

Proposta de rede de interconexão WDM com controle TDM

João Angelo Martini

Departamento de Informática, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá-Paraná, Brazil.

RESUMO. Este artigo apresenta uma proposta de rede de interconexão WDM com controle TDM e discute os princípios da tecnologia WDM. O artigo também classifica as redes de interconexão WDM e discute as arquiteturas de redes de interconexão e os protocolos de controle.

Palavras-chave: redes de interconexão, WDM, arquiteturas paralelas.

ABSTRACT. **Proposal of WDM interconnection network with TDM control.** This article presents a proposal for a WDM interconnection network with TDM control and discusses principles of WDM technology. It also classifies WDM interconnection networks and discusses interconnection network architectures as well as the protocols for control.

Key words: interconnection networks, WDM, parallel architectures.

Fundamentos da técnica WDM

As fibras ópticas têm um imenso potencial de largura de banda, aproximadamente 50 Tb/s, o que tem motivado esforços de pesquisa no sentido de explorar esse potencial na área de redes de comunicação. A técnica WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é um método promissor que pode ser usado para explorar a largura de banda da fibra óptica. O espectro de transmissão óptico é dividido em comprimentos de onda que correspondem a canais de comunicação. Esses canais podem ser operados assincronamente e em paralelo em qualquer velocidade. Assim, permitindo-se que múltiplos canais WDM sejam transmitidos na mesma fibra, pode-se explorar a largura de banda da fibra.

Existem duas regiões de baixa atenuação da fibra óptica (Borella *et al.*, 1997). Uma região está centrada em aproximadamente 1.300 nm e corresponde a uma faixa de 200 nm, em que a atenuação é menor que 0,5 dB/Km. A largura de banda total dessa região é de cerca de 25 THz. A outra região está centrada em 1550 nm e apresenta atenuação em torno de 0,2 dB/Km. Combinadas, essas duas regiões têm um potencial de proporcionar uma largura de banda de 50 THz.

Um sistema de comunicação baseado na técnica WDM é mostrado na Figura 1. Nesse sistema, transmissores laser emitem luz em diferentes comprimentos de onda que são acoplados em uma

fibra óptica através de um multiplexador ou combinador passivo. O sinal, com múltiplos comprimentos de onda, pode ser distribuído para os nós de destino por um acoplador estrela passiva. Em cada nó receptor, um filtro óptico sintonizável permite que apenas um dos comprimentos de onda (canais) passe e seja detectado.

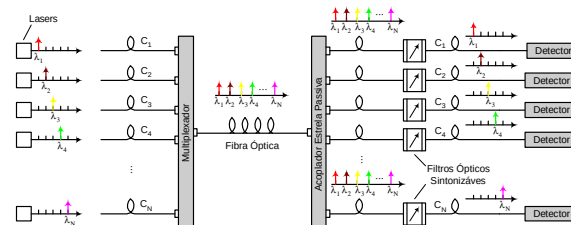


Figura 1. Sistema de comunicação WDM

A parte de transmissão do sistema pode consistir de um ou mais transmissores ópticos, os quais podem ser fixos, isto é, com sintonia fixa em um determinado comprimento de onda, ou sintonizáveis em uma faixa de comprimentos de onda.

Quando múltiplos transmissores são usados, é necessário utilizar-se de um multiplexador para combinar os sinais dos diferentes transmissores laser em uma única fibra. A parte de recepção pode consistir de um filtro sintonizável, seguido por um fotodetector ou um demultiplexador, seguido por um arranjo de fotodetectores. Esses dispositivos estão representados na Figura 2.

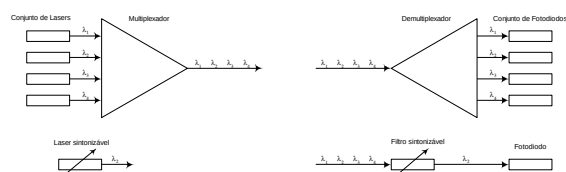


Figura 2. Receptores, transmissores, multiplexadores e demultiplexadores

A Figura 3 mostra outros dispositivos empregados no projeto de sistemas WDM: *splitter*, combinador, acoplador e acoplador estrela passiva. Um *splitter* divide o sinal óptico numa fibra para duas ou mais fibras. O *splitter* mais comum é de 1x2. Já o combinador, combina dois ou mais sinais em uma única fibra. O acoplador é um combinador 2x1, seguido imediatamente de um *splitter* 1x2. Sua função é realizar *broadcast* dos dois sinais de entrada para as duas saídas. O acoplador estrela passiva (PSC - *Passive Star Coupler*) é um dispositivo multiporta que permite que um sinal proveniente de qualquer porta de entrada seja enviado (*broadcast*) para todas as portas de saída. A Figura 3 mostra uma forma de se implementar um PSC 16x16, usando uma combinação de *splitters*, combinadores e acopladores.

