camadas, a monitoração de desempenho e outros aspectos de gerenciamento, além dos mecanismos de proteção, foram inspiradas na arquitetura do SDH/SONET. Entretanto, o OTN supera o SDH/SONET por sua capacidade de transporte, sua capacidade de gerenciamento do canal óptico em ambiente multi-lambda, pela presença de código corretor de erro tipo FEC e pela estrutura de multiplexação simplificada otimizada para transporte de informação tipo pacote e não pacote de forma transparente, embora mantenha processamento em ambiente elétrico.

4.2.1.2

Overview da Hierarquia OTN

A G.709 define diversas camadas como parte da hierarquia OTN:

- ODU: *Optical Data Unit*
- OTU: *Optical Channel Transport Unit*

- OCh/OChr: *Optical Channel*
- OMS: *Optical Multiplex Section*
- OPS: *Optical Physical Section*
- OTS: *Optical Transmission Section*

A Figura 40 ilustra a representação das camadas.

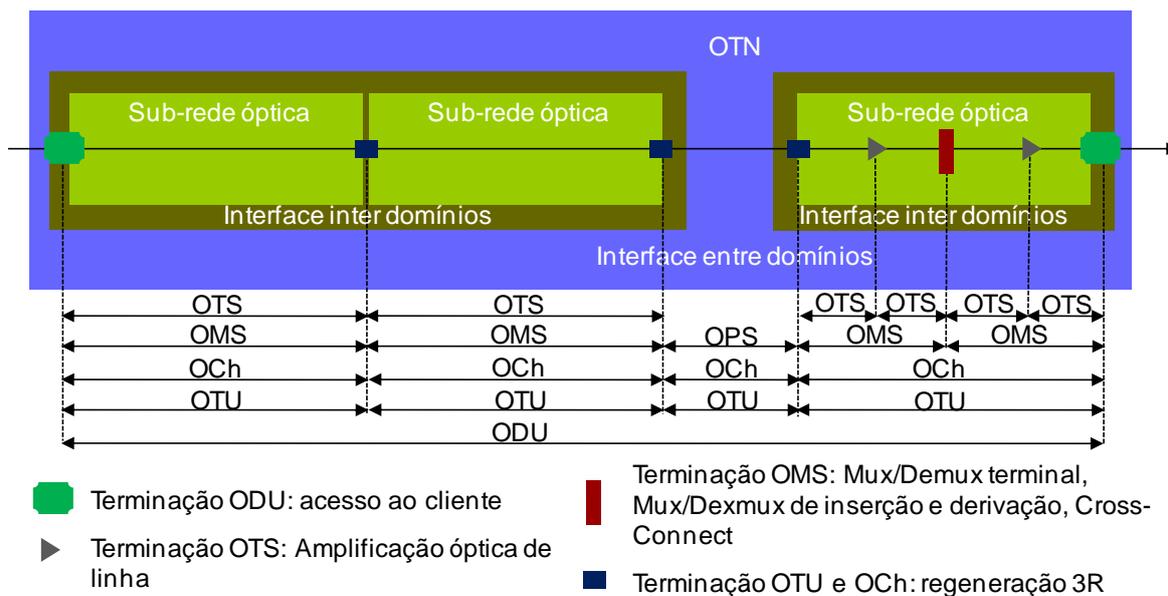


Figura 40 - Representação da estrutura de camadas.

A menor camada é a OTS que permite a transmissão OTN sobre diferentes meios e inclui parâmetros físicos da transmissão como níveis de potência, relação sinal ruído e o comprimento de onda. A OMS é responsável pela multiplexação antes da transmissão. O OCh provê o transporte do sinal cliente através de determinado comprimento de onda. Quando um único canal óptico é transmitido na fibra, o OTS e o OMS estão colapsados criando uma única camada chamada OPS. O OTU é responsável pela sincronização entre os nós 3R e correção de erro com FEC. A função principal do ODU é gerenciar o sinal em ambiente multi-domínio (conexão *tandem*) e prover os esquemas de proteção. A camada mais próxima do cliente é a OPU (*Optical Payload Unit*), não representada na Figura 40 anterior, que faz a adaptação do sinal cliente à estrutura do OTN. Simplificadamente, apenas as camadas mostradas na Figura 41 abaixo são utilizadas.



Figura 41 - Representação da estrutura de camadas simplificada.

OPUk, ODUk e OTUk pertencem ao domínio elétrico enquanto o OCh pertence ao domínio óptico. Esse domínio inclui outras camadas, não representadas aqui e pouco utilizadas. A seção 4.2.1.3 descreverá melhor as estruturas do domínio elétrico, que formam o quadro OTN.

4.2.1.3

Estrutura do Quadro

A estrutura básica do quadro OTN está mostrada na Figura 42, similar a do SDH/SONET, em que se tem cabeçalho para as funções de operação, administração e manutenção, área para os dados a serem transportados (payload) e bytes dedicados para o código corretor de erro FEC.



Figura 42 - Estrutura do quadro do canal óptico (OCh).

Na Figura 43 verifica-se mais detalhes de cada área do quadro, além de sua estrutura formada por 4 fileiras.

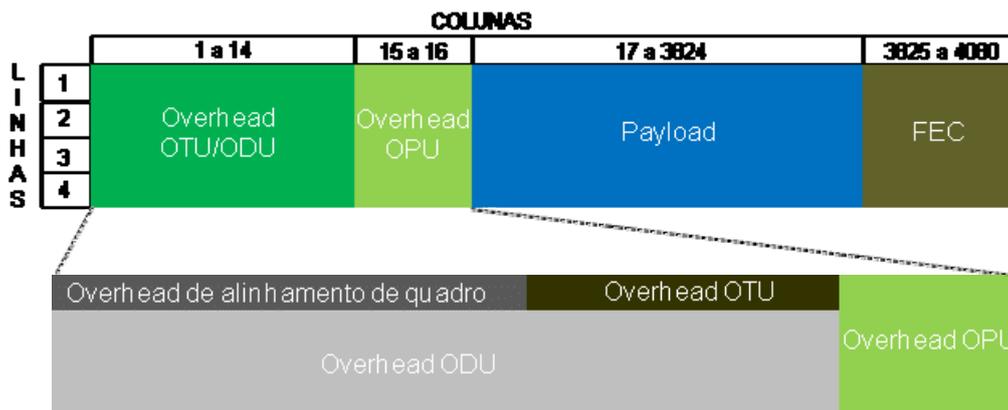


Figura 43 - Estrutura do quadro OTN detalhada.

Na Figura 43, OTU corresponde a *Optical Transport Unit*, ODU a *Optical Data Unit*, OPU a *Optical Payload Unit* e FEC a *Forward Error Correction*.

O OPU é formado pelo *payload* e pelo *overhead* de OPU. O ODU é formado pelo OPU e pelo *overhead* de ODU. O OTU é formado pelo ODU, pelo *overhead* de OTU, pelo *overhead* de alinhamento de quadro e pelo FEC.

Os 4080 *bytes* do frame são transmitidos serialmente a partir do primeiro *byte* a esquerda da primeira linha, seguindo para a segunda linha a assim por diante. Diferentemente, do SDH/SONET o tamanho do quadro é sempre o mesmo, com 4x4080 *bytes*, aumentando então a taxa de envio de frames para se obter maiores velocidades.

Abaixo as velocidades definidas pelo ITU-T G.709, excluindo as estruturas *flex*, detalhadas mais a frente:

- OTU

OTU-1: Optical Transport Unit 1 – 2.666.057,143 Kbps

OTU-2: Optical Transport Unit 2 – 10.709.225,316 Kbps

OTU-3: Optical Transport Unit 3 – 43.018.413,559 Kbps

OTU-4: Optical Transport Unit 4 – 111.809.973,568 Kbps

- ODU

ODU-0: Optical Data Unit 0 – 1.244.160 Kbps

ODU-1: Optical Data Unit 1 – 2.498.775,126 Kbps

ODU-2: Optical Data Unit 2 – 10.037.273,924 Kbps

ODU-3: Optical Data Unit 3 – 40.319.218,983 Kbps

ODU-4: Optical Data Unit 4 – 104.794.445,815 Kbps

ODU-2e: Optical Data Unit 2 *overclocked* – 10.399.525,316 Kbps

- OPU

OPU-0: Optical Payload Unit 0 – 1.238.954,310 Kbps

OPU-1: Optical Payload Unit 1 – 2.488.320,000 Kbps

OPU-2: Optical Payload Unit 2 – 9.995.276,962 Kbps

OPU-3: Optical Payload Unit 3 – 40.150.519,322 Kbps

OPU-4: Optical Payload Unit 4 – 104.355.975,330 Kbps

OPU-2e: Optical Payload Unit 2 *overclocked* – 10.356.012,658 Kbps

O *overhead* do OTU corresponde às colunas 8 a 14 da linha 1, como visto na Figura 43. É utilizado para supervisão, além de possibilitar o transporte do sinal entre os pontos de regeneração 3R (retemporização, reformatação e regeneração) na rede OTN.

O *overhead* do ODU provê monitoração de conexão tipo *tandem* (TCM – *Tandem Connection Monitoring*), supervisão do caminho fim a fim e adaptação do sinal cliente através do OPU.

O *overhead* de OPU é utilizado para prover suporte à adaptação do sinal cliente a ser transportado.

A codificação FEC utiliza codificadores e decodificadores formados por 16 bytes entrelaçados utilizando código Reed-Solomon RS(255,239) ou seja para cada 239 bytes k são calculados 16 bytes redundantes r , totalizando $n = 255$, com $m = 8$. Em seu processamento cada linha do quando OTU é separada em 16 sublinhas com o entrelaçamento de bytes mostrado na Figura 44.

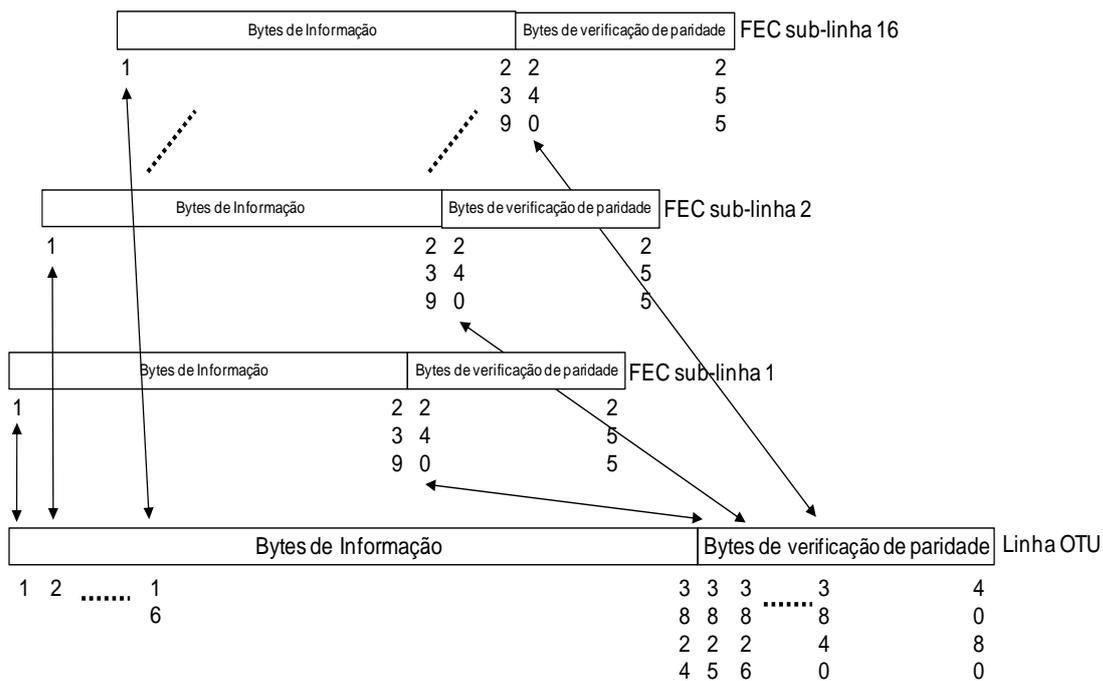


Figura 44 - Formação FEC.

Com esse tipo de código é possível corrigir até 8 erros de símbolo na palavra código do FEC quando ele é usado para correção. Quando é utilizado apenas para detecção, é possível fazer a detecção de 16 símbolos em cada palavra código.

4.2.1.4 Multiplexação e Mapeamento

O OTN define também um padrão de multiplexação e mapeamento, especificando de que maneira um sinal de baixa hierarquia é mapeado em sinal de elevada hierarquia.

O menor *container* para transporte de sinais cliente do OTN é o ODU-0, que trabalha em 1,25 Gbps, podendo transportar sinais de taxa mais baixa como STM-1 e STM-4, até sinais Gigabit Ethernet, para o qual foi concebido originalmente, embora apenas um serviço possa ser transportado em cada ODU-0. Para mapeamento de sinais com taxa entre ODU-1 e ODU-2 é utilizado o ODU-flex, capaz de criar um *container* com tamanho adaptado ao sinal a ser transportado. Além do ODU-0 e do ODU-flex, também estão definidos o ODU-1,

o ODU-2, o ODU-2e e o ODU-3 para mapeamento de sinais dentro de OTU1, OTU2, OTU3 e OTU4.

A concepção do esquema de mapeamento e multiplexação é mapear um sinal cliente dentro de um OPU de baixa ordem, que então é mapeado em um ODU de baixa ordem até ser mapeado em um OTU. Assim, pode-se ter as seguintes opções de mapeamento:

- Até 2 sinais ODU-0 mapeados em 1 OPU-1;
- Até 4 sinais ODU-1 mapeados em 1 OPU-2;
- Uma combinação de sinais ODU-2 e ODU-1 mapeados em 1 OPU-3, observando a capacidade do quadro OPU-3;
- Uma combinação de sinais ODU-0, ODU-1 e ODU-flex mapeados em 1 OPU-2, observando a capacidade do quadro OPU-2;
- Uma combinação de sinais ODU-0, ODU-1, ODU-2, ODU-2e e ODU-flex mapeados em 1 OPU-3, observando a capacidade do quadro OPU-3;
- Uma combinação de sinais ODU-0, ODU-1, ODU-2, ODU-2e, ODU-3 e ODU-flex mapeados em 1 OPU4, observando a capacidade do quadro OPU4.

