

## 2

### Redes Ópticas: Conceitos

#### 2.1

##### Limitação Conversão Óptica-Elétrica-Óptica (O-E-O)

Nos últimos anos, mais precisamente na última década, têm-se observado um crescimento exponencial na capacidade de transporte de dados nas fibras ópticas, podendo-se atualmente ultrapassar a marca de bilhões de bits transmitidos por segundo. A capacidade de transmissão advinda da largura de banda disponível possibilitou o aumento do tráfego injetado na rede bem como o crescimento da demanda e diversificação dos serviços de comunicação, que podem ser caracterizadas por três grandes frentes: a explosão da Internet e do conseqüente protocolo IP para interligação de máquinas, a proliferação das redes privadas virtuais VPN (Virtual Private Network) e mais recentemente o uso de aplicações como HDTV, vídeo-conferência e telefonia IP.

Ao longo dos anos, a banda consumida por estes serviços ultrapassou e a cada dia distancia-se mais da banda requerida pelos serviços TDM convencionais (voz e linhas dedicadas).

No entanto, a velocidade na qual é possível processar sinais eletronicamente, em equipamentos comerciais, é bastante limitada se comparada com a enorme banda provida pelos meios de comunicação ópticos. Essa grande diferença entre a velocidade de transmissão óptica e processamento eletrônico resulta em um gargalo na rede, comumente denominado gargalo eletrônico (*eletronic bottleneck*) [5]. Este gargalo é evidenciado por fatores tais como o aumento no consumo dos discos de armazenamento nas interfaces de entrada dos roteadores, congestionamentos na rede, pela carga de processamento nas unidades centrais de processamento e pelo descarte de informações de usuários ao longo do transporte na rede. Resulta então, no nível de usuário e do provedor dos serviços de comunicação, em um tempo maior de ocupação do canal de comunicação e em um pior compartilhamento dos recursos (que diminui o número de usuários simultâneos da rede) restringindo assim a escalabilidade da rede [8]. No nível de

aplicação, resulta no descarte e/ou perda da informação transmitida, e, principalmente, no aumento do tempo de transporte fim-a-fim das informações (atraso). Em virtude da característica de imprevisibilidade destes acontecimentos, ocorre também uma variação do atraso (*jitter*) das unidades de dados oriundas da mesma aplicação fonte e direcionados para a mesma aplicação destino. Todos estes acontecimentos restringem a provisão de serviços a uma variedade de aplicações, principalmente as de missão crítica que são exigentes quanto aos aspectos de qualidade no serviço (*QoS – Quality of Service*).

Um outro fator que cabe ressaltar é que todas as facilidades providas pelo domínio óptico ainda não são totalmente exploradas nos sistemas de comunicação convencionais. Isto porque ainda não há implementações que permitam manipular dados, efetuar comutação e roteamento exclusivamente no domínio óptico; daí é inevitável a passagem para o domínio eletrônico em vários pontos da rota. Estas transições acabam por reduzir a vazão média de transmissão, uma vez que a capacidade de processamento eletrônica é inferior a taxa de transmissão suportada pelos sistemas ópticos [9].

Com a evolução da tecnologia de transmissão óptica, motivada principalmente pela disponibilidade de banda suportada pelos meios ópticos e pela demanda de aplicações banda larga (*broadband services*), os sistemas de comunicação totalmente ópticos sobrepõem a limitação de vazão imposta pelo processamento eletrônico.

## 2.2

### **Redes Ópticas: Evolução**

O advento de comutadores totalmente ópticos e de novos hardwares capazes de processar sinais luminosos supera este gargalo, maximizando assim todos os benefícios providos pelo domínio óptico até então pouco explorados.

Introduz-se então uma inteligência na camada física da rede (ambiente fotônico) que antes estava restrita às camadas superiores: tarefas como manipular, chavear, rotear e encaminhar dados que, anteriormente exigiam a passagem para o domínio eletrônico, atualmente podem ser desempenhadas com eficiência no próprio domínio óptico.