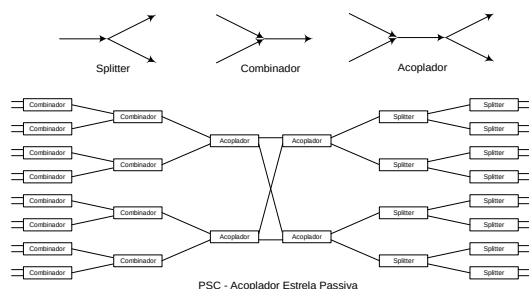


Figura 3. Splitter, Combinador, Acoplador e PSC

Classificação de Redes WDM. As redes WDM podem ser classificadas em: *single-hop* e *multihop*. Nas redes *single-hop*, todos os nós podem se comunicar diretamente. Em redes *multihop*, um nó pode se comunicar diretamente com apenas alguns poucos nós. Para atingir outros nós além daqueles que estão diretamente conectados a ele, um nó deve enviar suas mensagens através de nós intermediários, até atingir o destino desejado.

Para ajudar a entender melhor os diferentes tipos de redes *single-hop*, Mukherjee (Mukherjee, 1992) desenvolveu uma taxonomia para redes WDM que tem sido extensivamente utilizada, baseada nos tipos de transmissores e receptores utilizados na rede. Nessa classificação há quatro tipos de redes:

- **FT-FR** (*Fixed Transmitters-Fixed Receivers*): São redes com transmissores e receptores fixos

em um determinado comprimento de onda. Essas redes são pouco flexíveis, pois a comunicação é sempre fixa entre dois pontos específicos.

- **TT-FR** (*Tunable Transmitters-Fixed Receivers*): Essas redes têm transmissores que podem ser sintonizados para diferentes canais, enquanto que os receptores podem receber dados apenas em um canal. São redes bastante flexíveis, que permitem que qualquer transmissor envie dados para qualquer receptor.
- **FT-TR** (*Fixed Transmitters-Tunable Receivers*): Essas redes usam transmissores fixos em um determinado comprimento de onda, mas receptores sintonizáveis que determinam de qual transmissor receberão informação. Também são redes bastante flexíveis que têm uma importante vantagem, podem implementar facilmente *multicast* (um grupo de receptores sintoniza para o mesmo comprimento de onda).
- **TT-TR** (*Tunable Transmitters-Tunable Receivers*): São as redes mais flexíveis, com todos os dispositivos sintonizáveis, o que permite um grande número de arranjos no processo de comunicação. No entanto, exigem protocolos de controle de acesso mais complexos.

As redes podem também ser caracterizadas em função de apresentarem ou não canais de controle para coordenar as comunicações. A notação elaborada com base nessa taxonomia é representada da seguinte forma: $CC-FT^iTT^j-FR^mTR^n$. Isso significa que um nó tem i transmissores fixos, j transmissores sintonizáveis, m receptores fixos e n receptores sintonizáveis. A sigla CC indica que a rede possui canal dedicado ao controle, que coordena as comunicações através dos canais de dados. A ausência dessa sigla indica que a rede não emprega um canal dedicado ao controle.

Arquiteturas e Protocolos de Redes WDM

A estrutura de interconexão de uma rede define o seu padrão de comunicação, isto é, a maneira como os dados são transmitidos entre os nós na rede. Os três modelos básicos que têm sido usados nos projetos de redes são as configurações: barramento, anel e estrela. A configuração de barramento raramente tem sido usada para redes WDM. A rede baseada em anel é mais robusta contra quebras de fibra. A configuração estrela passiva é a mais amplamente utilizada, devido a sua melhor distribuição de potência.

Em qualquer rede com acesso compartilhado aos canais, é necessário um protocolo para evitar ou para tratar colisões. Há três tipos de colisões:

- As colisões de canal, em que dois nós tentam enviar uma mensagem pelo mesmo canal simultaneamente.
- As colisões de receptor, em que dois nós tentam enviar mensagens para o mesmo destino ao mesmo tempo.
- Outro tipo de colisão de receptor ocorre quando um destino não pode receber um dado endereçado a ele porque seu receptor está sintonizado no comprimento de onda de outro canal para receber dados de outra fonte.

Em geral, os protocolos podem ser classificados como sendo de atribuição fixa ou de acesso randômico (Mukherjee, 1992). Os esquemas de atribuição fixa são baseados na técnica TDM, dividem o tempo em ciclos, durante os quais os nós podem efetuar suas transmissões. Já os protocolos de acesso randômico podem ser divididos em dois tipos: com coordenação de pré-transmissão e sem coordenação de pré-transmissão.

Os protocolos sem coordenação, em geral, apresentam a configuração TT-FR, em que todos os nós transmissores sabem em qual comprimento de onda o receptor de destino está sintonizado. Assim, cada transmissor deve ser capaz de sintonizar em todos os canais utilizados na rede. Os protocolos com coordenação normalmente usam um canal dedicado ao controle, através do qual informa-se o nó de destino que há um pacote endereçado a ele e em que canal deve sintonizar seu receptor.