Seguindo essa estrutura de mapeamento, os seguintes sinais cliente podem ser mapeados e transportados pelo OTN:

- Sinais cliente com taxa de bit constante STM-16, STM-64 e STM-256 são mapeados em OPU_k;
- Sinal cliente com taxa de bit constante 10GBASE-R e FC-1200 são mapeados em OPU-2e;
- Sinais cliente com taxa de bit constante até 1,238 Gbps são mapeado em OPU-0 e sinais com taxa de bit constante até 2,488 Gbps são mapeados em OPU-1;
- Sinais cliente com taxa de bit constante próximo de 2,5, 10,0, 40,1 ou 104,3 são mapeados respectivamente em OPU-1, OPU-2, OPU-3 e OPU-4;
- Outros sinais cliente com taxa de bit constante são mapeados em ODU-flex, como FC-400 (com taxa de bit de 4,25 Gbps) e FC-800 (com taxa de bit de 8,5 Gbps).

Também estão previstos o mapeamento de sinais ATM, *stream* de pacotes, sinais de teste e sinais GPON.

A Figura 45 ilustra um diagrama simplificado de algumas opções de mapeamento.

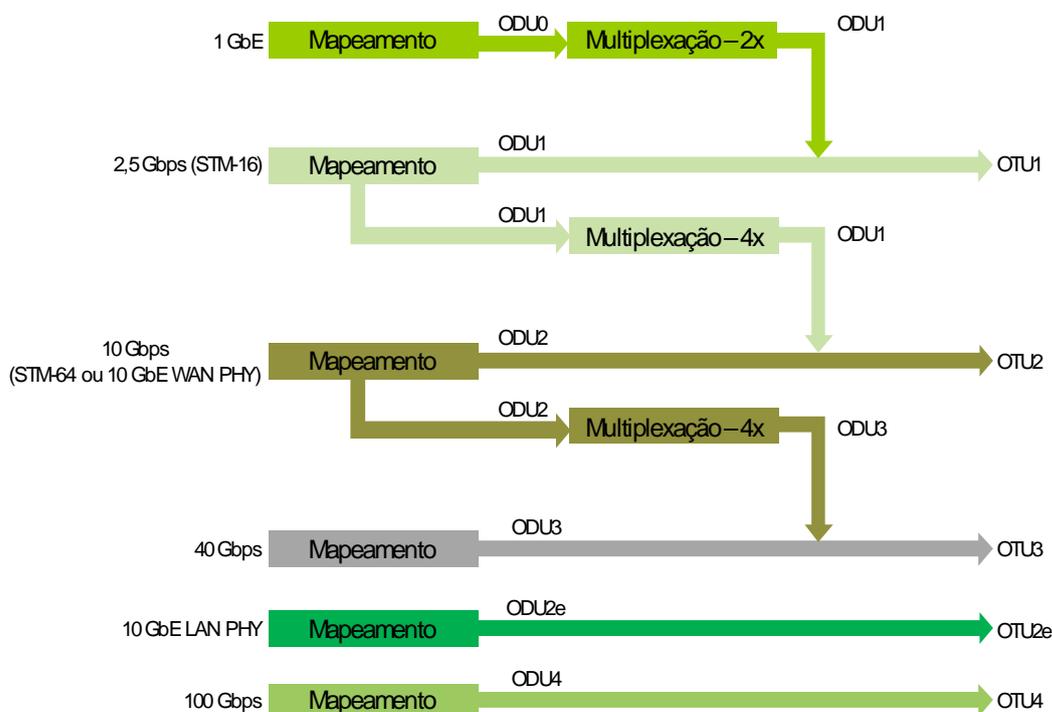


Figura 45 - Algumas opções de mapeamento e multiplexação.

4.2.1.5

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.

• Transmissão Confiável e Eficiente em Custo

Como mostrado na seção 4.2.1.3, 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 46 mostra uma situação de ganho de 5,4 dB para BER de 10^{-12} .

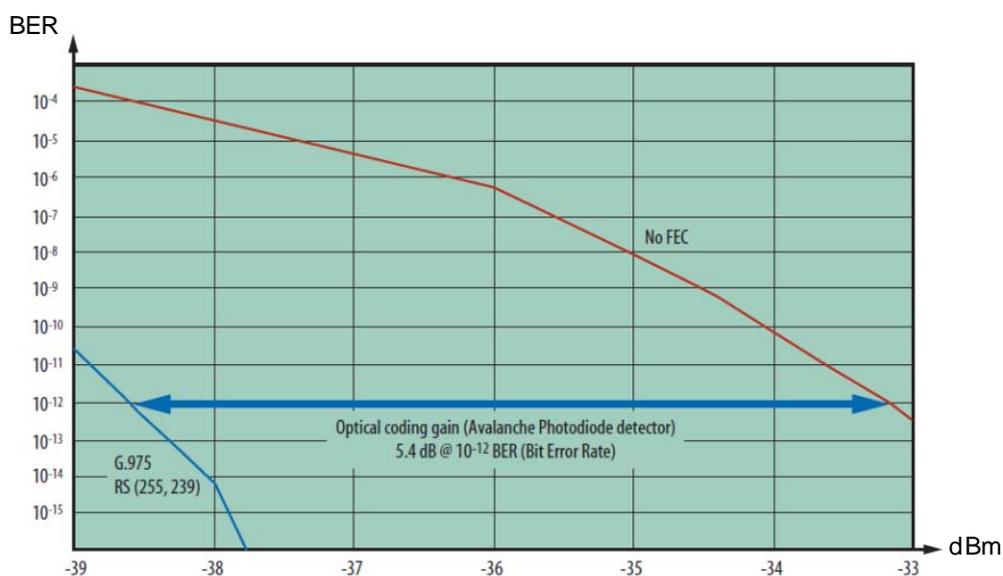


Figura 46 - BER corrigida em relação à potência de recepção para situação com e sem FEC.

A Figura 47 mostra uma relação teórica entre a taxa de erro de bit sem correção 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 47 - 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 ultra longa 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 [RS code + 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%.

• Multiplexação de Diferentes Protocolos e Transparência

Na seção 4.2.1.4 mostraram-se as possibilidades de mapeamento e multiplexação de sinais cliente no quadro OTN. 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 ODUs 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 48 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.

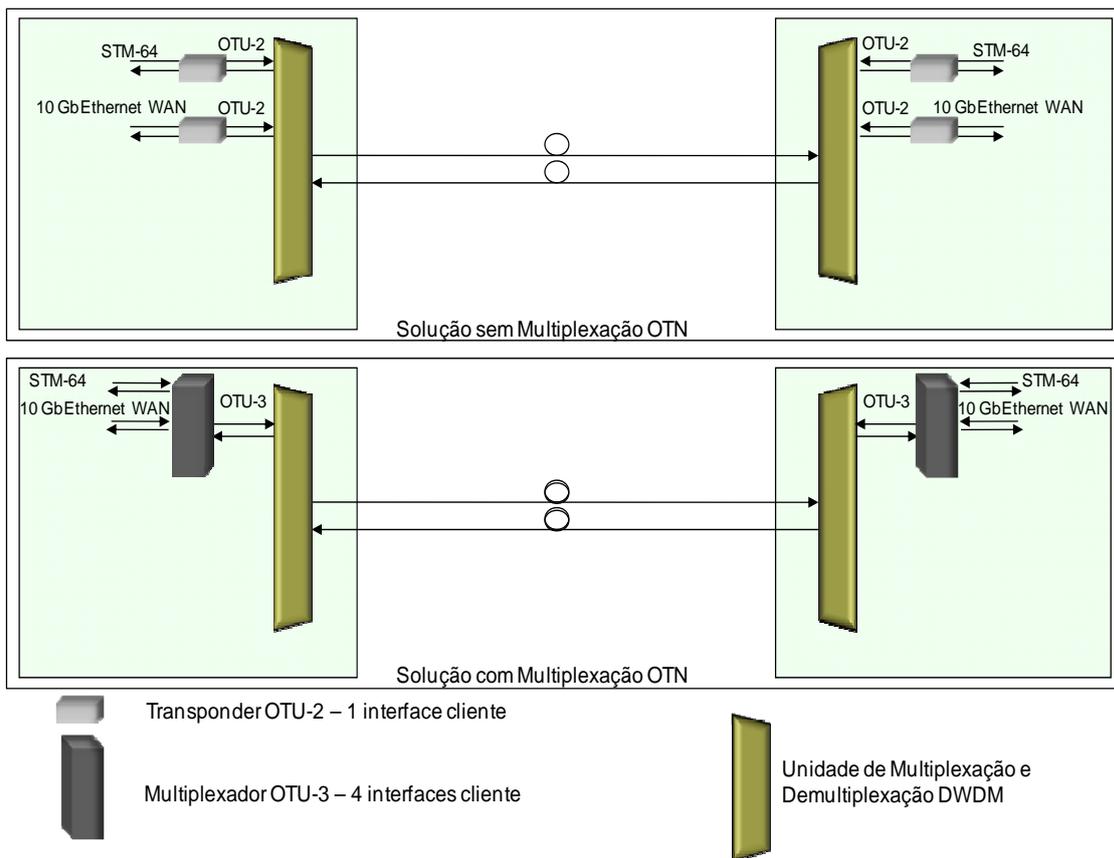


Figura 48 - Exemplo de solução com e sem uso de multiplexação OTN.

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.

- 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 49:

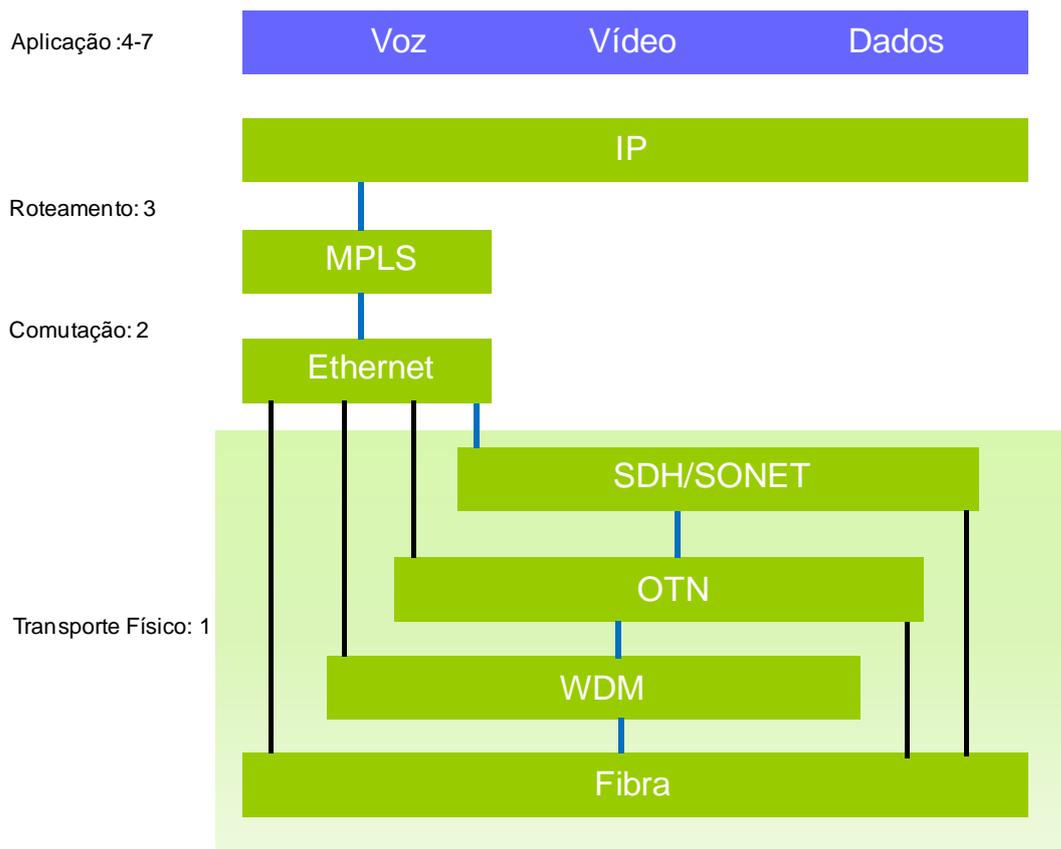


Figura 49 - Estrutura de mapeamento com uso de SDH.

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 conseqüentemente reduzindo os custos. A Figura 50 ilustra essa situação.