Esta nova filosofia agrega uma série de vantagens à rede: transparência a

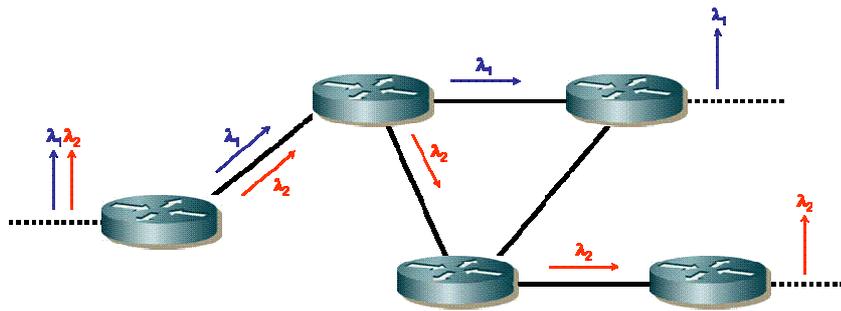
taxa e tecnologias de transmissão, aumento da capacidade efetiva de tráfego suportado (maior vazão), melhor utilização nos recursos da rede, diminuição do atraso no transporte fim-a-fim da informação, suporte a diversos tipos de mídias e aplicações com diferentes requisitos de QoS [10]. Resumindo, aumenta o desempenho e a convergência da rede.

A multiplexação por divisão de comprimento de onda (*WDM - Wavelength Division Multiplexing*) oferece uma maneira extremamente efetiva na utilização da banda passante provida pelo meio óptico. O WDM é uma técnica de multiplexação em frequência (comprimento de onda) que consiste em modular vários comprimentos de onda provenientes de sinais de entrada distintos e propagá-los simultaneamente na fibra óptica [5], aproveitando assim todo um largo espectro que possui valores de atenuação próximos e que permitem alcançar grandes distâncias. Expande a capacidade de transmissão de uma única fibra ótica através da emulação de fibras virtuais. Cada fibra virtual corresponde a uma conexão ótica e transporta multigigabits de informação por segundo, aumentando consideravelmente a banda de transmissão ótica disponível.

Esta tecnologia é realidade na estrutura dos grandes sistemas de comunicação (*backbones*) e possibilita o encaminhamento e roteamento em alta velocidade de um volume grande de informação. Nos últimos anos, foi observado um grande número de sistemas WDM do tipo ponto-a-ponto. Este tipo de sistema pode ser caracterizado como a primeira geração das redes de comunicação óticas de alta velocidade.

Uma importante vantagem na implementação de redes WDM é a possibilidade de rotear independentemente cada comprimento de onda multiplexado por diferentes caminhos.

A figura a seguir ilustra esta facilidade.



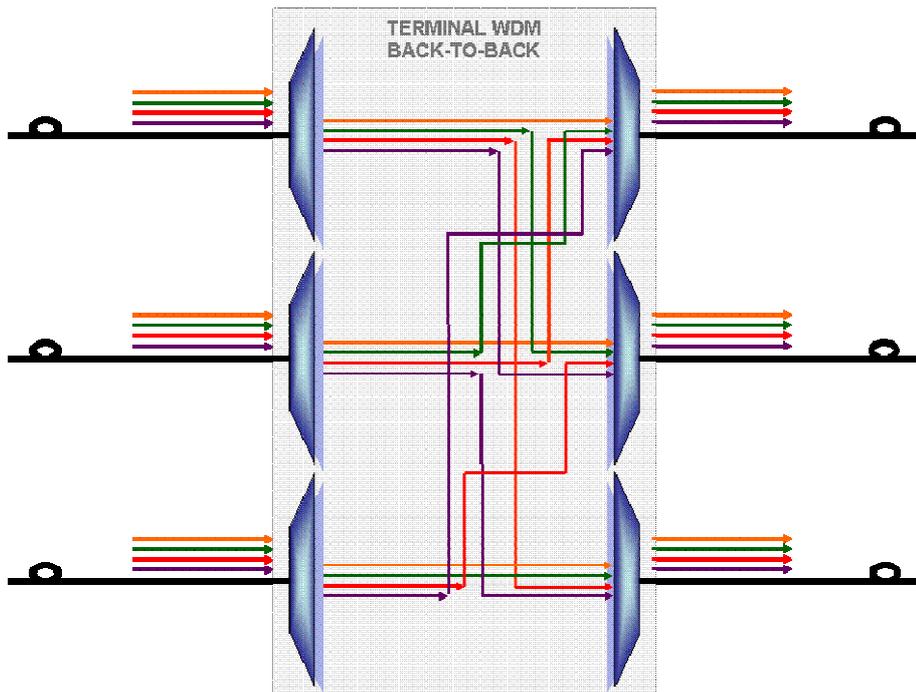
**Figura 2.1 – Roteamento em redes WDM**

Na transmissão WDM, portadoras óticas transportam a informação de usuários entre dois pontos quaisquer da rede. Para cada portadora ótica, existe um comprimento de onda associado. Os dados de usuários, ao longo da transmissão, podem ou não utilizar diferentes comprimentos de onda para transporte da informação.