Características de Redes de Interconexão WDM

As interconexões eletrônicas tradicionais, como barramento compartilhado ou redes de interconexão multi-estágio, apresentam limitações como: velocidade, complexidade de controle e escalabilidade (Stone e Cocke, 1991, Louri e Sung, 1994, Borella *et al.*, 1994)

Por exemplo, algumas das limitações das redes multi-estágio são (Wu e Feng, 1980):

- Redes multi-estágio como a rede Delta (Patel, 1981), não podem realizar permutações arbitrárias num único passo, ou seja, para transferir informação, é necessário passar por vários estágios, além disso, algumas combinações de pares de nós entrada-saída podem ocasionar conflitos, mesmo que os destinos requeridos pelos nós fontes sejam distintos.
- Um outro aspecto a se considerar, trata da complexidade do mecanismo de controle da

rede, que tem de resolver conflitos e decidir a rota a cada estágio da rede.

Essas limitações conduziram a um esforço para o desenvolvimento de redes que utilizam tecnologia óptica. Nesse contexto, insere-se a tecnologia WDM (Willner, 1997, Senior *et al.*, 1998, Borella *et al.*, 1997), pois as redes baseadas na técnica WDM utilizam com melhor eficiência a banda de passagem disponível nas fibras ópticas, multiplexando sinais e utilizando transmissores e receptores sintonizados em frequências diferentes para estabelecer canais ponto-a-ponto independentes. As redes baseadas em WDM têm algumas vantagens sobre as redes eletrônicas convencionais (Borella *et al.*, 1994):

- **Largura de Banda:** A largura de banda de uma fibra é de 25THz (Willner, 1997, Borella *et al.*, 1994) e há sistemas comerciais operando em Gb/s (Ryan, 1998, Ramaswami e Sivarajan, 1998) e sistemas experimentais em Tb/s (Willner, 1997, Ryan, 1998, Ramaswami e Sivarajan, 1998, Shi *et al.*, 1998, Taga *et al.*, 1998, Terahara *et al.*, 1998, Aisawa *et al.*, 1998, Chen *et al.*, 1998).
- **Baixo Nível de Perdas:** Em seu comprimento de onda de atenuação mínima, 1,55 μm , a perda é da ordem de 0,2 dB/Km, enquanto que num cabo coaxial de cobre a perda é de 2,5 dB/Km em um sinal de 1 MHz e mais de 50 dB/Km em 1 GHz (Willner, 1997).
- **Escalabilidade:** A perda de potência em um barramento comum cresce linearmente com o número de processadores e num acoplador estrela passiva (PSC - *Passive Star Couple*) cresce logaritmicamente (Borella *et al.*, 1994, Borella *et al.*, 1997).
- **Modularidade:** Na maioria dos sistemas *single-hop*, um nó pode ser acrescentado à rede sem necessidade de se reprojeter o sistema todo (Senior *et al.*, 1998, Mukherjee, 1992).
- **Transparência de Protocolo:** Cada canal pode ser operado independentemente e pode usar um protocolo de comunicação diferente (Ramaswami e Sivarajan, 1998).
- **Multicasting:** *Broadcasting* e *multicasting* são viabilizados em uma rede WDM devido à natureza *broadcast* do acoplador PSC.

Em termos de desempenho, a chave *crossbar* parece ser a opção mais adequada para o papel de rede de interconexão de alta velocidade, pois possui uma conexão de cada elemento de processamento para todos os outros. Entretanto, a desvantagem da chave *crossbar* é a sua complexidade e custo de implementação. A tecnologia WDM viabiliza a implementação de chaves *crossbar*, visto que os sinais

ópticos podem ser distribuídos sem interferências por meio de um acoplador estrela passiva (Webb e Louri, 1998). Essas características tornam a tecnologia WDM uma promissora candidata a desempenhar o papel de rede de interconexão de arquiteturas paralelas.

Um exemplo de um sistema paralelo utilizando uma rede de interconexão baseada em WDM é mostrado na Figura 4.

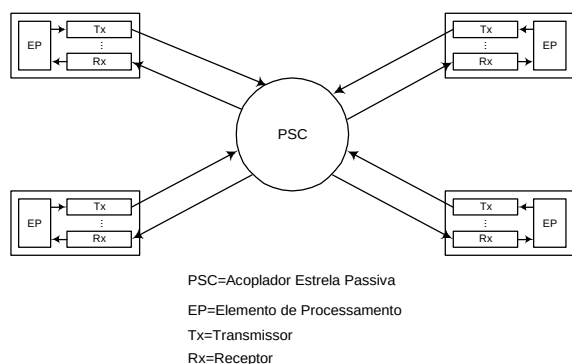


Figura 4. Arquitetura paralela com rede de interconexão WDM

Nesse sistema, cada nó tem transmissores e receptores e está conectado ao PSC através de fibras. Cada nó pode transmitir para o acoplador e receber do mesmo. Para transmitir o nó, sintoniza um transmissor para um determinado comprimento de onda e envia a informação. O acoplador recebe a informação e a distribui naquele comprimento de onda para todos os nós. Para receber a informação, um nó deve sintonizar um receptor naquele comprimento de onda.