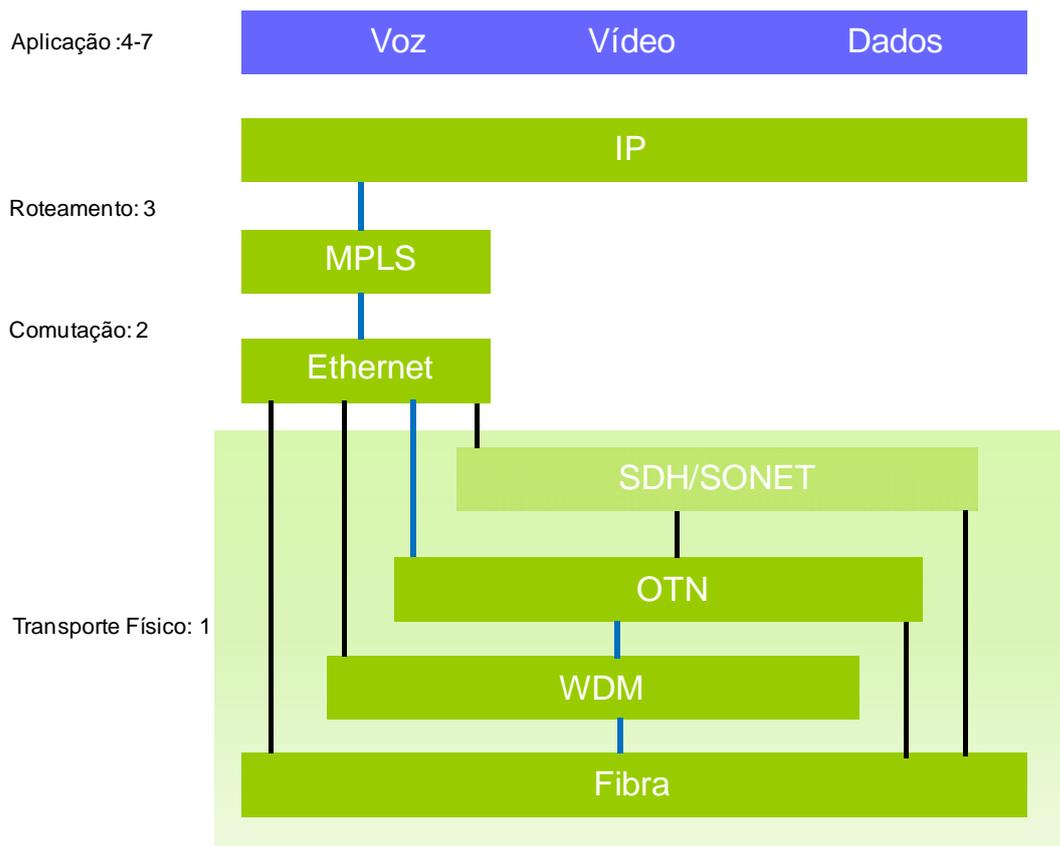


Figura 50 - Estrutura de mapeamento sem uso de SDH.

• 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 4.2.1.3. 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* e 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 51 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 51 - Comparação de facilidades de gerenciamento em sistema com e sem gerenciamento OTN.

A Figura 52 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 52 - 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.

- **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.

- **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 com relação às outras opções de tecnologia de transporte. Esse tópico será detalhado mais a frente.

4.2.1.6

Exemplos de Aplicação

- **Ethernet sobre OTN**

Serviços de *Ethernet* LAN vem dominando o tráfego nas aplicações residenciais e corporativas, principalmente pelas vantagens de custo que o protocolo Ethernet provê. Entretanto, quando se necessita do transporte de ethernet sobre fibra no ambiente WAN alguns desafios surgem. O transporte

direto sobre fibra utilizando, por exemplo, interfaces coloridas WDM, pode não ser a melhor alternativa quando pensamos em capacidade de ampliação, gerenciamento, capacidade de atravessar distintas redes, com distintas topologias e longas distâncias. A maneira tradicional de fazer esse transporte é através de SDH/SONET, por sua capacidade de proteção, gerenciamento e restauração. Essa opção está representada na Figura 49. Entretanto, essa alternativa tem custo bastante elevado, além de ser pouco otimizada e rígida na alocação de banda para transporte Ethernet. A opção mais adequada para esse transporte é o mapeamento utilizando OTN para então transmitir pela fibra através de WDM, representada na Figura 50. Dessa maneira, sinais Gigabit Ethernet e 10 Gigabit Ethernet (sejam LAN ou WAN) são mapeados diretamente em ODU's adequados de forma transparente, permitindo a criação de canais ópticos OCh que são transmitidos pelos sistemas WDM, como representado na Figura 53:

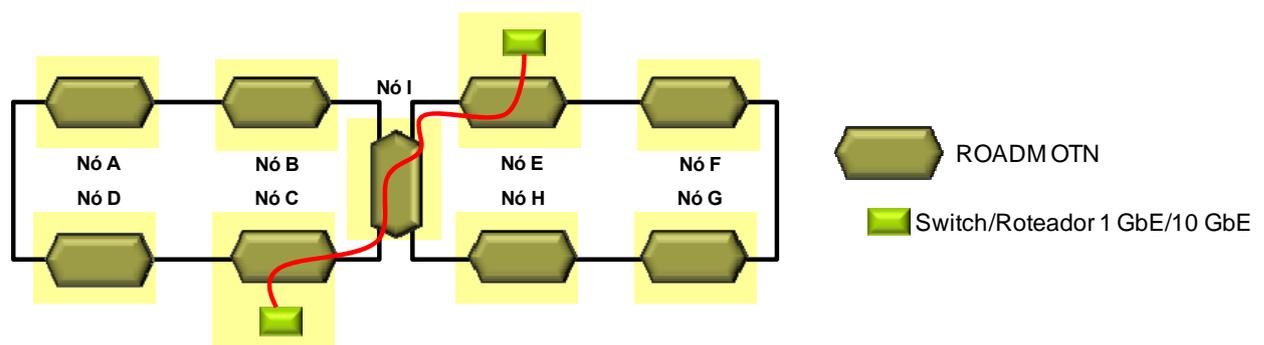


Figura 53 - Conexão Gigabit Ethernet ou 10 Gigabit Ethernet entre nós C e E com transporte feito diretamente sobre OTN.

• Uso de OTN para Transporte de Sub-Lambda

Uma rede com demanda de tráfego entre nós de tal maneira que a soma dessa demanda não exceda a granularidade de um comprimento de onda, por exemplo 10 Gbps, é possível de ser implementada de algumas maneiras.

Uma delas consiste no uso de sistema WDM com lambda dedicado para cada par de conexão bidirecional, totalizando $N.(N-1)/2$ conexões, sendo N o número de nós, na situação em que há demanda de tráfego entre todos os nós. A Figura 54 abaixo ilustra essa situação com $N = 4$, totalizando 6 conexões.

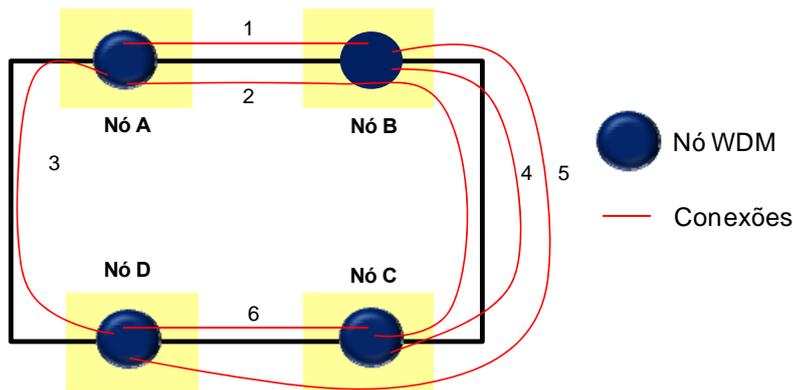


Figura 54 - Sistema WDM com conexão (lambda) dedicada para cada atendimento.

Outro possível cenário de atendimento é utilizando um sistema SDH STM-64 na situação em que a soma de tráfego não exceda 10 Gbps, com um único comprimento de onda (conexão única) entre todas as estações. Nessa situação é possível ter agregação de sub-lambda em cada nó e usar de forma mais eficiente a capacidade do comprimento de onda. Entretanto, os custos que envolvem esse tipo de solução, associado a pouca flexibilidade na multiplexação e mapeamento de tráfego baseado em pacotes e tráfego de novos serviços (como *Fiber Channel*) além da pouca escalabilidade tornam essa alternativa pouco adequada.

A opção que se apresenta como a mais adequada é utilizando rede OTN. Com esse tipo de arquitetura, continua-se fazendo agregação de sub-lambda, com a manutenção do benefício da otimização do uso do comprimento de onda, mas com custo menor e sem rigidez para o transporte de diferentes serviços. Além da agregação otimizada, também se faz uso da funcionalidade de *switch* OTN, em que em cada nó é possível derivar e inserir determinado sinal dentro do quadro OTN ou selecionar via plano de controle se esse tráfego seguirá para outro nó. Para a agregação, cada sinal é mapeado em um ODU e então multiplexado para formar um ODU de maior ordem de forma que a soma não exceda a capacidade do ODU da linha. Outra possibilidade é o uso do ODUFlex para mapeamento inicial de cada sinal que ingressa na rede para então ser mapeado novamente em ODUFlex de maior hierarquia. A Figura 56 que segue ilustra essa aplicação, precedida da Figura 55 que mostra a matriz de tráfego utilizada no exemplo.

	A	B	C	D
A	-	3 x GbE	-	-
B	3 x GbE	-	1 x GbE	STM-16
C	-	1 x GbE	-	FC 2G
D	-	STM-16	FC 2G	-

Figura 55 - Exemplo de matriz de tráfego.

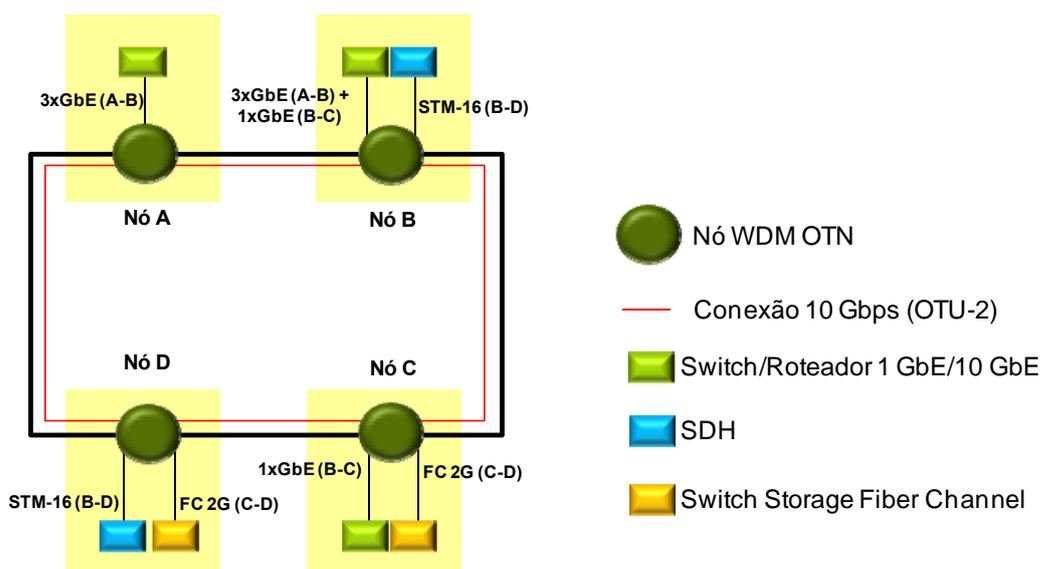


Figura 56 - Sistema WDM OTN para transporte de sub-lambda.

• Gerenciamento de Serviços em Rede Multi-Domínio Usando OTN

O gerenciamento de serviços provisionados em redes multi-domínio pode se tornar uma atividade bastante crítica para a operação da rede. Nessa situação, cada sistema ou domínio pode suportar seu próprio protocolo de camada 2, além da possibilidade de alteração do comprimento de onda de um domínio para outro, implicando em dificuldade de gerenciamento também da camada física. A opção bastante adequada é utilizar o OTN como protocolo de transporte fim a fim, estabelecendo circuitos fim a fim como canais ópticos OCh. Com a estrutura de mapeamento e transporte do OTN é possível ter informação sobre a qualidade do sinal entre cada domínio, proporcionando o gerenciamento do sinal em todos os pontos da rede independente de onde o sinal se encontra. A Figura 57 representando essa situação.

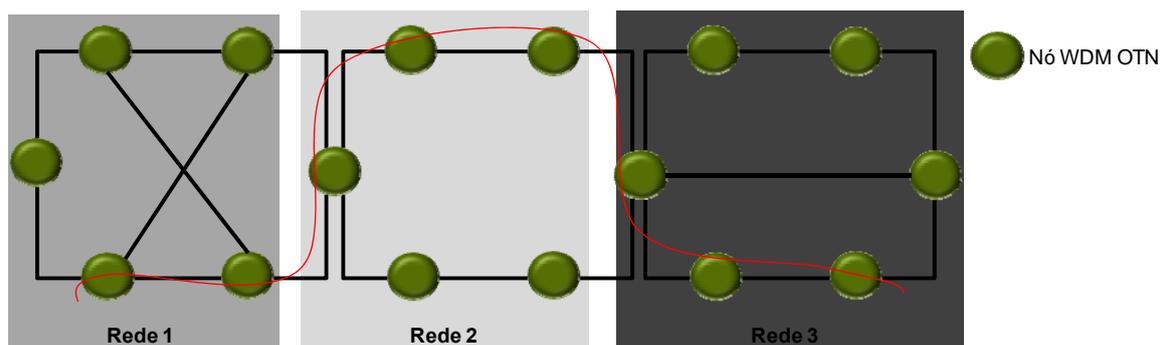


Figura 57 - Gerenciamento de sinal cliente em ambiente multi-domínio utilizando OTN.

4.2.1.7

Evolução e Futuro da OTN

Várias são as motivações que influenciam na contínua evolução do OTN e o acompanhamento dessas necessidades proporciona o conforto necessário para os operadores continuarem a se basear no OTN para a construção de suas redes de transmissão. Na continuação os principais motivadores (fonte: *“The Operator’s View of OTN Evolution”*).

- **Mudança de perfil de tráfego, crescimento de volume de tráfego e serviços sob demanda com banda variável**

O tráfego predominantemente baseado em voz atualmente já não corresponde mais a realidade, tendo o tráfego de dados dominado o maior volume de informação nas redes de transporte, cada vez com maior influência do vídeo, mas também com influência de e-mail, mensagens de texto e navegação na internet.