A possibilidade de utilizar diferentes comprimentos de onda durante o transporte da informação está diretamente relacionada com a arquitetura dos nós nas redes óticas.

Os elementos posicionados nos nós das redes óticas podem ser classificados de diversas formas, considerando atributos tais como reconfigurabilidade e conversão de comprimento de onda [7].

Apesar das vantagens citadas, as redes WDM de primeira geração, baseado no conceito de estratificação, são meramente a malha física de interligação e não possuem nenhum mecanismo de inteligência na camada ótica. O “roteamento” nos nós intermediários é feito manualmente, e a rede não provê nenhum mecanismo de estabelecimento de conexões que não seja as pré-estabelecidas pelo operador da rede. Neste primeiro cenário, os nós são compostos por terminais WDM back-to-back (Figura 2.2).

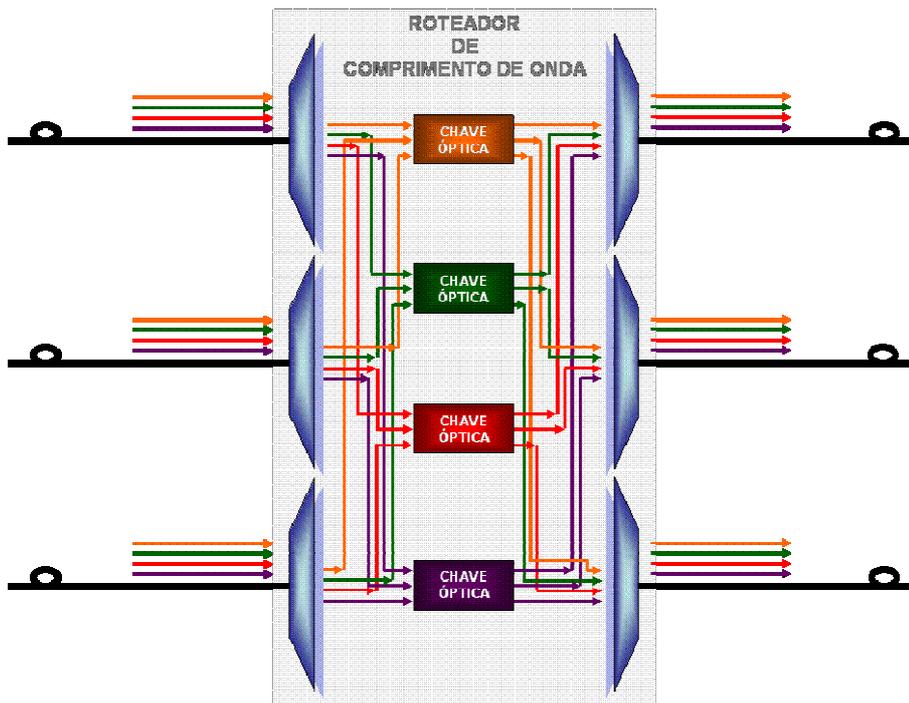


**Figura 2.2 – Equipamentos WDM 1ª geração**

Este cenário apresenta uma séria limitação: o encaminhamento está limitado pela conexão pré-estabelecida e cada comprimento de onda incidente em cada nó intermediário já possui um comprimento de onda fixo e porta de saída. Ideal para aplicações com matriz que exigem rotas fixas e pré-definidas e que não exijam capacidade de reconfiguração em caso de falha (por exemplo, comunicação entre equipamentos SDH, centrais trânsito, roteadores gigabit, ...).

Em um cenário seguinte, os nós intermediários deixam de operar como um *switch* óptico com matriz de comutação fixa e passam a apresentar uma solução de comutação mais flexível, que não está restrita a rotas pré-estabelecidas. Com a introdução de chaves ópticas, o nó ganha um nível de inteligência, o que possibilita o roteamento da informação.

Neste segundo cenário, os nós que implementam a facilidade de escolha da melhor rota de saída conforme um determinado critério são denominados de roteador de comprimento de onda.