Exemplos de desenvolvimentos teóricos e experimentais de redes WDM

Alguns exemplos de desenvolvimentos teóricos e experimentais na área de redes WDM são apresentados nas subseções seguintes.

Projeto Rainbow. Os projetos Rainbow (Ramaswami e Savarajan, 1998), desenvolvidos pela IBM, foram um dos primeiros projetos experimentais de redes WDM *single-hop*. Usavam acopladores estrela passiva 32x32 e uma configuração FT-TR (Figura 5). Os receptores tinham tempo de sintonia em torno de 25 ms, o que viabilizava o uso do Rainbow I apenas para aplicações com chaveamento por circuito. O Rainbow I tinha taxa de transmissão de 300 Mb/s sobre cada canal. Utilizava um protocolo de acesso do tipo randômico, baseado na técnica de *polling* executado em cada receptor. O Rainbow II tinha como objetivos aumentar a taxa de transmissão para 1 Gb/s

por canal e viabilizar a comunicação de chaveamento por pacotes.

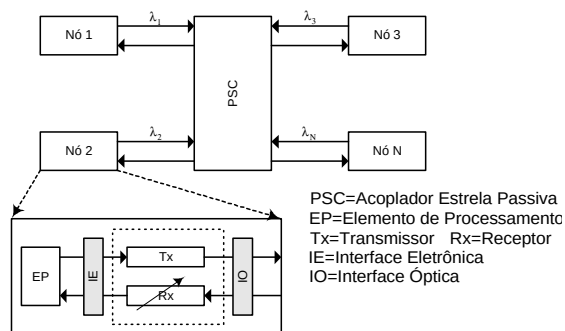


Figura 5. Arquitetura do projeto IBM Rainbow

Redes Multihop. As redes *single-hop* apresentavam dois desafios a serem superados. O primeiro correspondia à necessidade de sintonização rápida para o comprimento de onda desejado no transmissor e/ou receptor. E o segundo referia-se ao desenvolvimento de protocolos eficientes para alocação de canais para efetuar as conexões na rede.

Nesse contexto, as redes *multihop* aparecem como uma alternativa para evitar alguns problemas. Pois nesse modelo de rede, cada nó precisa acessar apenas um pequeno número de canais. Transmissores e receptores fixos são usados para esse propósito e a configuração mínima emprega um único receptor e um único transmissor, sintonizados em comprimentos de onda diferentes.

Embora a arquitetura física possa ser idêntica a de uma rede *single-hop*, por exemplo, uma estrela passiva (PSC), o padrão de sintonização dos transmissores e receptores permite criar uma topologia *multihop* virtual. Alguns exemplos interessantes de redes *multihop* são: rede GEMNET (Borella *et al.*, 1994), Grafos de Kautz e Starnet (Chiang *et al.*, 1996).

GEMNET. Uma estrutura *multihop* interessante é a rede GEMNET, que é baseada no conceito *shuffle-exchange* e que pode representar uma família de estruturas de redes. Há muitas configurações possíveis para a GEMNET. Em uma GEMNET (K, M, P), K é o número de colunas, M é o número de linhas e P o grau do sistema, isto é, o número de conexões de cada nó com os nós adjacentes, e há $N = KM$ nós.

Grafos de Kautz. O grafo de Kautz é uma topologia lógica, candidata a desempenhar o papel de rede WDM *multihop*. Essa topologia usa a seguinte notação $K(d,k)$, em que d é o grau ou conectividade

da rede, e k é o diâmetro do grafo. Os nós são arranjados em círculos concêntricos, e o número de nós na rede é igual a $N = d^k + d^{k-1}$.

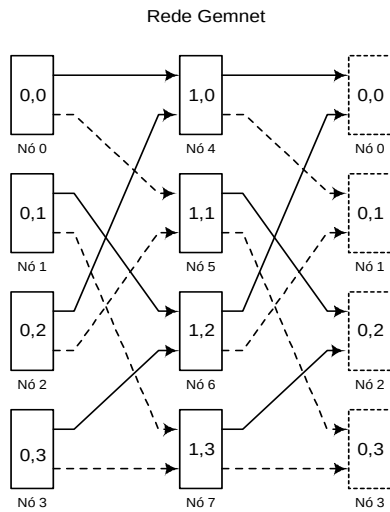


Figura 6. Rede GEMNET (2,4,2)

Há um esquema de rotulação para os nós que estabelece as conexões entre eles e o roteamento dos pacotes através da rede. Os nós são rotulados usando-se palavras da forma $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ com comprimento igual ao diâmetro do grafo (k). Existe um conjunto de $d+1$ elementos x_i para formar as palavras. A regra para formar as palavras é a seguinte: palavras com duas ou mais letras idênticas consecutivas são removidas.

Por exemplo, para um grafo de Kautz $K(2,2)$ o alfabeto para formar as palavras é constituído por: $(0,0)$, $(0,1)$, $(0,2)$, $(1,0)$, $(1,1)$, $(1,2)$, $(2,0)$, $(2,1)$, $(2,2)$. Assim, eliminando-se as palavras, seguindo a regra temos a seguinte rotulação dos nós: $(0,1)$, $(1,0)$, $(1,2)$, $(2,1)$, $(0,2)$ e $(2,0)$.

