

## Roteamento IP em redes ópticas

Bruno Castro da Silva, Juergen Rochol, Lara Dalto de Souza, Vandersilvio da Silva

<sup>1</sup>Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Caixa Postal 15064 – 90501-970 Porto Alegre, RS

{bcs, juergen, ldsouza, vsilva}@inf.ufrgs.br

**Resumo.** *As tecnologias ópticas têm desempenhado um papel de crescente importância nos grandes backbones da internet. Entretanto, a estruturação da rede ainda reflete tecnologias desenvolvidas para a transmissão de voz, o que explica a atual tendência de integração do nível IP diretamente sobre a plataforma óptica, removendo camadas como o ATM e SDH/SONET. Essa integração traz consigo inúmeros desafios e dificuldades. O presente artigo irá apresentar e criticar propostas de soluções para um destes problemas, mais especificamente o de roteamento IP em redes ópticas.*

### 1. Introdução

É bastante plausível assumir que a estruturação futura da rede mundial de computadores será baseada na integração de redes ópticas com tecnologias baseadas no IP. Entretanto, até agora, essas tecnologias ainda oferecem problemas significativos de integração. Enquanto que as tecnologias IP foram desenvolvidas tendo em vista a transmissão de dados, as tecnologias ópticas, como o SDH/SONET (*Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Network*), foram pensadas para facilitar a transmissão de voz. O que se percebe atualmente é a necessidade de uma unificação que permita a diversificação e diferenciação dos serviços oferecidos via rede, de preferência de modo a utilizar a imensa largura de banda disponibilizada pelas redes ópticas. Para que a utilização de IP diretamente sobre a plataforma óptica seja possível, será preciso resolver alguns problemas que emergem da remoção das camadas intermediárias comumente utilizadas, como as camadas ATM e SDH/SONET. Este trabalho irá focar um desses problemas, o do roteamento de tráfego IP em plataformas ópticas.

### 2. Caracterização do problema

Em redes ópticas, é aceitável assumir que o roteamento baseado na comutação de datagramas se mostre impraticável [Ghani, 2000]. Isso se deve ao fato de que os datagramas (ex: pacotes IP) devem ser roteados *hop by hop* em cada nó por onde passam, seguindo um modelo *store-and-forward*. Tendo em vista as dificuldades de se implementar *buffers* ópticos<sup>1</sup>, esse modelo é de difícil adaptação para tecnologias não-elétricas.

Atualmente, a solução utilizada em redes ópticas é trafegar IP sobre uma pilha de camadas formada por ATM, SDH/SONET e WDM ou, mais recentemente, DWDM

---

<sup>1</sup>Geralmente são utilizados trechos longos de fibra que causam um delay em determinado sinal, ao invés de se realizar uma conversão óptico-elétrico-óptico (OEO).

(*Dense Wavelength Division Multiplexing*). No futuro, provavelmente as camadas ATM e SDH, que atuam como intermediárias entre o IP e o DWDM, serão removidas e suas funções serão transferidas diretamente para o nível óptico ou para o IP [Ghani, 2000]. Essa transformação irá modernizar a estrutura das redes ópticas, as quais ainda se sustentam em tecnologias *voice-centered*. A consequência direta disso será a obtenção de menores tempos de processamento e menor latência. Infelizmente, surgem alguns problemas quando se tenta encapsular IP diretamente na plataforma óptica:

- sinais digitais ópticos necessitam de regeneração 3R (re-amplificação, re-formatação e re-sincronização), e no entanto o IP não prevê essas funcionalidades;
- atualmente não existem roteadores completamente ópticos, e backbones ópticos que trafegassem diretamente IP exigiriam roteadores que comutassem milhões de pacotes por segundo, o que atualmente é impossível;
- a implementação de redes baseadas na pilha de camadas IP → ATM → SONET/SDH → DWDM oferece um problema de escalabilidade devido à necessidade de se garantir que cada camada seja capaz de disponibilizar as necessidades de velocidade exigidas pelas demais;
- redes ópticas atualmente precisam implementar conversores óptico-elétrico-óptico (OEO) em diversos dispositivos, o que acarreta o surgimento de gargalos na rede;
- a criação de *buffers* para armazenar dados ópticos não é simples, o que implica que a comutação precisa ser do tipo *cut-through*, e não *store-and-forward*.

Tendo em vista esses problemas e a impossibilidade de se utilizar comutação baseada em pacotes, estão sendo propostos esquemas alternativos de roteamento em redes ópticas, como o roteamento de rajadas e o roteamento por comprimentos de onda<sup>2</sup>.