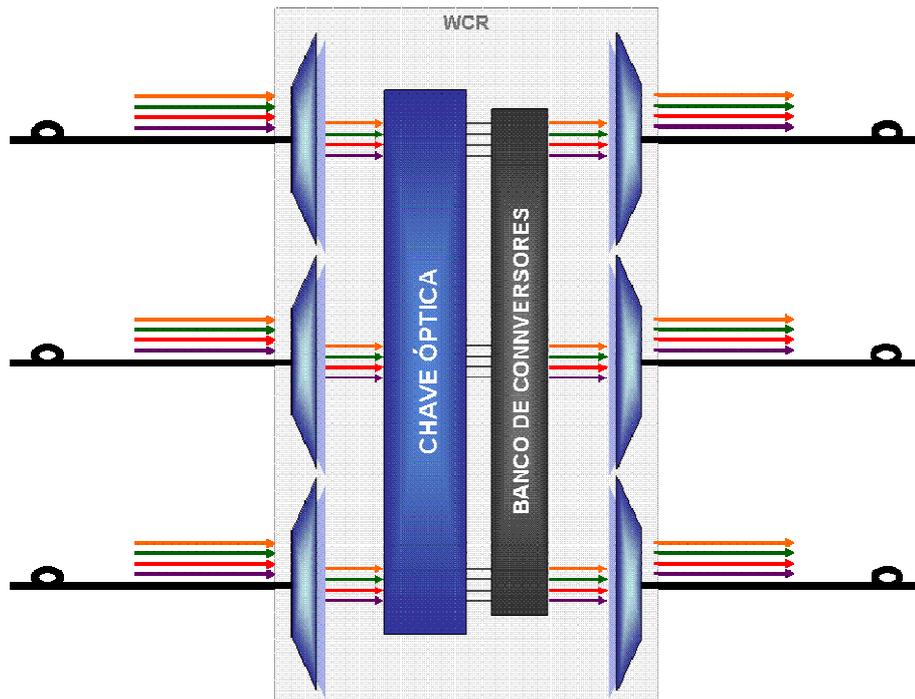


**Figura 2.3 - Roteador de comprimento de onda**

Para realizar a conversão de um comprimento de onda entrante para um comprimento de onda qualquer de saída, os roteadores de comprimento de onda deverão estar equipados com dispositivos capazes de efetuar a troca da portadora óptica que suporta o sinal. Esta tecnologia de chaveamento óptico possibilita que a informação proveniente de um canal de entrada seja roteada por um canal de saída cujo comprimento de onda seja diferente do canal de entrada. Ao dispositivo que implementa esta tecnologia dá-se o nome de conversor de comprimento de onda (*WC - Wavelength Converter*).

Embora envolva tecnologia mais sofisticada, a conversão de comprimento de onda apresenta uma série de vantagens para a rede. A inclusão de conversores leva a um aumento da capacidade de tráfego da rede. A conversão de comprimento de onda permite o reuso do comprimento de onda na rede, a qual passa a requerer, para suportar uma mesma carga de tráfego, um número menor de comprimentos de onda do que se não houvesse esta facilidade [6].

A arquitetura de hardware que utiliza estes conversores é denominada de roteador de comprimento de onda com capacidade de conversão e caracteriza um terceiro cenário das redes totalmente ópticas.



**Figura 2.4 – Roteador de comprimento de onda com capacidade de conversão**

A principal vantagem da implementação de roteadores de comprimento de onda (com ou sem conversão) em redes de comunicação óptica é o fato da rede tornar-se transparente aos sinais transmitidos, sejam eles analógicos ou digitais, com qualquer formato ou taxa de transmissão. Isto significa que, os roteadores fazem o roteamento dos canais sem realizar nenhum processamento do sinal, evitando assim o gargalo eletrônico e o esforço requerido em fazer subir todo o tráfego passante para o domínio elétrico. Apenas transferem o tráfego para o seu destino, sem acessar o conteúdo da informação transportada de qualquer um dos canais ópticos. Desta forma o processamento eletrônico é transferido para os pontos de origem e destino e o processamento dos sinais em trânsito pode, então, ser minimizado [7].

A despeito dos benefícios providos pela tecnologia óptica, a ausência de conversão óptica-elétrica-óptica (O-E-O) limita a distância máxima entre a fonte e destino da informação em virtude dos efeitos intrínsecos da fibra tais como atenuação e dispersão [3]. Com a conversão O-E-O, o sinal é regenerado em cada conversão, melhorando assim a relação sinal-ruído, o que permite alcançar distâncias intercontinentais [4].