Para estabelecer as conexões, há uma outra regra: existe uma conexão do nó x para o nó y se e somente se as últimas $(k-1)$ letras do rótulo de x são as mesmas que as primeiras $(k-1)$ letras de y . Por exemplo, há uma conexão de $(0,1)$ para $(1,0)$, pois a rotulação do primeiro nó termina com 1 e a do segundo começa com 1. As conexões representam o compartilhamento de um comprimento de onda comum. A correspondência do dígito final de um nó com o dígito inicial de outro indica a sintonização do transmissor do primeiro nó para o receptor do segundo nó. A Figura 7 mostra uma rede de grafo de Kautz $(2,2)$.

O grau da rede é fixo e independente de N . Desse modo, pode-se construir uma rede com um tamanho arbitrário e permitir que os nós tenham um número fixo de transmissores e receptores. Como a

rede tem grau d , há pelo menos d possíveis rotas entre qualquer fonte e qualquer destino viabilizando a tolerância a falhas.

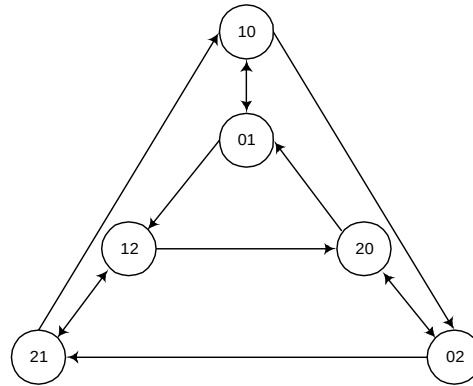


Figura 7. Grafo de Kautz $K(2,2)$

Starnet. A rede Starnet, desenvolvida pela Universidade de Stanford, tem como alvo proporcionar chaveamento por circuito e por pacotes. Para isso, foi implementada com duas sub-redes e os nós foram ligados através de um acoplador estrela passiva. Cada nó tem duas fibras ligadas ao acoplador estrela passiva, uma conectada ao transmissor e outra ao bloco receptor. Esse bloco é formado por dois receptores, um para cada sub-rede.

A Figura 8 mostra a arquitetura da Starnet, um anel lógico implementado com uma estrela física. Receptores sintonizáveis são usados para implementar a sub-rede de chaveamento por circuito, o que permite que a sub-rede possa ser reconfigurada. A rede de chaveamento por pacotes é configurada como um anel lógico, usando receptores fixos em cada nó, sintonizados no comprimento de onda do nó anterior.

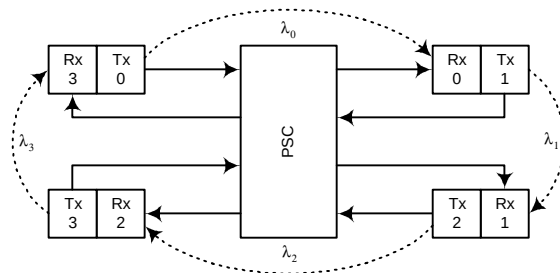


Figura 8. Arquitetura Starnet

Dispositivos de Redes WDM. Esta seção apresenta algumas características atuais dos dispositivos mais essenciais utilizados na implementação de uma rede WDM, que são os transmissores e receptores. Isso possibilita uma visão mais abrangente do

desenvolvimento da área através da comparação com o projeto Rainbow descrito anteriormente.

As Tabelas 1 e 2 (Borella *et al.*, 1997) apresentam características de diferentes tipos de transmissores e receptores sintonizáveis. O Rainbow empregava filtros com tempos de sintonia de cerca de 25 ms. Os dispositivos mais recentes já operam com tempos de sintonia bem menores, como por exemplo, os filtros LC Fabry-Perot com tempos de sintonia de 0,5 a 10 μ s. Isso mostra o desenvolvimento ocorrido nos últimos anos em termos dispositivos para redes WDM. Como consequência desse desenvolvimento, alguns projetos que foram elaborados para operarem com chaveamento por circuito em função de tempos de sintonia elevados, poderiam hoje ser voltados para aplicações de chaveamento por pacotes, visto que os tempos de sintonia foram bastante reduzidos.

A redução dos tempos de sintonia dos dispositivos pode alterar o cenário em relação a alguns sistemas baseados em arquiteturas *multihop*. Pois as arquiteturas *multihop* eram uma alternativa às *single-hop* em função da necessidade de sintonização de dispositivos que esta última exigia. Com a melhoria das latências de sintonização dos transmissores e filtros, as arquiteturas *single-hop* podem tornar-se mais atrativas que as *multihop*.