### 3. Estado da arte e soluções propostas

As novas abordagens para estruturação de redes ópticas propõem que a arquitetura de 4 camadas (IP, ATM, SDH/SONET, DWDM) seja colapsada a fim de evitar os múltiplos *headers* e os problemas já comentados, como o da escalabilidade. As tarefas do ATM e do SDH seriam movidas para o IP e DWDM, respectivamente. Assim, o QoS atualmente provido pelo ATM poderia vir a ser responsabilidade do IP, por exemplo, enquanto que a adaptação em caso de falhas, provida pelo anel auto-reconfigurante do SDH/SONET, se tornaria responsabilidade da camada DWDM.

Sabe-se que, atualmente, os roteadores mais rápidos disponíveis são os chamados *Terabit IP Routers*, ou *Carrier Class Routers*. Esses roteadores são capazes de suportar, segundo alguns fabricantes, de 0.5 a 90 milhões de pacotes por segundo. Entretanto, a maior parte desses roteadores ainda é desenvolvida para o mercado SONET/SDH. Roteadores totalmente ópticos, ou que sejam capazes de rotear IP diretamente sobre a camada óptica, ainda não são uma realidade.

Uma técnica de comutação mais interessante do que a baseada em comutação de datagramas é o MPLS. O MPLS (MultiProtocol Label Switching), ou MPλS, (*Multiprotocol Lambda Switching*, o equivalente óptico do MPLS, é baseado em um conceito similar

---

<sup>2</sup>Existe ainda uma terceira alternativa, a comutação óptica de pacotes (OPS – *Optical Packet Switching*). O OPS não será comentado neste trabalho porque funciona exatamente como o roteamento normal de pacotes, sendo bastante ineficiente para redes ópticas devido a necessidade de conversões OEO.

ao de circuitos virtuais. O MPLS associa um *label* (rótulo) aos pacotes IP de determinado fluxo de dados, o qual é roteado ponto-a-ponto pelo backbone [Mateus et al., 2003]. O *label* é uma abstração genérica que pode ser desde um VC de rede ATM até a especificação de comprimentos de onda em uma fibra óptica. A grande vantagem deste método de comutação é que o encaminhamento do fluxo se dá através do chamado LSP (*Label Switch Path*), que funciona como um circuito virtual [Ramaswami and Sivarajan, 1995].

O estabelecimento de um LSP entre os roteadores internos da rede MPLS, chamados de LSRs (*Label Switching Routers*), segue etapas semelhantes às necessárias para o estabelecimento de um circuito. O estabelecimento de um LSP se dá através do uso de um protocolo de distribuição de *labels* chamado *Label Distribution Protocol* (LDP). Esse protocolo é o responsável por distribuir informações de LSPs entre os LSRs de modo que eles possam criar as associações entre *labels* e fluxos [Qiao, 2000]. O primeiro *label* de um pacote é designado por um roteador de borda chamado de *Label Edge Router* (LER) no momento em que o pacote ingressa em uma rede MPLS.

### 3.1. GMPLS

Uma generalização do MPLS, e que constitui um forte candidato a método de roteamento para redes ópticas comutadas, é chamada de GMPLS (*Generalized MPLS*). O GMPLS é baseado na utilização de identificadores de canais ópticos como rótulos. A técnica GMPLS pode ser utilizada com o DWDM, e neste caso o *label* possui associação direta com o comprimento de onda de determinado canal óptico.

O GMPLS estende o MPLS a fim de prover um plano de controle (sinalização e roteamento) para dispositivos que sejam capazes de comutar dados tanto no domínio de espaço (ex: portas de entrada/saída), tempo (ex: ADMs SONET) e comprimento de onda (lambdas ópticos). O plano de controle do GMPLS promete simplificar o gerenciamento da rede, automatizando tarefas relacionadas ao estabelecimento fim a fim das conexões e garantindo o nível de qualidade de serviço que é exigido pelas novas e sofisticadas aplicações<sup>3</sup>.

O GMPLS também é responsável pela extensão de protocolos de sinalização e de roteamento do MPLS de modo a acomodar as características de TDM/SONET às redes ópticas. Os protocolos de sinalização mais populares são o RSVP-TE (*RSVP Traffic Engineering*) e o CR-LDP (*Constraint-based Label Distribution Protocol*)<sup>4</sup>. Além disso, um novo protocolo, chamado de LMP (*Link Management Protocol*), foi introduzido a fim de gerenciar e manter a conectividade e gerenciar falhas no *link*.

Quanto ao plano de controle do GMPLS, são previstas várias funções, dentre as quais as mais importantes para este trabalho são a de gerência e disseminação do status do link, por serem fundamentais para o roteamento em GMPLS. O roteamento em GMPLS é baseado em extensões dos protocolos OSPF e IS-IS. Note que a utilização de um algoritmo baseado no OSPF é interessante devido à necessidade de se ter acesso, em todos nodos (OXCs e roteadores), a informações topológicas e a respeito do estado dos enlaces.