No presente documento, com o intuito de simplificar a extensa nomenclatura definida para diversos equipamentos, utiliza-se as siglas WC e WCR para referenciar o roteador de comprimento de onda e roteador de comprimento de onda com capacidade de conversão (que advém de *Wavelength Router* e *Wavelength Convertible Router*, respectivamente) [2].

O avanço da tecnologia óptica viabiliza então a migração do sistema WDM ponto-a-ponto para uma rede totalmente óptica, resultando em um aproveitamento mais eficiente da banda passante disponível e na eliminação da necessidade do roteamento eletrônico nos nós intermediários, que exige sucessivas conversões O-E-O [11].

Nas redes totalmente ópticas, os dados são manipulados exclusivamente no ambiente fotônico pelos WRs, o que resulta na denominação de rede roteada por comprimento de onda. Uma rede roteada por comprimento de onda consiste de um conjunto de WRs com ou sem conversão (nós), interligados por links (arestas), cujo meio de transmissão é composto de fibras ópticas. Cada link de fibra suporta um determinado número de canais ópticos (onde cada canal está associado a um comprimento de onda) multiplexados em WDM e cada WR pode comutar os canais ópticos entrantes de acordo com o comprimento de onda em uso e da disponibilidade de dispositivos de conversão de comprimento de onda (ou seja, se é WCR ou não).

## 2.3

### **Redes Ópticas: Classificação**

Uma conexão estabelecida entre dois WRs, adjacentes ou não, é denominada rota de luz (*lightpath*). Um *lightpath* é o principal mecanismo de transporte em uma rede roteada por comprimento de onda e é caracterizado como uma conexão totalmente óptica, não apresentando qualquer processamento eletrônico ao longo dos nós intermediários que suportam a conexão [2].

Na ausência de WCRs, um *lightpath* só poderá ser estabelecido se e somente se existir um mesmo comprimento de onda livre em todos os segmentos de rede (*hops*) que compõem esta rota, restrição conhecida como continuidade de comprimento de onda (*wavelength continuity constraint*). Conexões que estão sujeitas a esta restrição podem não ser estabelecidas, mesmo havendo

comprimentos de onda livres em todos os segmentos que compõe a rota, resultando em uma utilização não eficiente dos recursos da rede.

O advento da tecnologia de conversão ótica introduz um ganho na rede. A introdução destes conversores nos WRs maximiza a utilização dos recursos da rede, aumentando assim as chances de sucesso no estabelecimento de um *lightpath* para atendimento a uma chamada pois, se há comprimento de onda livre em todos os segmentos (não necessariamente o mesmo comprimento de onda) e se existe pelo menos um conversor disponível em cada nó intermediário (WCR), seguramente uma conexão será estabelecida, aumentando assim a carga injetada na rede. O ganho em desempenho está diretamente relacionado com a quantidade e alocação destes conversores na rede.

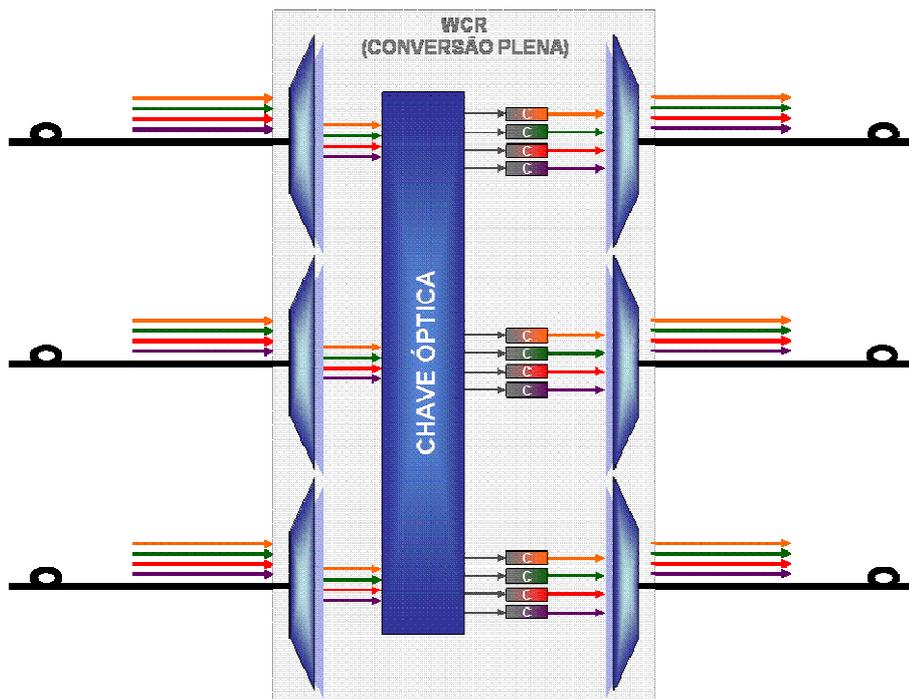
Um parâmetro de avaliação de desempenho de uma rede é a probabilidade de bloqueio. A probabilidade de bloqueio associa uma probabilidade de ocorrência ao não estabelecimento de uma conexão devido à ausência de recursos disponíveis. A ausência de recursos está relacionada a indisponibilidade de portadoras óticas em qualquer um dos segmentos ou conversores de comprimento de onda nos WCRs ou, somente, na indisponibilidade de canal óptico, em redes que possuem a restrição de continuidade de comprimento de onda.