Tabela 1. Características de transmissores sintonizáveis

Transmissor Sintonizável	Faixa de Sintonia (nm)	Tempos de Sintonia
Mecânico	500	1-10 ms
Acústico-óptico	83	10 μ s
Eletro-óptico	7	1-10 ns
Injeção de corrente	10	1-10 ns

Tabela 2. Características de receptores sintonizáveis

Receptor Sintonizável	Faixa de Sintonia (nm)	Tempos de Sintonia
Fabry-Perot	500	1-10 ms
Acústico-óptico	250	10 μ s
Eletro-óptico	16	1-10 ns
LC Fabry-Perot	30	0,5-10 μ s

A melhoria de desempenho desses dispositivos viabilizou experimentos com altas taxas de transmissão. No Japão, três experimentos podem ser citados. O primeiro, desenvolvido pelo Fujitsu Laboratories Ltd., transmitiu 1,1 Tb/s sobre 150 Km de fibra usando 55 canais WDM, cada um em 20 Gb/s. O segundo, desenvolvido pela Nippon Telegraph and Telephone Corp., enviou 1 Tb/s sobre 40 Km de fibra com 10 *lasers* WDM em 100 Gb/s. E o terceiro, mais recente, desenvolvido pela NEC Corp., demonstrou a transmissão de 2,6 Tb/s usando 126 canais, cada um em 20 Gb/s. Por fim, um projeto desenvolvido pelo AT&T Laboratories transmitiu 1 Tb/s sobre 55 Km com 50 sinais em 20 Gb/s (Willner, 1997).

Como consequência do desenvolvimento e rápido amadurecimento da área de redes WDM, a *International Telecommunication Union* (ITU) elaborou um padrão para os sistemas baseados em WDM, com um comprimento de onda de referência em cerca de 1,5525 μ m e com espaçamento de canais em torno de 0,8 nm. Produtos comerciais baseados nesses padrões estão disponíveis comercialmente e podem operar numa taxa de 10 Gb/s (Willner, 1997).

Rede de Interconexão WDM baseada no protocolo de controle TDM

O modelo de rede de interconexão proposto neste trabalho é baseado na técnica TDM (*Time Division Multiplexing*) (Mukherjee, 1992). A arquitetura da rede é baseada no sistema WDM *single-hop*. Cada nó da rede recebe dados através de um canal (comprimento de onda) específico. Dessa forma, um nó transmissor que queira transmitir para um determinado destino deve ter seu transmissor sintonizado no comprimento de onda específico do receptor de destino desejado.

O controle para transmissão é realizado durante o período de tempo denominado de ciclo de controle. Após o ciclo de controle, é realizada a transmissão do pacote de dado, e esse período é então chamado de ciclo de transmissão. No sistema de controle de acesso baseado na técnica TDM, cada nó tem um período de tempo para realizar o controle de transmissão. Cada nó tem um receptor denominado de receptor de verificação, que é usado para verificar se o nó de destino está livre para receber o dado.

O acesso de cada nó ao canal de transmissão de dados é realizado através de um transmissor sintonizável e um receptor fixo. Para transmitir, o nó fonte deve sintonizar seu transmissor no comprimento de onda do nó destino. A recepção de cada nó é realizada através de uma onda portadora independente. Isso evita a dependência do sistema em relação à sintonização dos receptores e também evita colisões de receptores em que o receptor não está sintonizado no comprimento de onda de um determinado nó transmissor.

Esse controle evita colisões de transmissores, pois os nós só transmitem para os destinos que estão livres e nunca iniciam um ciclo de transmissão para o mesmo destino concorrentemente. O ciclo de controle de cada nó é seguido pelo seu correspondente ciclo de transmissão como mostra a Figura 9. Para otimizar a comunicação, os ciclos de controle e de transmissão dos nós podem ser sobrepostos. Enquanto um nó está realizando seu ciclo de transmissão, o outro nó pode realizar seu

ciclo de controle. Isso evita os atrasos que ocorreriam no caso de se esperar que cada nó efetuasse seu ciclo de controle e de transmissão para depois iniciar o mesmo processo para o nó subsequente.

Cada nó tem um período de tempo para realizar seu controle de transmissão. Nesse período de controle, o nó sintoniza seu receptor de verificação no comprimento de onda do destino e verifica se este está ocupado ou não.

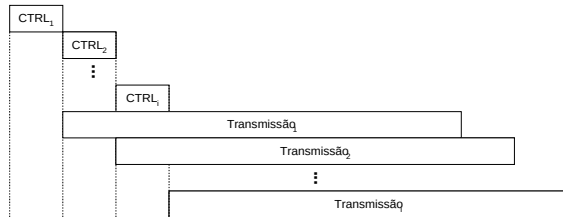


Figura 9. Ciclos de Controle e Transmissão

A duração desse ciclo de controle deve ter um tamanho que seja suficiente para que o dado que porventura esteja sendo transmitido por algum outro nó atinja o destino. Assim, o nó que está fazendo a verificação de seu destino poderá detectar se ele está livre ou não. Por exemplo, a Figura 10 mostra a transmissão do nó A para o nó C, enquanto o nó B está iniciando seu ciclo de controle. O ciclo de controle do nó B deve durar um período de tempo que seja suficiente para que o dado enviado pelo nó A atinja o destino, no caso o nó C. Se a duração do ciclo de controle for menor que o tempo necessário para que o dado do nó A atinja o nó C, então quando o nó B for verificar seu destino ele não vai detectar a presença do dado no nó C e vai iniciar seu ciclo de transmissão provocando uma colisão com a transmissão, do nó A.