O volume de tráfego de dados não só tem correspondido a maior parte do volume de tráfego na rede mas também tem experimentado um crescimento muito acentuado. Isso é explicado pelo uso cada vez mais intenso de vídeo pela internet, pela necessidade de acessar a conteúdos a qualquer hora em qualquer lugar e em diferentes tipos de dispositivos. O advento do IPTV e o aumento da largura de banda oferecida ao usuário final no acesso também explicam o explosão do volume de tráfego. Principalmente com relação aos serviços de vídeo, há a

necessidade de oferecer ao usuário serviços sob demanda com maior interatividade, inclusive com possibilidade de largura de banda variável.

• **Evolução da conectividade física de TDM para Ethernet (1/10 GbE) e aumento da velocidade (40/100 GbE)**

O padrão ethernet definido pelo IEEE 802.3 tem sido a interface principal adotada para os serviços entregues aos usuários residenciais e corporativos, deixando a tecnologia TDM com uso bastante restrito. Assim, o Ethernet se tornou um importante cliente com taxa de bit constante para o OTN.

A padronização do 10 GbE ocorreu em 2002, mas a necessidade de aumento da capacidade de transporte levou o IEEE a investigar e padronizar interfaces para maiores velocidades. Assim, em junho de 2010 foram padronizados o 40 GbE e o 100 GbE, que passaram a ser os novos clientes do OTN.

• **Novos tipos de sinais cliente**

Além dos tradicionais e importantes clientes do OTN, SDH e Ethernet, outros protocolos passaram a ser utilizados com bastante frequência em diferentes aplicações, como os listados abaixo:

- Redes de armazenamento de dados ou de espelhamento de informação (SAN): protocolos Fiber channel (com taxas de transmissão de 1, 2, 4, 8, 10, 16 e 20 Gbps), FICON (com taxas de transmissão de 1, 2, 4 ou 8 Gbps) e ESCON (com taxa de transmissão de 17 Mbytesps);
- Transporte de vídeo sem compressão: protocolos SDI com taxa de transmissão 270 Mbps (SD-SDI), 1,5 Gbps (HD-SDI) e 3 Gbps (Dual Link HD-SDI ou 3G-SDI).

Considerando-se os motivadores para a evolução do OTN, é possível destacar uma série de requisitos fundamentais que o OTN deve atender em sua contínua transformação, com base em necessidades comuns dos operadores,

independente da tecnologia e equipamento legados, tamanho de rede e visão de futuro de rede, abaixo resumidos em três itens:

1) Suporte aos novos sinais cliente

A versão original da recomendação G.709 de 2001 era baseada nas taxas de bit e na hierarquia do SDH/SONET, esses por sua vez pautados em tráfego TDM. Dessa maneira, novos tipos de sinais clientes que emergiram ou que se consolidaram após o ano de 2001 não podiam ser transportados de maneira eficiente pela OTN, já que suas taxas de bit não se adequavam ao tamanho do *payload* dos ODUs ou múltiplos de ODUs existentes. Era o caso do GbE, 10 GbE e FC 10 G. Além disso não estava prevista hierarquia para suportar os novos sinais a 40 e 100 Gbps. A Tabela 9 abaixo mostra detalhes da ausência de estrutura adequada para habilitar o transporte eficiente dos novos serviços e falta de hierarquia para permitir o transporte de outros.

Tabela 9 - Estrutura OTN para transporte de distintos tipos de sinais clientes de acordo a versão da recomendação G.709 de 2001.

Necessidade Cliente	Estrutura OTN	Comentários
GbE	OPU1 (2,488 Gbps)	Mapeamento ineficiente
10 GbE LAN (10,125 Gbps) e FC-1200 (10,518 Gbps)	OPU2 (9,995 Gbps)	Banda insuficiente para mapeamento transparente
40 GbE (41,25 Gbps)	OPU3 (40,1505 Gbps)	Banda insuficiente para mapeamento transparente
100 GbE	-	Ausência de estrutura para mapeamento

Com base nas necessidades apontadas na Tabela 9, novos OPUs, ODUs e OTUs foram definidos pela G.709:

- Para transporte e monitoração de sinal GbE foi criado o ODU com taxa de 1,25 Gbps. Até então o *payload* mínimo era de aproximadamente 2,5 Gbps (ODU1),

otimizado para transporte de um sinal SDH STM-16, mas não para taxas inferiores a essa;

- Para o transporte transparente de sinal 10 GbE LAN PHY, com taxa de 10,3125 Gbps, não havia padrão definido na versão de 2001 do G.709, já que essa taxa é ligeiramente superior a taxa do payload do ODU2 (9,9953 Gbps). Duas opções proprietárias eram as mais usadas. Uma fazia o mapeamento do sinal 10 GbE usando GFP em uma área estendida do payload do ODU2 com *codeword-transparent*. A outra opção utilizada fazia o mapeamento *timing-transparent* do sinal 10 GbE em um ODU2e, *over-clocked* ODU2, capaz de suportar também FC 10 G. Foi decidido que as 2 opções seriam aceitas, entretanto, para a multiplexação, apenas o uso de ODU2e multiplexado em ODU3 de alta ordem e em seguida ODU4 é padronizado;

- Para o transporte de 40 GbE foi criada uma nova transcodificação, já que sua taxa de 40,25 Gbps é superior ao suportado pelo *payload* do ODU3 (40,15 Gbps). Com essa transcodificação, alterou-se a codificação do sinal cliente de 64B/66B para 1024B/1027B, reduzindo-se assim a taxa para 40,12 Gbps, possibilitando o mapeamento no ODU3;

- Para o transporte de 100 GbE, foi criado um novo OPU4/ODU4/OTU4, com taxa de bit ligeiramente maior que o necessário para transporte de 100 GbE, sendo possível o mapeamento de 10 interfaces 10 GbE LAN ou ODU2e.

A Tabela 10 mostra essa nova situação.

Tabela 10 - Estrutura OTN para transporte de distintos tipos de sinais clientes de acordo a recomendação G.709 de 2009.

Necessidade Cliente	Estrutura OTN	Comentários
GbE	OPU0 (1,238 Gbps)	Mapeamento eficiente
10 GbE LAN (10,125 Gbps) e FC-1200 (10,518 Gbps)	OPU2e (10,356 Gbps)	Banda suficiente para mapeamento transparente
40 GbE (41,25 Gbps)	OPU3 (40,1505 Gbps)	Transcodificação para alteração da taxa
100 GbE	OPU4 (104,355 Gbps)	Nova estrutura de transporte

2) Compatibilidade com versões anteriores

É fundamental que os equipamentos com novas funcionalidades e aderentes às mais recentes evoluções do padrão OTN interoperem com equipamentos legados funcionando com as recomendações mais antigas.

Dessa maneira, os novos ODUs e OTUs tem o mesmo formato de frame dos ODUs e OTUs definidos nas versões anteriores da G.709. Assim, tanto os novos ODUs como os antigos podem ser mapeados nos novos ODU4 e OTU4. Uma importante diferença da nova recomendação com relação à recomendação mais antiga é que o *timeslot* (TS) mínimo agora tem 1,25 Gbps (ODU0), enquanto na anterior recomendação tinha 2,5 Gbps. Assim, com o requisito de manutenção da compatibilidade com as versões anteriores da recomendação, os novos equipamentos devem aceitar ambas as granularidades.

3) Tecnologia sustentável no futuro

Atualmente é comum trabalhar-se com equipamentos que se não se obsoletem em menos de 10 anos. Além disso, é fundamental aos operadores de telecomunicações que a tecnologia em si não se torne ultrapassada no futuro e possa sempre ser atualizada para suportar as constantes e necessárias evoluções.

Nesse sentido, há a necessidade de suporte aos novos serviços, principalmente baseados em *Ethernet*. Dessa maneira, novas estruturas serão necessárias no futuro para suportar novos serviços emergentes como, por exemplo, novos tipos de ODUs. A mais recente versão da G.709 já definiu uma estrutura mais flexível e atualizada, o ODUflex, capaz de transportar qualquer taxa de bit fixa, seja CBR - ODUflex (CBR) - ou baseado em pacote – ODUflex (*packet*). Clientes CBR são mapeados no ODUflex (CBR) usando BMP enquanto os clientes baseados em pacote são acomodados no ODU-flex (*packet*) usando GFP-F. O ODU-flex é então mapeado em um conjunto inteiro de TS de um determinado ODU de alta ordem (HO-ODU) usando GMP de maneira a distribuírem-se dados e *bytes* de preenchimento buscando o transporte da maneira mais eficiente possível, sem fazer uso de ODUs de tamanho fixo, como ODU1, ODU2 e ODU3, como feito anteriormente.

4.2.2

ROADM

O motivador para a utilização de ROADM (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers*) nas redes dos operadores foi a redução do custo por bit, ao possibilitar tratar o sinal no domínio óptico, com roteamento do comprimento de onda automatizado. Com o uso do ROADM, mantém-se parte do sistema de transmissão operando próximo às camadas inferiores do modelo OSI, próximo à camada física, reduzindo assim Capex e Opex.

4.2.2.1

Descrição e Funcionalidades do ROADM

ROADM é um subsistema completamente óptico que permite a configuração remota de comprimentos de onda a serem derivados, inseridos ou transmitidos diretamente em determinado nó de uma rede DWDM. Opera tipicamente com os 40 ou 80 canais de um sistema DWDM, comumente na banda C, mostrada na Figura 37. Quando há alteração na demanda, novos comprimentos de onda podem ser derivados e inseridos ou comprimentos de onda que antes eram derivados e inseridos em um nó podem deixar de sê-lo. Permite o controle e ajuste individual de potência por canal. Três tecnologias principais são utilizadas em sua implementação: WB (*Wavelength Blocking*), PLC (*Planar Lightwave Circuit*) e WSS (*Wavelength Selective Switch*), essa última a mais utilizada. É implementado em ambiente metropolitano ou em sistemas de longa distância. A quantidade mínima de graus, ou direções, do ROADM, é duas. Nesse caso, direções leste e oeste, utilizado em configurações em anel. Já estão disponíveis ROADMs com nove graus e previstos vinte e três, para redes em configuração tipo malha. A utilização do ROADM permite eliminar uma série de restrições impostas pelo uso de OADM. Dentre as desvantagens das redes que implementam o OADM pode-se destacar: necessidade de elevada quantidade de sobressalentes, já que o OADM opera com um sub-conjunto fixo de comprimentos de onda exigindo assim pelo menos um sobressalente para cada modelo de OADM; dificuldade operacional de controle de inventário pela diversidade de modelos de OADM, cada um associado a um sub-conjunto de comprimentos de onda; ausência de flexibilidade na rede, já

que, uma vez instalado o OADM, não é possível modificar a alocação de canais definida; alocação de canal em comprimento de onda não previsto pelo OADM ou além da quantidade definida pelo OADM implica em interrupção de tráfego para substituição do OADM; ausência de monitoração e balanceamento de potência, implicando maior tempo para inserção de novos canais no sistema. As Figuras 58 e 59 representam respectivamente uma rede com ROADMs com distintos graus e um nó ROADM WSS com 4 graus.

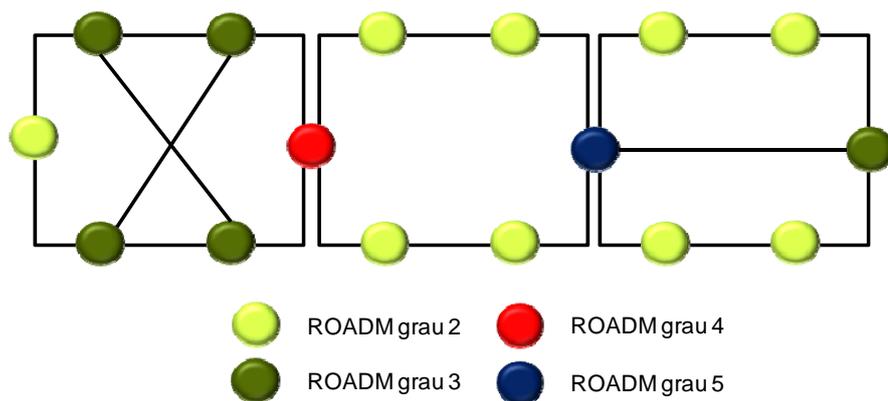


Figura 58 - Redes ópticas com ROADMs de distintos graus

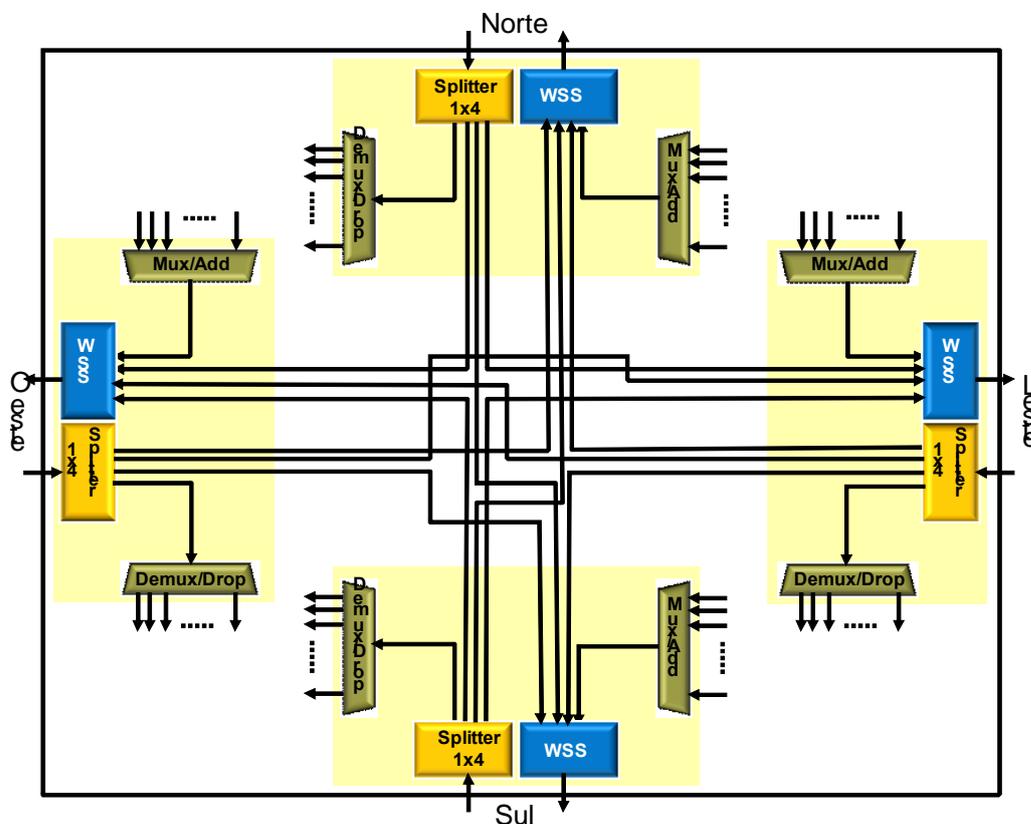


Figura 59 - Detalhamento de nó com ROADM grau 4.