É esperado que a probabilidade de bloqueio média de uma determinada conexão seja menor quando a rede emprega conversão de comprimento de onda, mas é necessária uma análise quantitativa e qualitativa do quanto este ganho relativo representa. Distinguir-se-á aqui a situação onde nenhum dos nós possui capacidade de conversão, da situação em que todos os nós possuem conversores, denominando-as conversão zero (CZ) e conversão total (CT), respectivamente [9]. Embora sejam dois extremos importantes, entre eles há uma variedade de casos intermediários, que permite classificar as redes de terceira geração conforme distribuição dos conversores óticos [12]. A classificação é feita levando-se em consideração a quantidade de WCRs na rede bem como a capacidade de conversão dos roteadores. A capacidade de conversão dos WCRs está relacionada com o número de conversores óticos no banco de conversores.

Um nó com capacidade plena de conversão (CP) significa dizer que, se o nó está equipado com dispositivos de conversão, assume-se que este possua dispositivos suficientes no seu banco de conversores tal que todos os sinais

entrantes possam ser comutados de um canal óptico para qualquer outro, simultaneamente. A figura 2.5 ilustra um nó com capacidade plena de conversão.

Considere que uma rede em que todos os nós são CP seja composta de  $N$  nós. Se cada nó possui  $D$  interfaces ópticas e em cada interface são transmitidos  $W$  comprimentos de onda, então, esta rede deverá possuir  $(NxDxW)$  conversores para prover capacidade plena de conversão em todos os nós.



**Figura 2.5 – Nó com capacidade plena de conversão**

Uma rede que possui capacidade plena (CP) de conversão em todos os nós é classificada como completa e plena (*full complete ou CT*). Redes CT são as que, teoricamente, devem apresentar uma menor probabilidade de bloqueio. Entretanto, elas requerem uma quantidade superior de conversores (visto que todos os nós possuem capacidade plena de conversão), principalmente se a rede suporta um número elevado de comprimentos de onda, o que, em um primeiro momento, inviabiliza a solução pelo alto custo da tecnologia de conversão [12].

Soluções alternativas as Redes *Full Complete* estão sendo investigadas. Uma alternativa é reduzir o número de nós com capacidade plena (CP) de conversão, o que resulta nas Redes Esparsas.

Redes Esparsas são caracterizadas por, supondo redes com  $N$  nós, somente um pequeno número  $n$  de nós (nós críticos) possuem capacidade plena de conversão ( $n \ll N$ ). Nesta classe, a grande questão é definir o melhor subconjunto de nós e prover a estes capacidade plena de conversão. No campo de pesquisa de Redes Esparsas, existem diversos algoritmos e heurísticas que abordam diferentes mecanismos de alocação de conversores [13, 14, 4, 15, 16, 9].

Suponha uma rede esparsa e que um determinado nó deva possuir  $(D \times W)$  conversores para prover capacidade plena de conversão. Esta solução ainda possui um custo bastante elevado, principalmente por que, conforme estudos, apenas uma pequena parcela de conversores são utilizados em condições normais de operação de uma rede. Estudos concluíram que, prover capacidade plena de conversão a poucos nós da rede é ainda economicamente desvantajoso e, principalmente, tecnicamente desnecessário [17], devido ao dimensionamento *over-provisioning* dos grandes backbones.