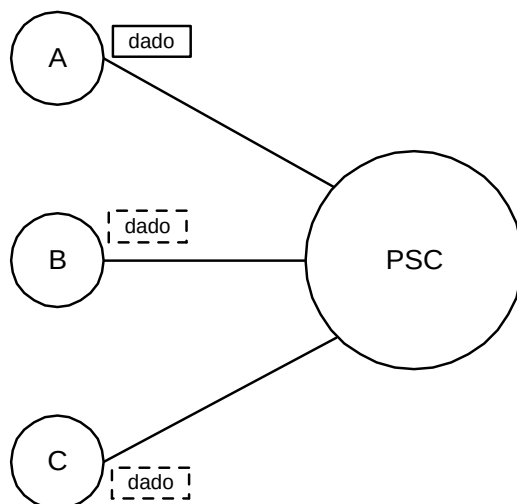


Figura 10. Tempo de Ciclo de Controle

A duração do ciclo de controle apresenta, então, uma relação com a distância entre os nós. Como a velocidade da luz na fibra é aproximadamente $0,7 \star c$, ou seja, cerca de $2,1 \star 10^8$ m/s (Partridge, 1993), sendo c a velocidade da luz no vácuo, para um determinado tempo de controle t_c a distância percorrida pelo sinal é $d = t_c \star 2,1 \star 10^8$ m. Neste trabalho adotou-se o tempo de controle de 1ns, visto que há dispositivos com tempo de sintonia com esse desempenho (Borella *et al.*, 1997), o que implica que a distância máxima entre os nós seja de 21 cm.

A Figura 11 apresenta a estrutura de cada nó em termos de transmissores e receptores para o protocolo de controle TDM.

Cada nó possui:

- Um receptor de verificação sintonizável denominado Rx_c para realizar o controle. Esse receptor é sintonizado no comprimento de onda do nó de destino, assim, o nó emissor pode verificar se o destino desejado está livre ou ocupado.
- Um transmissor sintonizável Tx_D , através do qual pode enviar seu dado para o nó de destino.
- Um receptor de dados fixo Rx_D , através do qual pode receber os dados provenientes dos demais nós do sistema.

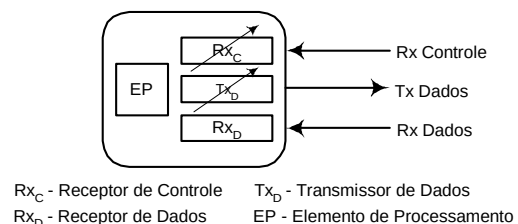


Figura 11. Estrutura de um nó da rede WDM com controle TDM

Essa estrutura emprega apenas três dispositivos para realizar o controle e a transmissão. Esse número reduzido de componentes em cada nó é possível devido à utilização de dispositivos sintonizáveis. Caso se optasse pela utilização de dispositivos fixos, cada nó do sistema deveria ter um transmissor Tx endereçado para cada outro nó, e um receptor de controle Rx_c também endereçado para cada outro nó do sistema. Isso limitaria a expansibilidade do sistema e implicaria na utilização de um número elevado de dispositivos para transmissão e recepção, além de ocupar maior espaço físico.

O modelo de rede de interconexão proposto pode ser classificado de acordo com a taxonomia de Mukherjee, como $TT^1-FR^1-TR^1$. Isso significa que cada nó tem 1 transmissor sintonizável, 1 receptor fixo e 1 receptor sintonizável. A rede usa protocolo de controle híbrido, isto é, utiliza um esquema de atribuição fixa

(controle TDM), sem coordenação de pré-transmissão, e não emprega um canal exclusivo dedicado ao controle.

Este trabalho apresentou uma visão geral de alguns tópicos relacionados à técnica WDM. Introduziu os conceitos básicos e apresentou alguns desenvolvimentos da área de WDM. Apresentou a classificação de redes e protocolos para as mesmas. E propôs um modelo de rede de interconexão WDM com controle TDM.

A rede proposta é otimizada em termos de ciclos de controle e de transmissão, pois viabiliza a sobreposição dos mesmos, proporcionando maior eficiência do sistema de comunicação. Outra vantagem apresentada por essa rede é a inexistência de colisões, o que evita o *overhead* de comunicação que seria gerado caso houvesse necessidade de se tratar colisões.

Esse modelo de rede apresenta independência de receptores sintonizáveis, isto é, evita as colisões de receptores que ocorrem quando o receptor não está sintonizado no comprimento de onda do transmissor que está lhe enviando o dado. Uma outra vantagem é que não se consome tempo na sintonização dos receptores de dados. A rede é opticamente transparente, isto é, a transmissão é realizada totalmente no domínio óptico, sem a necessidade de conversões eletro-ópticas intermediárias.