Assim, o uso do ROADM traz os benefícios da simplicidade de planejamento, evitando a definição de plano de alocação de comprimentos de onda desde a implantação da rede; da facilidade operacional, ao permitir a monitoração do nível de potência em cada canal e a atuação sobre o mesmo; da agilidade na alocação novos canais, ao fazer isso a partir de um sistema de gerência centralizado, evitando o envio de técnicos a campo para a execução de tal atividade e da simplificação da gestão dos elementos na rede e de inventário, ao permitir que exista um único modelo de equipamento em toda a rede.

4.2.2.2

Limitações e novas funcionalidades

A arquitetura descrita acima, embora intensamente utilizada pelos operadores de telecomunicações, utiliza apenas um elemento WSS em cada direção reduzindo de certa forma a flexibilidade da solução. Nessa configuração tem-se as seguintes limitações:

- Os comprimentos de onda devem ser conectados em portas fixas dos multiplexadores. Esse tipo de configuração é chamada de “*colored*”;
- Os multiplexadores tem direção fixa, ou seja, os comprimento de onda conectados em determinado multiplexador somente poderão ser transmitidos para a direção na qual aquele multiplexador está conectado. Por exemplo, na Figura 58 os comprimentos de onda conectados no multiplexador da direção norte somente poderão ser transmitidos para a direção norte. Essa configuração é chamada de “*direction assigned*”;
- Uso de estrutura de inserção e derivação independentes por direção para evitar conflitos de contenção de comprimento de onda.

Já estão disponíveis ROADM que superam essas limitações, implementando as funcionalidades de “*colorless*”, “*directionless*”, “*contentionless*” e adicionalmente “*gridless*”, abaixo descritas:

- *Colorless* - Em nós ROADM sem a funcionalidade “colorless”, ou seja, em configuração com portas coloridas, embora seja possível selecionar via sistema de gerência o comprimento de onda do *transponder* quando esses utilizam laser sintonizável, as portas dos multiplexadores e demultiplexadores são fixas (coloridas). Assim, quando é necessário alterar o comprimento de onda do *transponder* é necessário enviar técnico especializado a campo para fazer a conexão física correta para a porta do multiplexador/demultiplexador associado ao novo comprimento de onda. Utilizando um WSS, por exemplo, no lugar dos multiplexadores/demultiplexadores pode-se dar ao ROADM a funcionalidade “colorless”, tornando assim possível alocar qualquer comprimento de onda a qualquer porta sem necessidade de intervenção manual;

- *Directionless* - Em nós ROADM sem a funcionalidade “directionless” os pares de multiplexadores/demultiplexadores e os *transponders* associados a eles estão fixados em determinada direção. Assim, para alterar a direção de transmissão de determinado canal é preciso enviar técnico especializado a campo para fazer a correta conexão física do *transponder* ao multiplexador associado à direção de interesse. Em configuração “directionless” qualquer comprimento de onda pode ser direcionado para qualquer direção atendida por determinado nó, a partir do sistema de gerência remoto, sem envio de técnico a campo;

- *Contentionless* - A contenção ou o bloqueio de comprimento de onda ocorre quando dois comprimentos de onda da mesma cor são direcionados ao mesmo tempo a um mesmo elemento WSS. Para evitar essa situação de contenção da rede é possível dividir os comprimentos de onda em estruturas distintas de add/drop, de modo que cada estrutura atenda apenas a um subconjunto, evitando assim que dois comprimentos de onda de mesma cor cheguem ao mesmo tempo de mesma estrutura de add/drop. Essa estratégia reduz a flexibilidade da rede não sendo a solução ideal. Com a arquitetura “contentionless” evita-se o bloqueio sem a necessidade de criação de partição de estruturas add/drop. Arquiteturas “colorless”, “directionless” e “contentionless” são chamadas CDC;

- *Gridless* – Nesse tipo de arquitetura não haveria a rigidez da alocação de canais nas grades de 50 GHz ou 100 GHz, mas se aumentaria a granularidade do espectro em 25 GHz, sendo possível utilizar canais com espaçamento de 75 GHz ou 125 GHz. Com esse tipo de arquitetura seria possível ter um sistema pronto para a transmissão em taxas superiores a 100 Gbps, como 400 Gbps ou 1 Tbps por canal.

A Figura 60 ilustra a configuração de um ROADM com 3 graus com uma porta *add/drop directionless*. A partir de um ROADM grau n, pode-se configurar um OADM grau n-1 *directionless*.

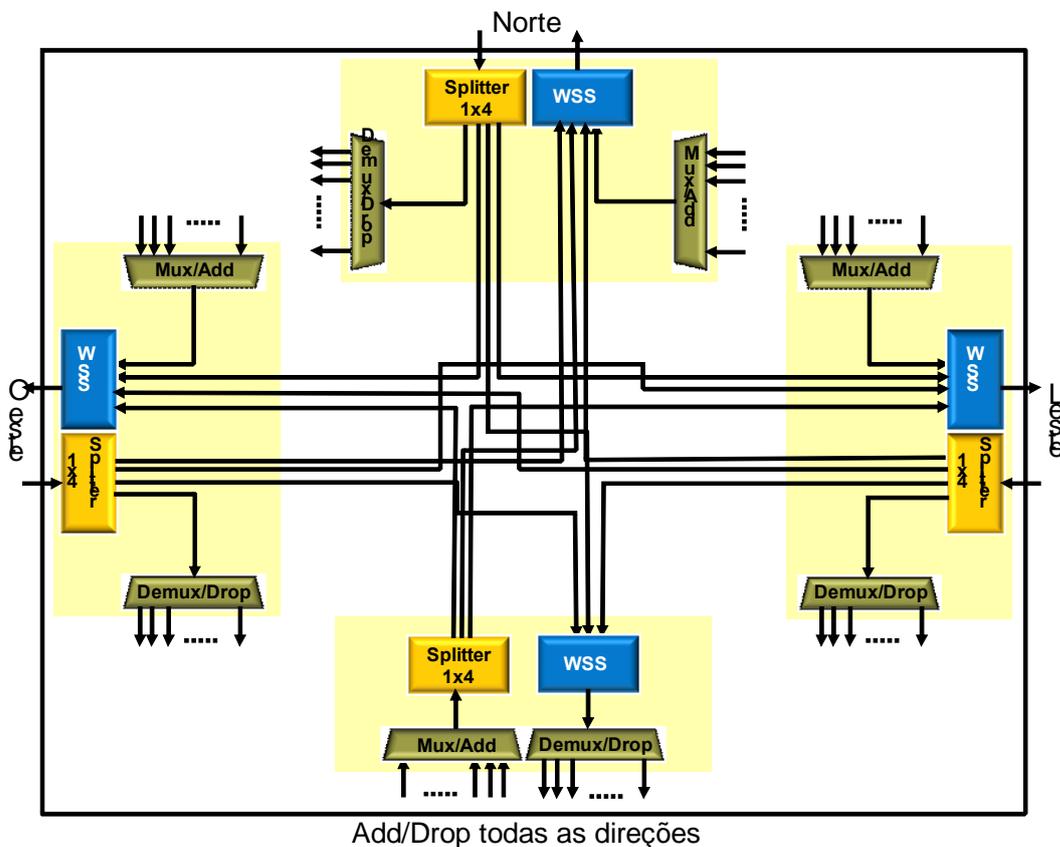


Figura 60 - Detalhamento de nó ROADM grau 3 *directionless*.

Com a finalidade de controlar todas essas funcionalidades do ROADM, propiciando o provisionamento de serviços sobre a rede óptica de forma automatizada, é fundamental a existência de um software de plano de controle óptico. Esse plano de controle deve ser tal que permita selecionar o nó de origem e o nó de destino de determinado canal óptico com algoritmos que tracem a

melhor rota, determinem o melhor comprimento de onda e implementem mecanismos de proteção de restauração. Além disso, é fundamental que esse plano de controle interaja também com a camada de roteamento elétrico, como SDH e OTN switch, ou mesmo com os roteadores Ethernet, de forma que os ROADMs possam receber desses equipamentos requisições para alocação de novos serviços ou estabelecimento de rotas de proteção.

4.2.2.3

Valor agregado pelo ROADM

O uso de ROADM em redes ópticas de transmissão propicia a seguinte agregação de valor:

- **Automatização da Camada Óptica** – ao implementar o ROADM nos nós das redes de transmissão DWDM introduz-se um elevado nível de automatização na rede. Passa-se a poder configurar a rede remotamente com pouca intervenção manual local, ou mesmo nenhuma, caso das configurações CDC com plano de controle. Além da configuração dos circuitos, o ROADM permite o controle dos níveis de potência ao longo das redes e ajustes dos níveis, de forma automática ou manual. A automatização se dá também ao permitir alocação de caminhos de proteção e restauração automática dos canais afetados por alguma falha.
- **Flexibilização do Planejamento da Rede** – com o uso do ROADM evita-se a necessidade de se definir ou de se ter, desde a implantação inicial da rede, a matriz de tráfego completa, na maioria das vezes de difícil previsão. Assim o planejamento da rede fica flexível e facilitado, deixando o projeto do sistema pronto para aumento e alteração na demanda de tráfego futura. Em uma rede com ROADMs pode-se, por exemplo, em determinado momento redefinir toda a matriz de tráfego sem necessidade de investimento em nenhum equipamento adicional. Em redes com ROADM tipo CDC e plano de controle essa reconfiguração ocorre inclusive com interrupção mínima do tráfego na rede.
- **Unificação do Controle das Camadas Elétricas e Ópticas** – a existência do plano de controle óptico atuando sobre os ROADMs permite sua extensão para atuar de

forma integrada também sobre a camada elétrica, conectada ao ROADM. Se ganha então em agilidade de configuração e facilidade de gerenciamento, independentemente se as camadas ópticas e elétricas estão ou não integradas em mesmo equipamento.

- Redução de Capex e Opex – a automatização da camada óptica reduz a necessidade de intervenção em campo para ajustes e reconfigurações implicando assim em redução natural de Opex. A redução de Capex se dá ao permitir o roteamento na camada óptica, pelo menos no nível de comprimento de onda, deixando para a camada elétrica a comutação no nível de sub-lambda, por exemplo para realizar o roteamento de um sinal Gigabit Ethernet ou SDH STM-16 que está sendo transmitido dentro de um lambda transportando um sinal OTU-3. A atividade de comutação em nível elétrico possui custo mais elevado, sendo importante assim, quando possível, evitá-la, realizando-a em nível óptico.

4.3

Análise de Investimentos

4.3.1

Arquitetura proposta

Para a análise de investimentos será proposta uma arquitetura de rede óptica de transporte metropolitana baseada em tecnologia DWDM com OTN capaz de suportar de forma transparente qualquer tipo de protocolo. Com essa arquitetura será possível ter todos os benefícios do DWDM e do OTN, com total independência de protocolos e com possibilidade conectar-se tanto com as redes de acesso e coletoras como com as redes de longa distância, suportando clientes que utilizem SDH, Ethernet/IP, SAN e outros protocolos, de forma independente. A Figura 61 abaixo ilustra melhor esse conceito.

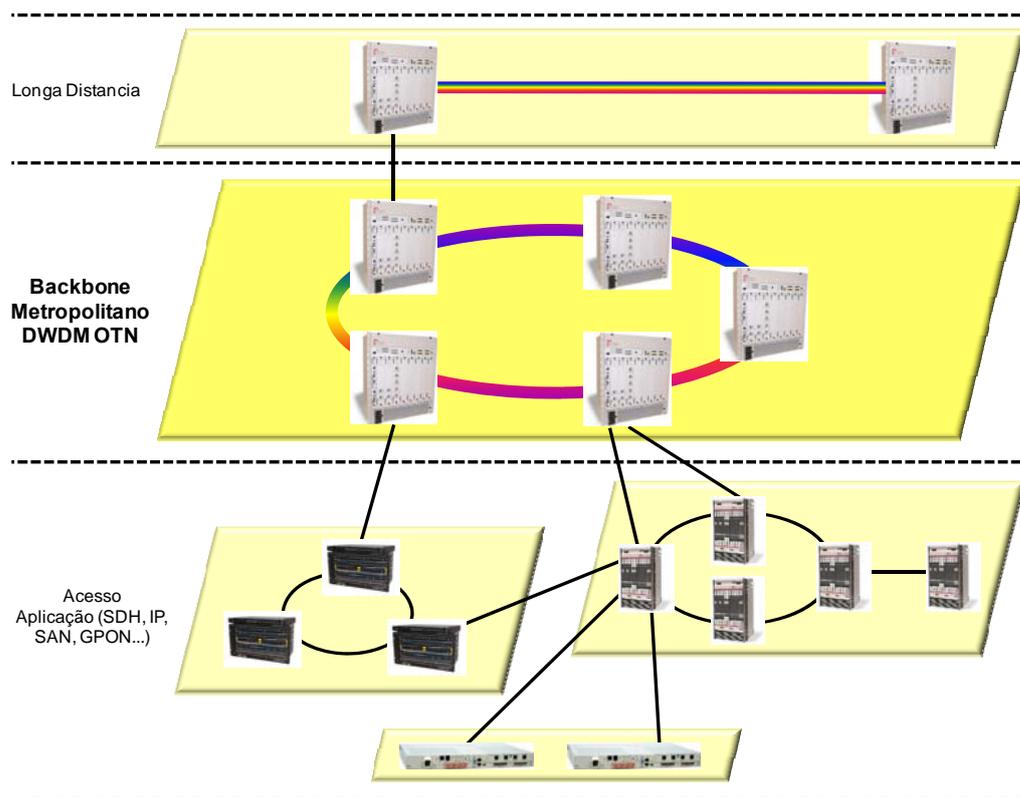


Figura 61 - Conceito da arquitetura de rede óptica metropolitana DWDM OTN utilizada na análise de investimentos.