Um outra alternativa as Redes *Full Complete* que também estão sendo investigadas são as Redes Parciais. As Redes Parciais são uma alternativa relevante pois possuem um comprometimento entre desempenho e custo bastante interessante, de forma que o nó com capacidade de conversão não possui capacidade plena de conversão. Na verdade, possui capacidade limitada de conversão, definida por uma quantidade de conversores ( $N_c$ ) menor que o número de canais de saída ( $N_c \ll D \times W$ ). Neste caso, a quantidade  $N_c$  de conversores é compartilhada por todas as interfaces de saída.

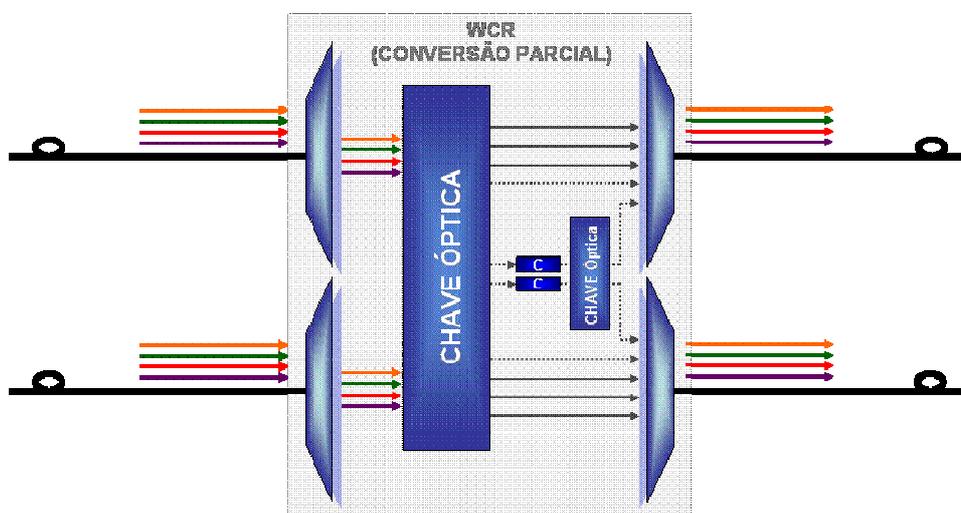


Figura 2.6 – Nó com capacidade de conversão parcial

A Figura 2.6 exemplifica um nó com capacidade de conversão parcial. Enquanto que, para prover capacidade plena de conversão são necessários 8 conversores, nesta arquitetura utiliza-se somente 2 conversores. E o mais interessante é que, mesmo com capacidade limitada de conversão, o desempenho da rede parcial é satisfatório.

O foco principal deste estudo é investigar o comportamento das redes parciais em relação aos casos extremos CT e CZ e propor três esquemas de alocação de conversores, comparando-os com metodologias de alocação convencionais.

Redes Parcialmente Esparsas são um caso especial da classe anterior, onde somente um número pequeno de nós possui capacidade limitada de conversão.

A tabela a seguir sumariza as quatro classes de rede sob o aspecto de conversão de comprimento de onda.

**Tabela 2.1 – Classes das Rede 3ª Geração**

<i>REDE</i>	<i>NÓS COM CONVERSÃO</i>	<i>CAPACIDADE DE CONVERSÃO</i>
Completa e Plena	Todos	Ilimitado (Capacidade plena de conversão)
Esparsa	Poucos Nós	Ilimitado
Parcialmente Esparsa	Poucos Nós	Limitado
Parcial	Sem restrição	Limitado

As classes “parcialmente esparsa” e “parcial”, onde há somente capacidade limitada de conversão de comprimento de onda restrita a um subconjunto de nós, são a área de estudo deste trabalho. Por motivos de simplicidade, o presente trabalho não distingue estes dois tipos de rede e trata ambas como redes parciais apenas.

Independente da classe a que pertence uma determinada rede, algumas premissas são consideradas, com relação ao princípio de funcionamento dos conversores ópticos:

- ▼ Cada conversor possui somente um par de portas de entrada/saída;
- ▼ A conversão pode ser feita de qualquer portadora de entrada para qualquer portadora em qualquer porta de saída do WCR (conversão com cobertura em toda faixa dinâmica de operação);
- ▼ Os conversores são compartilhados entre todas as interfaces de entrada para qualquer interface de saída.