---

<sup>3</sup>Para isso são utilizadas tabelas de equivalência para encaminhamento (FECs) que agrupam de fluxos com mesmos requisitos de engenharia de tráfego.

<sup>4</sup>A sinalização no GMPLS tem a vantagem de resolver o problema da necessidade de configuração manual de dispositivos ópticos como *Optical Cross Connect* (OXC) e *Optical Add/Drop Multiplexer* (OADMs).

Para finalizar a contextualização do GMPLS enquanto alternativa para roteamento óptico, é apresentado um quadro contendo uma breve comparação entre vários domínios de chaveamento e os correspondentes modos de encaminhamento.

Tipo de chaveamento	Tipo de tráfego	Encaminhamento	Ex. de dispositivo
Pacotes/células	IP, ATM	<i>hop-by-hop</i> , VC	Roteador IP/switch ATM
Tempo	TDM/SONET	Slot de tempo em ciclos repetitivos	<i>digital OXC, add/drop multiplexing</i>
Comprimento de onda	(independe)	baseado em lambdas	DWDM
Domínio de espaço	(independe)	Linha, fibra	OXC

**Quadro 1: Comparação entre os modos de chaveamento em redes ópticas.**

### 3.2. Burst switching

O Optical Burst Switching (OBS) é uma tecnologia de rede proposta no final dos anos 90 com a finalidade de aumentar a eficiência do transporte de IP em redes ópticas. O OBS tenta obter uma boa relação custo/eficiência de maneira automática, usando para isso a combinação de tecnologias ópticas e elétricas/eletrônicas [Gauger and Dolzer, 2003].

O grande diferencial do OBS é que os canais de transmissão podem ser alocados dinamicamente e os dados podem ser transmitidos em rajadas (conjuntos de pacotes). As rajadas de dados passam pelos nodos sem sair do domínio óptico, o que evita os *delays* causados por conversões OEO. As informações de controle, por sua vez, são sinalizadas e processadas separadamente. Em contraste com o *switching* óptico de pacotes, o OBS agrega eletronicamente uma série de pacotes em uma rajada de tamanho variável, de acordo com o nodo de destino e com a classe de QoS envolvida. Os dados de controle são utilizados para configurar as matrizes de comutação antes que os dados cheguem nos respectivos nodos intermediários (controle *out-of-band*). Além disso, as rajadas são comutadas de modo assíncrono nos nodos, e só deixam o domínio óptico quando alcançam o destino final. É fácil perceber que a granularidade envolvida na transmissão é intermediária, situando-se entre o circuito e o pacote, uma vez que uma rajada é constituída por uma seqüência de vários pacotes [Qiao, 2000].

É válido salientar que, ao contrário do que acontece durante o estabelecimento de um circuito virtual comum, não há espera pela confirmação de recebimento das informações de sinalização. Se ocorrer algum problema durante o tratamento eletrônico das mensagens de controle, a rajada será prontamente descartada nos nodos intermediários. Esse tipo de reserva de recursos sem confirmação, conhecido como *one-way*, faz com que os nodos intermediários passem a trabalhar em modo de envio imediato (*cut-through*), evitando atrasos desnecessários [Mateus et al., 2003].

Note que para o bom funcionamento do OBS é preciso haver uma definição satisfatória do tamanho ótimo para as rajadas, em função da rede e das características de serviço desejadas. Embora existam várias heurísticas, essa ainda é uma questão em aberto [Buchta et al., 2003].

### 3.3. OBS e a comutação de lambdas

O OBS oferece também uma solução ao problema do desperdício de banda que é alocada de maneira exclusiva e não é utilizada plenamente, típico de redes baseadas na comutação

de lambdas. Esse problema é resolvido exatamente pelos métodos de sinalização já comentados, e faz com que o OBS, quando comparado com mecanismos de roteamento baseados puramente na comutação por lambdas, apresente melhor utilização da largura de banda, menor latência e menor desperdício. Entretanto, a comutação OBS também oferece alguns problemas, como o da *resolução de contenção*, que diz respeito a situações onde duas rajadas tentam utilizar o mesmo lambda. Nesse caso, uma das rajadas deve ser descartada ou contida através da inserção de atrasos, conversão de comprimentos de onda ou deflexão para outra fibra. Nenhuma dessas alternativas é de fácil implementação, o que dificulta a escalabilidade em redes baseadas em OBS.