A arquitetura considerada será formada por 5 nós com topologia em anel, como mostrado na Figura 61. A distância entre cada nó adjacente será de 10 km, totalizando 50 km de rede, cenário típico de rede *backbone* de uma grande metrópole. Distâncias maiores podem ser atingidas, mas implicariam em cálculos mais detalhados de atenuação óptica, dispersão cromática, dispersão de modo de polarização e efeitos não lineares, saindo do foco do trabalho. A rede básica terá capacidade de 40 canais (comprimentos de onda) de 10 Gbps, totalizando 400 Gbps. A partir dessa rede básica será feita comparação em termos de investimento relativo com rede de 800 Gbps (80 canais de 10 Gbps), 1600 Gbps (40 canais de 40 Gbps) e 4000 Gbps (40 canais de 100 Gbps), sempre tendo como referência a rede básica. Para cada uma dessas opções será também comparado o investimento para equipar a rede com ROADM. Será considerada matriz de tráfego totalmente simétrica, ou seja, anel equipado com *transponders* formando sistemas ponto-a-ponto em cada arco do anel, com roteamento leste e oeste para proteção em anel realizado pelos equipamentos de cross conexão elétrico conectados aos *transponders*.

As Figuras 63 e 64 mostram respectivamente a configuração de um nó DWDM simples e de um nó DWDM com ROADM, precedidas da Figura 62 que apresenta a legenda explicativa dos ícones utilizados nas duas figuras.

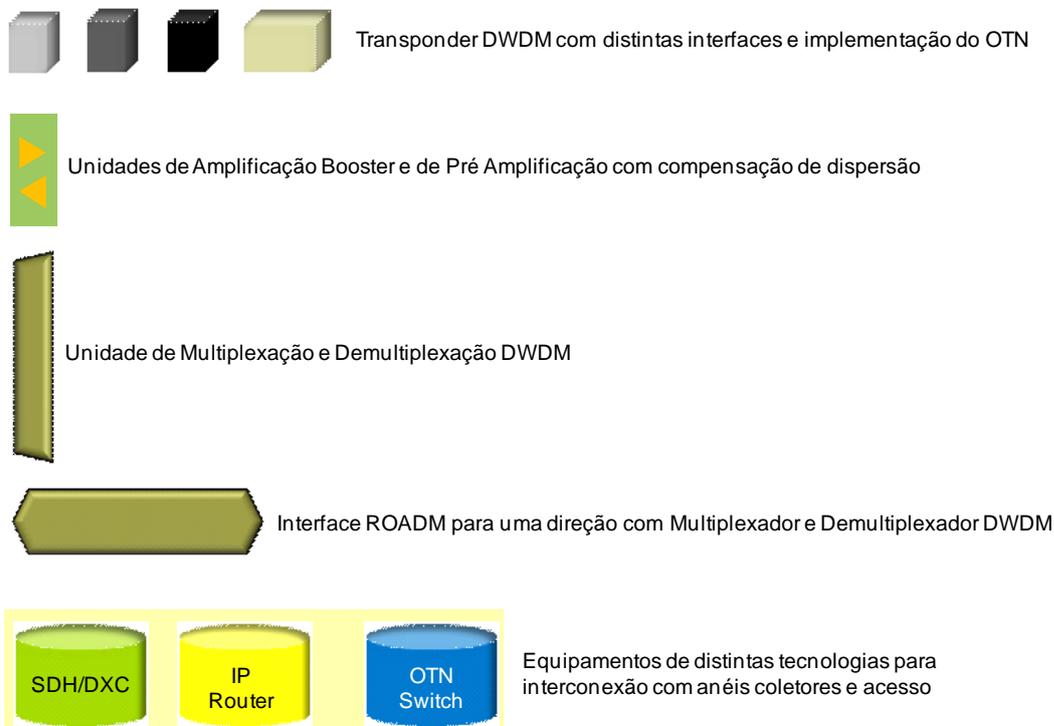


Figura 62 - Legenda utilizada nas figuras 63 e 64.

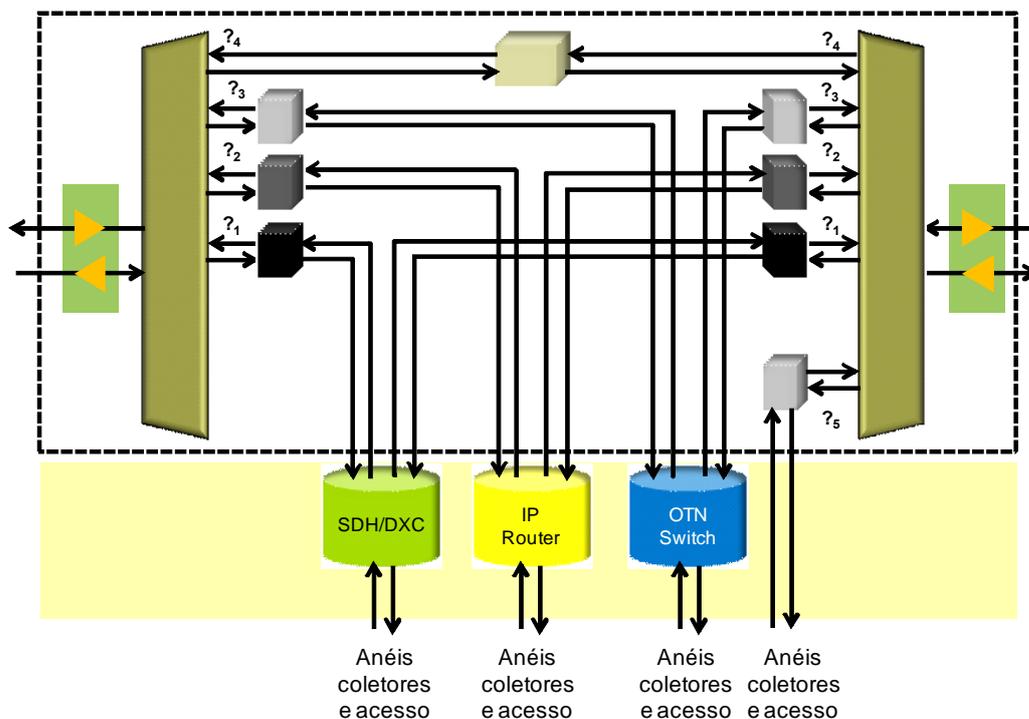


Figura 63 - Arquitetura nó DWDM.

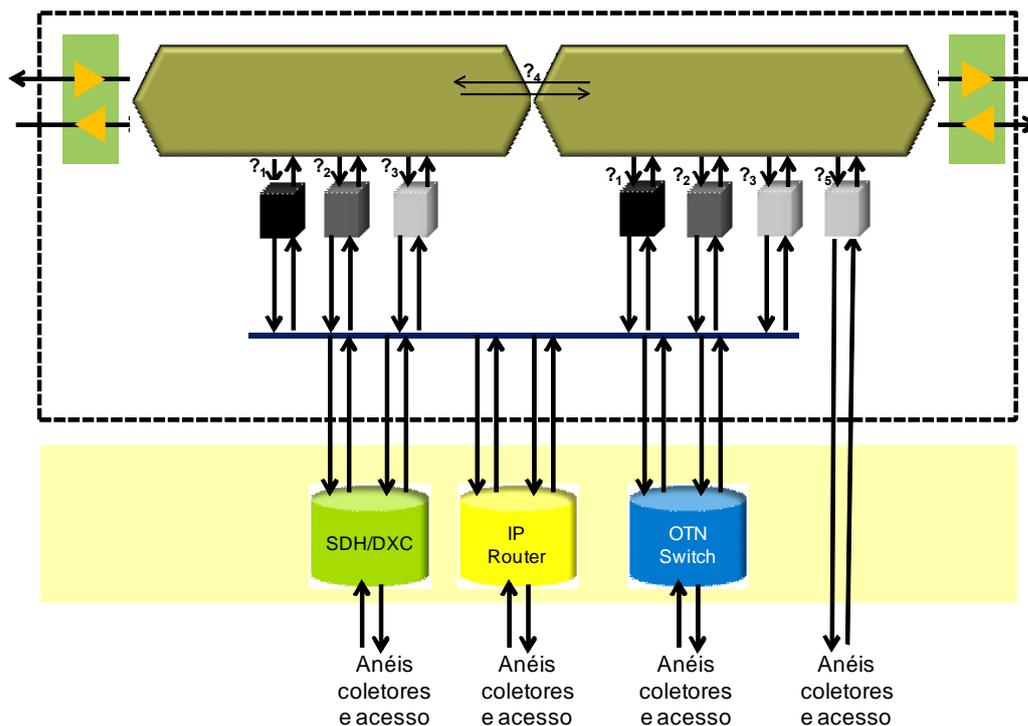


Figura 64 - Arquitetura nó DWDM com ROADM.

Nas redes que utilizam configuração de nó DWDM tal qual mostrada no diagrama da Figura 63, sem uso de ROADM, não há qualquer tipo de facilidade de retirada e adição de canais de forma automatizada. Os canais que não possuem demanda em determinada estação deverão passar por regeneração elétrica utilizando *transponder*, como exemplificado com o comprimento de onda λ_4 . A rede está pronta para conectar-se com outras redes, como mostrado na Figura 63, conectando com redes SDH, Ethernet/IP e OTN. Os comprimentos de onda λ_1 , λ_2 , λ_3 e λ_5 estão fazendo *add/drop* na estação mostrada no exemplo.

Nas redes que utilizam configuração de nó DWDM tal qual mostrada no diagrama da Figura 64, com uso de ROADM, introduz-se a possibilidade de seleção remota dos canais a serem retirados, inseridos e que deverão passar diretamente por determinado nó. O exemplo mostrado na Figura 64 mostra o comprimento de onda λ_4 passando diretamente, sem necessidade de regeneração, e os comprimentos de onda λ_1 , λ_2 , λ_3 e λ_5 fazendo *add/drop*. Assim como na configuração básica anterior, a rede está pronta para conectar-se com outras redes, como mostrado na Figura 64, que ilustra interface com redes SDH, Ethernet/IP e OTN. O ROADM utilizado possui 2 graus, embora sua infraestrutura esteja pronta

para chegar até 9 graus, formando rede em malha. Embora a arquitetura não seja *directionless* e *colorless*, ela pode ser configurada com tais funcionalidades.

Ambas as arquiteturas podem ser equipadas com distintos tipos de *transponders*, capazes de transportar sinais de distintos protocolos, sempre com implementação da OTN, com possibilidade também de mapeamento e multiplexação em nível de ODU. O dimensionamento do sistema considerando os parâmetros de transmissão foi feito de forma a permitir o transporte de sinais OTU-2, OTU-3 e OTU-4 em todos os cenários. Da mesma maneira, a largura espectral de cada canal considerada nos multiplexadores e demultiplexadores permite tal utilização. Entretanto, não há flexibilidade para escolha da grade de comprimento de onda (sistema não é *gridless*), ou seja, a grade de 80 canais tem espaçamento fixo entre canais de 50 GHz e a grade de 40 canais tem espaçamento de 100 GHz. Assim, taxas de bit superiores a 100 Gbps somente serão suportadas pelas arquiteturas propostas se a distância entre canais, a largura espectral requerida por canal, bem como parâmetros de dispersão cromática, PMD e relação sinal ruído óptica estiveram compatíveis com a arquitetura proposta. Deve-se ressaltar que taxas superiores a 100 Gbps, como 400 Gbps e 1 Tbps ainda são objeto de estudo e não são padronizadas.

As arquiteturas assim estão equipadas com os seguintes conjuntos de módulos e placas conforme Tabela 11, sem considerar os *transponders*:

Tabela 11 - Composição da infraestrutura do nó com e sem ROADM.

	DWDM básico	DWDM com ROADM
Acessórios e Miscelâneas - bastidores com módulo de alimentação redundante, chassi para acomodação de placas diversas e módulos de ventilação.	Sim	Sim
Unidades de Gerenciamento - unidades para gerenciamento de todas as unidades, incluindo canal óptico de supervisão.	Sim	Sim
Unidades de Multiplexação e Demultiplexação - 2 multiplexadores e 2 demultiplexadores de 40 ou 80 canais por nó, dependendo da configuração.	Sim	Sim
Amplificação - 2 amplificadores Booster de 21 dBm de potência de saída de saturação e 2 Pré Amplificadores por nó (inclui unidades de compensação de dispersão cromática)	Sim	Sim
ROADM - 2 placas ROADM WSS por nó (inclui unidade de controle de nível de potência dos canais)	Não	Sim

Para a composição de todos os cenários utilizados nas análises da seção 4.3.2, alterou-se a capacidade de transporte de cada solução com e sem ROADM. Basicamente, a diferença entre cada cenário é a quantidade de *transponders* utilizados e o tipo de *transponder*, além dos acessórios e miscelâneas, unidades de gerenciamento e unidades de multiplexação e demultiplexação correspondentes. O sistema foi dimensionado de tal forma a suportar, com mesma estrutura de amplificação e compensação de dispersão, transporte de sinais 10 Gbps, 40 Gbps e 100 Gbps, como mostrado acima na explicação sobre o dimensionamento. Como visto, há redução na distância atingida apenas no cenário com 80 canais. Os cenários considerados estão mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Cenários considerados nas análises de investimentos.