Para cada classe, existem formulações matemáticas cujo propósito é calcular a probabilidade de bloqueio média da rede, levando em consideração as particularidades de cada uma delas.

Os modelos usados em redes ópticas possuem uma série de fatores em comum. Estas similaridades surgem porque é preciso fazer certas assertivas para manter os cálculos viáveis. Por exemplo, a maioria dos modelos assume que o número de comprimentos de onda disponíveis em cada enlace da rede é constante, e que as sessões necessitam de toda a banda do canal óptico em todos os enlaces da rota. Além disso, o processo estocástico de chegada de novas solicitações é tido como um processo de Poisson, usado no modelo de tráfego telefônico. Alguns trabalhos consideram a correlação do tráfego enlace a enlace, enquanto outros freqüentemente assumem que as cargas nos diferentes enlaces são independentes. Em alguns casos, um modelo de conversão total (CT) é usado para aproximar um modelo de conversão zero (CZ). O bloqueio de conexões é calculado como uma medida de desempenho da rede.

Além da classe a que pertence uma determinada rede, existem outros fatores que influenciam diretamente na probabilidade de bloqueio em uma rede. A classe informa se a rede restringe o estabelecimento de uma chamada a um mesmo comprimento de onda (restrição de continuidade de comprimento de onda) além de informar a disponibilidade de WCRs bem como a capacidade de conversão dos dispositivos conversores. Porém, fatores como a topologia da rede, quantidade de portadoras ópticas em cada enlace de fibra, tipo de tráfego (estático e/ou dinâmico que está associado ao conceito de comutação de circuito e/ou pacote, respectivamente), a carga gerada por usuário, a interação entre o tráfego por cada um dos usuários da rede bem como o algoritmo de roteamento e alocação de conversores (*RWA – Routing and Wavelength Assignment*), são fundamentais no

projeto de redes totalmente ópticas. Todos estes requisitos influenciam diretamente a probabilidade de sucesso no estabelecimento de uma conexão de usuário.

Cabe enfatizar que uma conexão óptica é estabelecida para suportar o tráfego gerado por uma requisição de um ponto de entrada (ingresso) até um ponto de saída (egresso). Esta conexão utiliza uma rota definida conforme algoritmo de roteamento suportado pelo sistema de comunicação.

Soluções para o problema de alocação de conversores em redes parciais ainda são bastante limitadas, principalmente se comparada com a diversidade de algoritmos que tratam este problema em redes do tipo esparsas.

O objetivo deste trabalho é apresentar (1) três metodologias de alocação de conversores de onda em redes parciais, (2) apresentar os resultados obtidos com estas metodologias e (3) comparar com os resultados obtidos através dos algoritmos propostos em [17] e [2] e algoritmos convencionais de alocação. A relevância do presente estudo está diretamente relacionada ao pequeno número de estudos realizados neste cenário específico e, principalmente, a necessidade imediata devido as limitações da tecnologia atual.

Em geral, há duas estratégias sub-ótimas de alocação de conversores de comprimento de onda em redes totalmente ópticas. Uma faz uso de simulações para gerar estatísticas do comportamento da rede, e então determinar a distribuição sub-ótima. A outra usa algum modelo matemático para calcular a probabilidade aproximada de bloqueio na rede, e então calcula o arranjo de nós com capacidade de conversão que minimiza a probabilidade de bloqueio.

Em [2] e [18], são usadas estatísticas geradas a partir de simulações para encontrar um conjunto de nós para alocação dos conversores de comprimento de onda. Na simulação, assume-se que cada nó possua capacidade plena de conversão de comprimentos de onda. Para cada nó, obtém-se dois parâmetros: o número médio de conversores utilizados e o número máximo de conversores utilizados simultaneamente. Com o fim da simulação, utiliza-se as estatísticas de ocupação dos dispositivos de conversão para otimização, que tem por objetivo alocar os conversores de acordo com a utilidade média de todos os conversores.

Em [17], faz-se uso de outra abordagem para encontrar o arranjo de nós com capacidade limitada de conversão. Neste, o modelo matemático é simplificado, levando-se em consideração somente o bloqueio devido a indisponibilidade de

conversores. Aplica-se então o mecanismo guloso de alocação de conversor para cálculo do arranjo sub-ótimo.

Os modelos matemáticos apresentados em [1] e [17] bem como a estratégia de alocação utilizada em [17] são comentados no decorrer deste trabalho.