### 3.4. Métodos de comutação por rajadas

Existem algumas variações para o método de comutação por rajadas, as quais diferem basicamente quanto ao modo como os recursos são liberados após a transmissão:

1. **TAG** (*Tell-and-Go*): O bloco de controle é transmitido por um canal separado pouco antes da transmissão da rajada. Ao final, um novo sinal é enviado a fim de liberar os recursos. Não há confirmação de recebimento dos sinais de controle;
2. **IBT** (*In-band Terminator*): Semelhante ao modo como ocorre a comutação de pacotes tradicional, no sentido em que as informações de controle e de terminação são enviadas como adendos aos dados, no mesmo canal;
3. **RFD** (*Reserve a Fixed Duration*): Semelhante ao TAG, mas informa juntamente com o sinal de controle o tempo máximo esperado para a duração da rajada. É a proposta que está sendo melhor vista no momento, já que geralmente é capaz de operar em modo *cut-through*. Os nodos intermediários trabalham em domínio eletrônico apenas durante a leitura dos blocos de sinalização, em função dos quais ajustam os comutadores DWDM e fazem a reserva de banda.

## 4. Considerações finais

Entre as tecnologias que vêm sendo usadas na integração IP/nível óptico, os paradigmas GMPLS e OBS se destacam por proporem soluções inteligentes e flexíveis na alocação de recursos. A comutação de IP em redes ópticas pode ser solucionada pelos dois métodos, embora ambas as tecnologias se encontrem em estágios iniciais de desenvolvimento e ainda não possam ser consideradas soluções definitivas e plenamente confiáveis.

O GMPLS vem sendo visto como a melhor estrutura de integração entre IP e DWDM, pois proporciona bons controles de engenharia de tráfego, além de se adequar à tecnologia WDM quando comprimentos de onda são usados como rótulos.

O OBS, por sua vez, se comparado com a comutação de lambdas ou de pacotes ópticos, proporciona uma boa relação custo/benefício devido à melhor utilização dos recursos disponíveis, menor latência e a maior adaptabilidade. A complexidade de implementação também é relativamente menor, embora possa levar a problemas de escalabilidade.

Para finalizar, segue um breve quadro comparativo acerca das características relativas dos vários paradigmas de comutação óptica. O **Quadro 4** deixa claro, por exemplo, que a comutação de lambdas apresenta baixa utilização da banda, causada pelo desperdício provocado por canais inativos, e que o método de rajadas possui uma baixa

latência, graças ao processo de sinalização sem confirmação. É válido ressaltar que as características apresentadas não são absolutas, e só fazem sentido quando interpretadas no contexto de comparação com os demais paradigmas.

Paradigma de comutação óptica	Largura de banda (utilização)	Latência (incluindo setup)	Adaptabilidade (tráfego e falhas)
Lambda	Baixa	Alta	Baixa
Rajada	Alta	Baixa	Alta
Pacotes	Alta	Baixa	Alta

**Quadro 2: Comparação entre os vários paradigmas de comutação óptica.**

É válido salientar que nenhuma destas tecnologias está amadurecida. Só o tempo será capaz de mostrar as deficiências e vantagens de cada uma. Entretanto, o *burst-switching* aparenta ter uma leve vantagem devido ao fato de aproveitar melhor a banda, e também por praticamente evitar a reserva de um lambda exclusivo por conexão, devido à velocidade de *release* após a rajada. Além disso, o OBS evita a necessidade de *bufferização* nos nodos intermediários, o que faz com que a comutação na rede óptica seja muito mais eficiente. O GMPLS, por outro lado, aparenta ser uma melhor solução na busca de QoS e reserva fixa de banda, e também possui características de implementação que possibilitam um grau de escalabilidade superior.

Como comentário final, é interessante lembrar que as tecnologias comentadas não precisam ser entendidas como soluções mutuamente exclusivas, e sim como os primeiros passos dados na busca de uma arquitetura capaz de unir o IP às plataformas ópticas.

## Referências

- Buchta, H., Patzak, E., and Saniter, J. (2003). Maximal and effective throughput of optical switching nodes for optical burst switching. In *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC2003)*, Atlanta, EUA.
- Gauger, C. and Dolzer, K. (2003). Trends in optical burst switching. In *Proceedings of the SPIE ITCOM 2003 Conference*, Orlando, EUA.
- Ghani, N. (2000). Ip over optical. In *Proceedings of Optical Networking and Communications Conference 2000 (ICOMM2000)*, Dallas, EUA.
- Mateus, G. R., Loureiro, A. A., and Nogueira, J. M. (2003). Alocação de caminhos comutados por rótulo em redes multiplexadas por comprimento de onda. In *SPG'2003 - Anais da VII Semana de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais (SPG'2003 UFMG)*, Minas Gerais, Brasil.
- Qiao, C. (2000). Labeled optical burst switching and ip/wdm integration. Technical report, IEEE Communications Magazine.
- Ramaswami, R. and Sivarajan, K. N. (1995). Routing and wavelength assignment in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(5):489–500.