	Cenário 1 400 Gbps sem ROADM	Cenário 2 400 Gbps com ROADM	Cenário 3 800 Gbps sem ROADM	Cenário 4 800 Gbps com ROADM	Cenário 5 1600 Gbps sem ROADM	Cenário 6 1600 Gbps com ROADM	Cenário 7 4000 Gbps sem ROADM	Cenário 8 4000 Gbps com ROADM
Quantidade de <i>Transponder</i> 10 Gbps por nó por direção	40	40	80	80	-	-	-	-
Quantidade de <i>Transponder</i> 40 Gbps por nó por direção	-	-	-	-	40	40	-	-
Quantidade de <i>Transponder</i> 100 Gbps por nó por direção	-	-	-	-	-	-	40	40

4.3.2

Resultados e Análise

O objetivo é avaliar a infraestrutura da rede metropolitana com capacidade para atender a demanda de tráfego atual e projetada, como mostrado na seção 4.1, comparando-a com arquiteturas com maior capacidade de transporte e com maior flexibilidade.

Utilizou-se como referência para os diversos parâmetros utilizados nas análises que seguem valores médios praticados e utilizados pelos principais operadores e fabricantes de equipamentos de transmissão óptica atuando no Brasil, considerando a instalação da rede em um grande centro urbano.

Demais premissas utilizadas:

- O Capex calculado considera todos os equipamentos, com material e serviço de instalação, ativação e testes, além de todos os softwares e servidor para o sistema de gerenciamento;
- O Opex será calculado para 5 anos e considera a o custo para a manutenção preventiva e corretiva do sistema, o custo correspondente ao consumo de energia e o custo correspondente a ocupação de espaço dos bastidores nos quais os equipamentos serão instalados nas estações do operadores de telecomunicações;
- O TCO (*Total Cost of Ownership*) será a soma do Capex e do Opex de 5 anos. Em 5 anos será considerado que o sistema estará equipado com sua capacidade máxima em termos de *transponders* conforme a Tabela 12;
- Mesmo custo para ROADM com suporte a 40 canais (utilizado no cenário 2, 6 e 8) e 80 canais (utilizado no cenário 4);
- Custo do *transponders* 40 Gbps igual a três vezes o custo do *transponder* de 10 Gbps e custo do *transponder* 100 Gbps igual a duas vezes e meia o custo do *transponder* de 40 Gbps;
- Ganho de ocupação de espaço com uso de *transponder* 40 Gbps em relação ao uso de *transponder* 10 Gbps e com uso de *transponder* 100 Gbps em relação ao uso de *transponder* 40 Gbps de aproximadamente 40%.

A primeira análise a ser feita considera apenas a infraestrutura para suporte a cada um dos cenários, ou seja, inclui todos os itens que compõem o anel DWDM metropolitano descritos na seção 4.3.1 com exceção dos *transponders*. Com essa consideração, a Figura 65 ilustra a comparação de Capex entre cada um dos cenários, na qual os valores percentuais sempre fazem referência ao Capex total para o cenário 1 (100%).

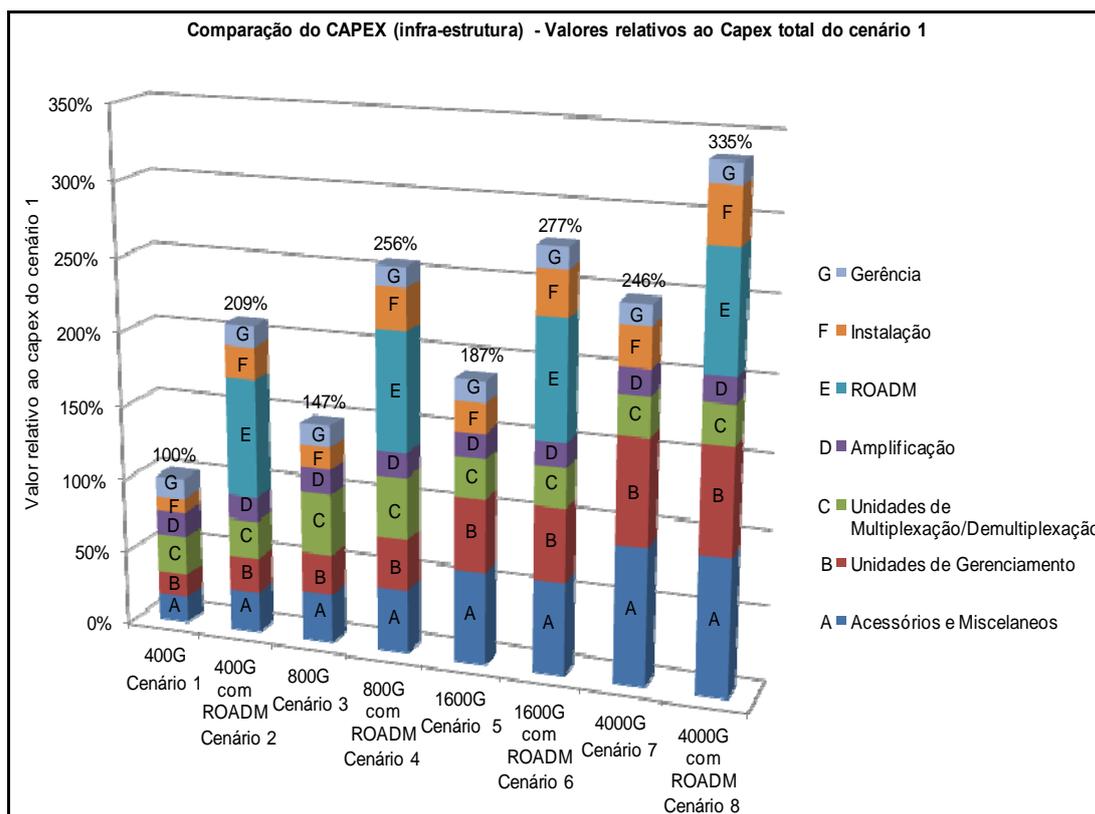


Figura 65 - Capex para ativação da infraestrutura de cada cenário em relação ao Capex do cenário 1.

Pode-se observar que o investimento em infraestrutura para suportar sistemas com capacidade superiores nunca acompanha proporcionalmente o aumento da capacidade de transmissão, havendo sempre um ganho. No extremo, pode-se observar que com um Capex pouco superior a 3 vezes o Capex do cenário 1 é possível montar uma infraestrutura toda preparada para suportar 4000 Gbps com a flexibilidade do ROADM, ou seja, investe-se pouco mais de 3 vezes em infraestrutura e tem-se um sistema pronto para capacidade 10 vezes maior. O ganho em infraestrutura se dá pela otimização da ocupação de espaço quando se trabalha com 100 Gbps, e também com 40 Gbps, implicando em ganho na utilização de bastidores, acessórios e miscelâneas e unidades para gerenciamento, além da infraestrutura de amplificação e compensação de dispersão que é comum para todos os cenários, otimizando-se esse recurso. Pelos resultados é possível ainda verificar que o ROADM corresponde a grande parte do investimento em infraestrutura nos cenários em que ele é utilizado, em torno de 80% do valor investido no cenário 1, percentual fixo pois a configuração do ROADM, e sua

referência de custo, é sempre a mesma independente de capacidade do sistema. Os cenários 3 e 4, por utilizarem 80 canais, apresentam maior valor de Capex referente ao item Multiplexadores de Demultiplexadores.

A seguinte análise é realizada calculando-se o TCO para 5 anos de cada cenário, sempre relativo ao cenário 1, nesse caso considerando o quantitativo e modelo de *transponder* como indicado na Tabela 12. Abaixo a Figura 66 mostrando o resultado.

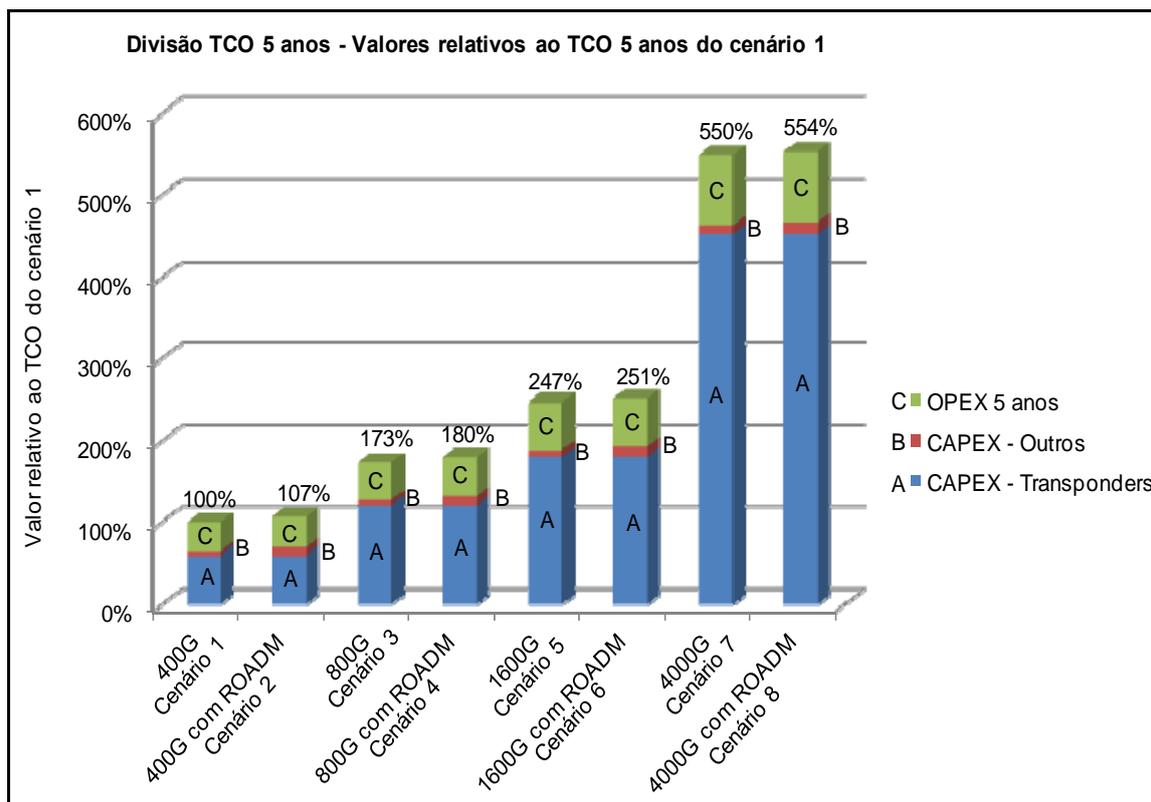


Figura 66 - TCO em 5 anos para ativação completa de cada cenário em relação ao TCO do cenário 1.

Assim como na análise anterior, pode-se observar que o investimento total para suportar sistemas com capacidade superiores nunca acompanha proporcionalmente o aumento da capacidade de transmissão, havendo sempre um ganho. No extremo, pode-se observar que para termos um sistema com capacidade de 10 vezes superior ao cenário 1 necessita-se de um TCO em 5 anos inferior a 6 vezes o TCO daquele do cenário 1 básico, já incluindo o valor agregado pelo ROADM. Novamente o ganho em infraestrutura se dá pela otimização da ocupação de espaço quando se trabalha com 100 Gbps, e também com 40 Gbps,

implicando em menor utilização de bastidores, acessórios e miscelâneas e unidades para gerenciamento, além da otimização da infraestrutura de amplificação e compensação de dispersão que é comum para todos os cenários e da otimização do Opex. Entretanto o principal ganho ocorre devido à otimização do investimento em *transponder* quando se trabalha em 40 e 100 Gbps. Pelos resultados é possível ainda verificar que o Capex referente aos *transponders* corresponde a maior parte do TCO em 5 anos, em qualquer cenário. Pode-se concluir também que, na avaliação de TCO, o ROADM passa a representar muito pouco, com investimento adicional necessário em relação ao cenário 1 sempre inferior a 10%. Destacadamente, nos cenários de 1600 Gbps e 4000 Gbps o adicional para equipar o sistema com ROADM é inferior a 5%. Quando se compara com relação ao cenário de mesma capacidade mas sem ROADM o investimento adicional é ainda menor, inferior a 2% para o cenário 6 em relação ao 5 e inferior a 1% para o cenário 8 em relação ao 7.

Na análise que segue é feita uma comparação entre a capacidade, o TCO de 5 anos e o custo do Mbps de cada cenário, sempre tendo como referência o cenário 1. Segue abaixo Figura 67 com os resultados.