O modelo de controle proposto tem o potencial de proporcionar alto desempenho para grandes volumes de tráfego, visto que o tempo de ciclo de controle é pequeno, e para um volume grande de tráfego, há sempre algum nó tentando efetuar sua transmissão. Esse modelo de controle pode ser um candidato natural para uma arquitetura do tipo dataflow, visto que a ordem de execução para esse tipo de arquitetura não é relevante; portanto, um nó pode perder a sua vez de transmitir que não vai bloquear a execução de um programa, pois não existe uma sequência pré-determinada de execução do programa.

O modelo de rede proposto emprega apenas três dispositivos por elemento de processamento: dois receptores e um transmissor. O uso de transmissor e receptor sintonizáveis reduz o número de dispositivos necessários para fazer o controle e a transmissão, além de reduzir o custo e o espaço físico.

Referências bibliográficas

- Aisawa, S.; Sakamoto, T.; Fukui, M.; Kani, J.; Jinno, M.; Oguchi, K. Ultra-wideband, long distance WDM demonstration of 1 Tbit/s (50x20 Gbit/s), 600 Km transmission using 1550 and 1580 nm wavelength bands. *Electron. Lett.*, 34(11):1127-1129, 1998.
- Borella, M.S.; Jue, J.P.; Banerjee, D.; Ramamurthy, B.; Mukherjee, B. Optical components for WDM lightwave networks. *Proceed. IEEE*, 85(8):1274-1307, 1997.
- Borella, M.S.; Mukherjee, B.; Jia, F.; Ramamurthy, S.; Banerjee, D.; Iness, J. Optical interconnects for multiprocessor architectures using wavelength-division multiplexing. In: ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 27, 1994, Hawaii. *Proc...* Hawaii, CITR Publications, 1994. p.499-508.
- Chen, C.D.; Kim, I.; Mizuhara, O.; Nguyen, T.V.; Ogawa, K.; Tench, R.E.; Tzeng, L.D.; Yeates, P.D. 1.2 Tbit/s (30 ch x 40 Gbit/s) WDM transmission over 85 Km fibre. *Electron. Lett.*, 34(10):1002-1004, 1998.
- Chiang, T.K.; Agrawal, S.K.; Mayweather, D.; Sadot, D.; Barry, C.F.; Hickey, M.; Kazovski, L.G. Implementation of STARNET: WDM computer communications network. *IEEE JSAC*, 14(15):824-839, 1996.
- Louri, A.; Sung, H. 3D optical interconnects for high-speed interchip and interboard communications. *IEEE Computer*, 27(10):27-37, 1994.
- Mukherjee, B. WDM-Based local lightwave networks: part I: single-hop systems. *IEEE Network*, 12-26, 1992.
- Partridge, C. *Gigabit networking*. 2.ed. Massachusetts, USA: Addison-Wesley, 1993.
- Patel, J.H. Performance of processor-memory interconnections for multiprocessors. *IEEE Transact. Comput.*, C-30(10):771-780, 1981.
- Ramaswami, R.; Sivarajan, K.N. *Optical networks: a practical perspective*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- Ryan, J.P. WDM: north American deployment trends. *IEEE Communic. Magaz.*, 36(2):40-44, 1998.
- Senior, J.M.; Handley, M.R.; Leeson, M.S. Developments in wavelength division multiple access networking. *IEEE Communic. Magaz.*, 36(12):28-36, 1998.
- Shi, H.; Connolly, J.; Alphonse, G.A.; Delfyett Jr. P.J. 20x5 Gbit/s optical WDM transmitter using single-stripe multiwavelength modelocked semiconductor laser. *Electron. Lett.*, 34(2):179-181, 1998.
- Stone, H.S.; Cocke, J. Computer Architecture in the 1990s. *IEEE Computer*, 24(9):30-38, 1991.
- Taga, H. et al. 50 WDM, 10.66 Gbit/s transmission experiment over 1600 Km employing gain-flattened EDFA chain. *Electron. Lett.*, 34(4):382-383, 1998.
- Terahara, T. et al. 0.7 Tbit/s (66x10.66 Gbit/s) WDM transmission over 2212 Km using broadband, high-power EDFA with pump reflector. *Electron. Lett.*, 34(10):1001-1002, 1998.
- Webb, B.; Louri, A. A free space optical crossbar switch using wavelength division multiplexing and vertical-cavity surface-emitting lasers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MASSIVELY PARALLEL PROCESSING USING OPTICAL INTERCONNECTIONS, 5, 1998, Las Vegas. *Proc...* Las Vegas: Editora, 1998. p 50-57.
- Willner, A.E. Mining the optical bandwidth for a terabit per second. *IEEE Spectrum*, 34(4):32-41, 1997.
- Wu, C.; Feng, T. The Reverse-Exchange Interconnection Network. *IEEE Transact. Comput.*, C-29(9):801-811, 1980.

Received on October 21, 1999.

Accepted on November 22, 1999.