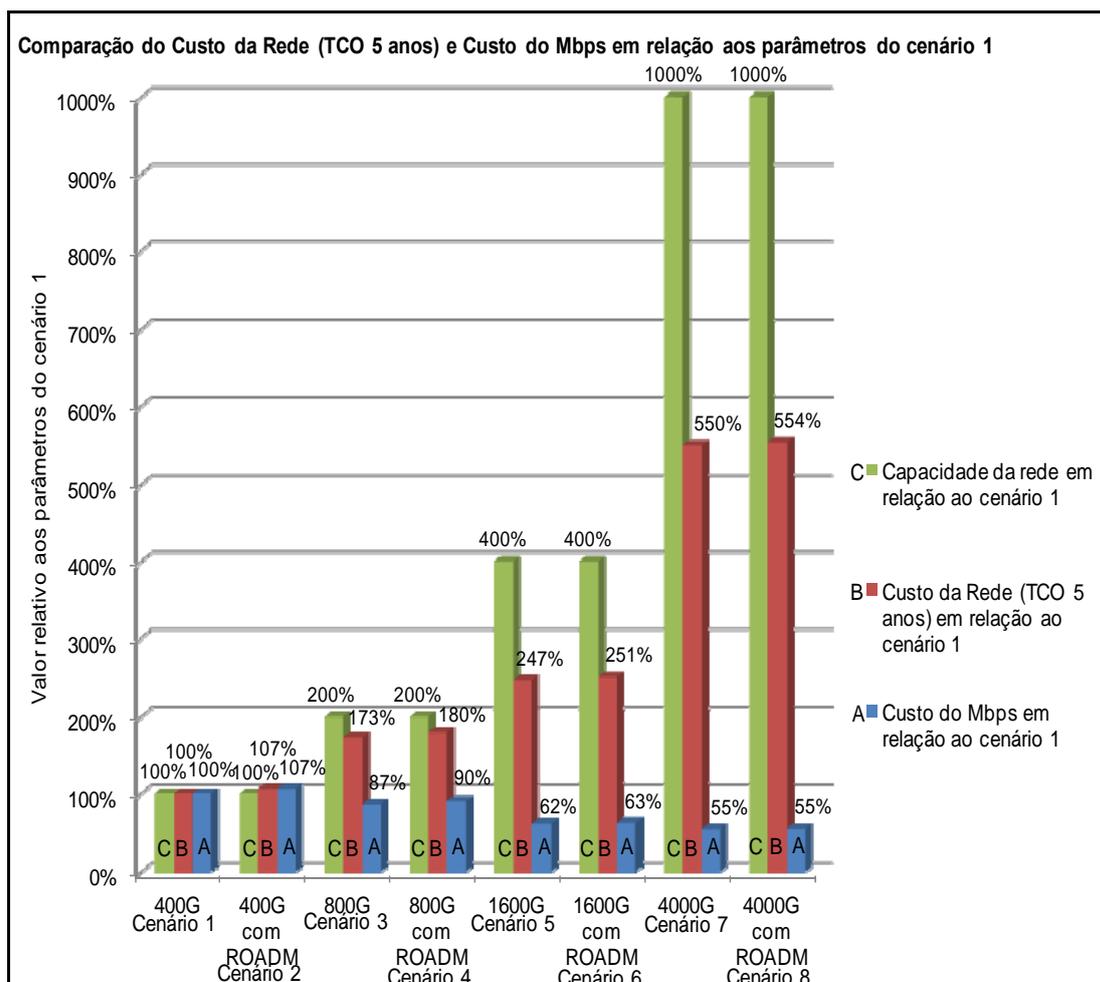


Figura 67 - Capacidade, TCO em 5 anos e custo do Mbps de cada cenário em relação aos mesmos parâmetros do cenário 1.

Com os resultados mostrados na Figura 67 verifica-se que o custo do Mbps cai à medida que se aumenta a capacidade de transporte total do sistema. No extremo, pode-se observar que em um sistema com capacidade 10 vezes superior ao cenário 1 tem-se um custo do Mbps correspondente a 55% do custo do Mbps do cenário 1, já incluindo o valor agregado pelo ROADM. Novamente o ganho e as otimizações se dão pelos motivos explicados na análise anterior. Na avaliação do custo do Mbps, o ROADM também representa muito pouco, com aumento de apenas 3% no cenário de 800 Gbps, 1% no cenário de 1600 Gbps e sem impacto no custo do Mbps no cenário de 1600 Gbps.

Nos resultados mostrados na Figura 66 verificou-se o grande peso do Capex dos *transponder* no valor total do TCO de 5 anos. Dessa forma, a variação do valor relativo do *transponder* 40 Gbps e 100 Gbps em relação ao valor de *transponder* 10 Gbps, tal qual indicado nas premissas utilizadas nas análises,

necessariamente impacta no TCO de 5 anos e no custo do Mbps dos cenários que utilizam *transponder* 40 Gbps (cenários 5 e 6, com capacidade de 1600 Gbps) e 100 Gbps (cenários 7 e 8, com capacidade de 4000 Gbps). Os resultados mostrados na Figura 68 a seguir permitirão então avaliar a sensibilidade do TCO de 5 anos e do custo do Mbps para os cenários de 1600 Gbps e 4000 Gbps, com e sem ROADM, para variações positivas e negativas de 20% no valor dos *transponders* 40 Gbps e 100 Gbps, respectivamente, em relação ao *transponder* de 10 Gbps.

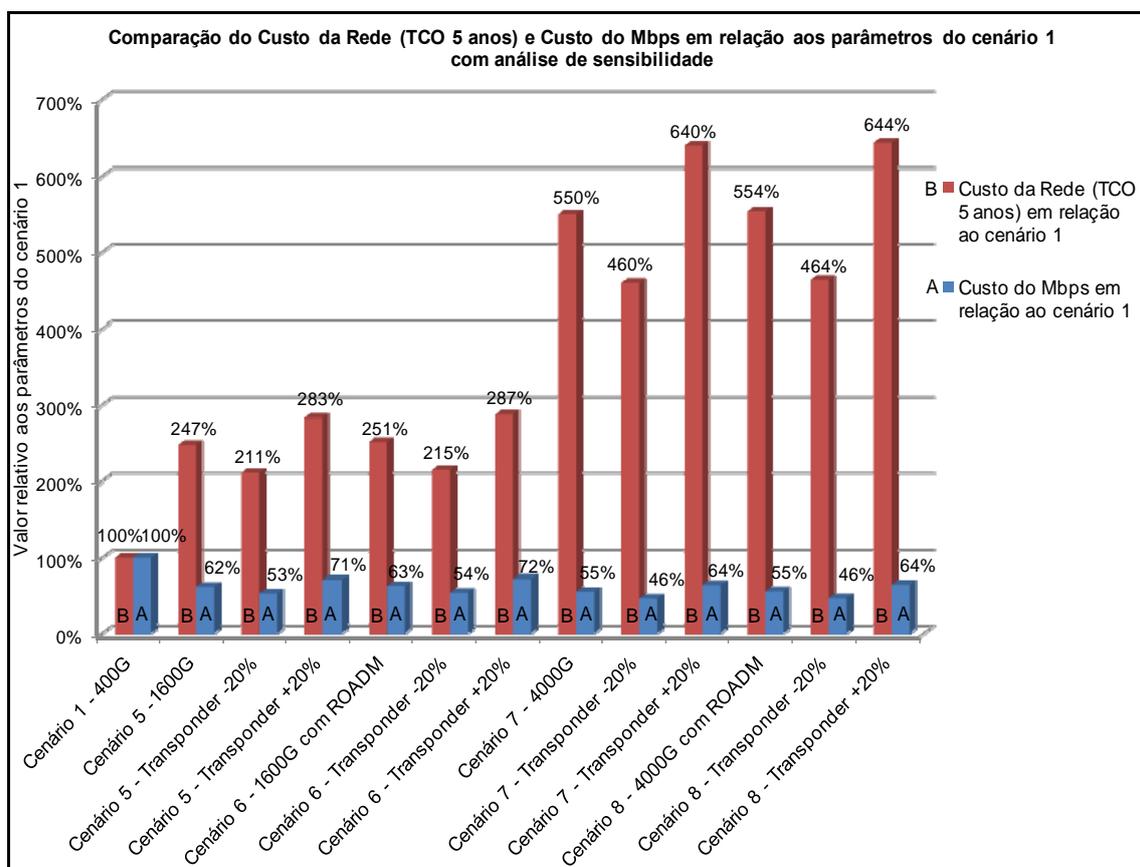


Figura 68 - TCO em 5 anos e custo do Mbps dos cenários 5, 6, 7 e 8 em relação aos mesmos parâmetros do cenário 1 com análise de sensibilidade.

Para qualquer um dos 4 cenários analisados, a variação do custo do Mbps é inferior a 10%, para cima ou para baixo, de acordo a variação positiva e negativa de 20% no valor dos *transponders*. Comparando-se a variação do custo do Mbps de determinado cenário com o próprio cenário, ou seja, por exemplo comparando-se a variação do custo do Mbps ao aumentar-se em 20% o valor do *transponder* no cenário 5 em relação ao próprio cenário 5, a variação é de aproximadamente

15% em qualquer um dos 4 cenários. Essa variação é reflexo da variação do TCO em 5 anos, de aproximadamente 36% para os cenários 5 e 6 e 90 % para os cenários 7 e 8. Comparando-se a variação do TCO de 5 anos de determinado cenário com o próprio cenário, ou seja, por exemplo comparando-se a variação do TCO ao aumentar-se em 20% o valor do *transponder* no cenário 5 em relação ao próprio cenário 5, a variação é também de aproximadamente 15 % em qualquer um dos 4 cenários. Essas variações não deixam de ser significativas, mostrando a preocupação em controlar-se o valor dos *transponders*.

4.4

Comentários e Conclusões do Capítulo

Nesse capítulo foi mostrado que a banda requerida do *backbone* metropolitano apenas para conexão de acesso banda larga FTTH pode ser tão elevada quanto mais sofisticados são os serviços oferecidos aos usuários, sobretudo devido ao aumento do uso de canais em alta definição e inclusão de oferta de vídeo sob demanda. Ressaltou-se que os cenários prospectados, embora com oferta muito acima do que hoje é oferecida pelos provedores de serviço, são cenários perfeitamente desejáveis, atingindo demanda de capacidade na rede metropolitana da ordem de Tbps. Foi também destacado que as redes *backbone* metropolitanas também devem atender outras demandas, como conexão para grandes clientes, interconexão para telefonia móvel e conexões de *Storage*. Concluiu-se então a importância de que sua arquitetura tenha elevada capacidade e flexibilidade para lidar com demandas tão diversas.

Das opções tecnológicas avaliadas, conclui-se que o uso de tecnologia DWDM como base de transporte de todos os serviços e protocolos que fazem parte do ambiente metropolitano, em conjunto com a implementação da OTN e uso de ROADM correspondem a uma configuração que atende de forma bem satisfatória as demandas atuais e futuras desse segmento de rede. É descrita a arquitetura da rede DWDM, assim como são descritos a OTN e o subsistema ROADM, mostrando seus benefícios e importância.

Nas análises de investimentos realizadas pôde-se concluir que:

1) O aumento no investimento de Capex em infraestrutura, relativo ao cenário de referência, para suporte a sistemas de maior capacidade não é diretamente proporcional ao aumento relativo da capacidade para a qual o sistema foi projetado. É mostrado que o investimento na infraestrutura de um sistema pronto para 40 canais de 40 Gbps (1600 Gbps de capacidade total) não supera 3 vezes o investimento em infraestrutura de um sistema projetado para 40 canais de 10 Gbps (400 Gbps de capacidade total), correspondente ao cenário 1 (básico). Foi mostrado também que, no caso de infraestrutura para um sistema pronto para 40 canais de 100 Gbps (4000 Gbps), o adicional não supera 3,5 vezes o investimento em infraestrutura do cenário básico. Em ambas as situações já considerando a adição de ROADM com 2 graus. Isso se deve ao ganho de espaço, o que implica menor uso de bastidores, unidades de alimentação, gerenciamento e outros acessórios. O cenário com 80 canais de 10 Gbps (800 Gbps) necessita de um investimento adicional aproximado de 50% para apenas duplicar a capacidade, mostrando-se desinteressante frente aos cenários de 1600 e 4000 Gbps.

2) Considerando não só a infraestrutura mas também os *transponders*, foi mostrado que o investimento nesse elemento, na situação de sistema equipado com capacidade máxima, corresponde à maior parte do TCO. Novamente, foi mostrado que o aumento no investimento, relativo ao cenário de referência, para suporte a sistemas de maior capacidade não é diretamente proporcional ao aumento relativo da capacidade para a qual o sistema foi projetado, dessa vez considerando os sistemas equipados com capacidade máxima e análise do TCO, não apenas do Capex. O principal motivo é o ganho devido à redução de preço ao se utilizar *transponders* em 40 Gbps e 100 Gbps. Em qualquer situação, pelo impacto do *transponder* no TCO, o investimento para a implementação do ROADM passa a representar muito pouco.

3) Verifica-se que o custo do Mbps quando se utiliza sistema com canais 100 Gbps pode ser quase a metade do custo do Mbps quando se trabalha com sistema com múltiplos canais de apenas 10 Gbps. Novamente, é verificado o pequeno impacto do uso do ROADM no custo do Mbps.

4) É destacada a preocupação em se controlar o valor dos *transponders*, dado seu impacto no TCO e no custo do Mbps.

Nas configurações utilizadas em todos os cenários de backbone metropolitano o sistema está equipado com *transponders* de forma a se obter capacidade total entre cada nó e seu nó adjacente, formando conjunto de sistemas ponto-a-ponto com matriz de tráfego de alocação de lambdas completamente simétrica. Em configurações onde há necessidade de passagem de canais diretamente em determinado nó, o uso de ROADM permite realizar essa manobra sem necessidade de regeneração, implicando em redução do TCO em comparação à situação sem uso de ROADM.

É importante destacar que as análises mostram situações extremas com as redes equipadas em sua capacidade máxima. Como a rede cresce de forma gradativa podendo ser equipada além dos 5 anos analisados é possível tê-la convivendo com *transponder* 10 Gbps, 40 Gbps e 100 Gbps, ou seja, a rede não atingiria a capacidade máxima para a qual fora projetada em 5 anos.