

Aprovisionamento dinâmico de caminhos óticos na presença de restrições da camada física em redes óticas de transporte gerenciadas por plano de controle GMPLS

Gustavo S. Pavani, Dener E. O. G. da Silva, Alaelson C. Jatobá Neto,
Claudécir L. Arnar, Gelio M. Ferreira

¹Universidade Federal do ABC (UFABC)
Av. dos Estados, 5001. Santo André – SP.

{gustavo.pavani, gelio.ferreira}@ufabc.edu.br

Abstract. *This work presents a novel distributed algorithm for the dynamic provisioning of transparent lightpaths based on transmission quality constraints in Optical Transport Networks (OTN) through the proactively monitoring of both the optical and electrical layers. More specifically, by monitoring the optical channel power and its bit error rate at the connection endpoints, a suitable solution for the management and operation of GMPLS-controlled OTN is proposed. The algorithm is experimentally validated by using off-the-shelf OTN equipments and its implementation can successfully setup, establish, maintain and restore a lightpath in the presence of physical layer impairments.*

Resumo. *Este trabalho apresenta um novo algoritmo distribuído para o provisionamento dinâmico de caminhos óticos transparentes baseado em requisitos de qualidade de transmissão em redes óticas de transporte (OTN) através do uso de monitoramento proativo tanto no nível ótico quanto no nível elétrico. Mais especificamente, através do monitoramento da potência ótica do canal e da taxa de erro de bits nas extremidades da conexão, uma solução viável para a gerência e a operação de redes OTN controladas por GMPLS é proposta. O algoritmo é validado experimentalmente com o uso de equipamentos OTN disponíveis no mercado, sendo que sua implementação é capaz de configurar, estabelecer, manter e restaurar um caminho ótico com sucesso na presença de restrições da camada física.*

1. Introdução

As redes óticas de transporte (OTN – *Optical Transport Network*), que foram padronizadas nas recomendações ITU-T G.872 e G.709 [ITU-T Recommendation G.872 2001, ITU-T Recommendation G.709 2009], são uma importante tecnologia para o desenvolvimento da Internet do futuro. De fato, redes OTN podem prover um transporte de dados com alta capacidade de largura de banda e escalabilidade para os novos serviços que vão surgindo [Pan et al. 2011]. Destaca-se ainda a possibilidade de se transportar de forma transparente o tráfego Ethernet, assim como outros protocolos, transformando em realidade o paradigma do protocolo da Internet (IP – *Internet Protocol*) sobre a rede ótica multiplexada por comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*).

Os comprimentos de onda ou “*lambdas*” da rede WDM podem ser vistos como o componente principal da camada física da rede OTN [Gumaste and Krishnaswamy 2010],

onde roteadores IP com interfaces OTN podem se comunicar diretamente entre si. Esses comprimentos de onda podem ser roteados na rede com o uso de multiplexadores óticos reconfiguráveis (ROADM – *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers*) ou de comutadores óticos (OXC – *Optical Cross Connect*).

O padrão OTN provê funções avançadas de operação, administração, manutenção e provisionamento (OAM&P – *Operation, Administration, Maintenance and Provisioning*) para cada comprimento de onda. Por exemplo, é possível monitorar o desempenho fim-a-fim de cada comprimento de onda, que é uma informação muito importante para avaliar a qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) [Cugini et al. 2008] de uma conexão.

Este trabalho propõe um algoritmo que seja capaz de configurar, estabelecer, manter e restaurar um caminho ótico transparente em redes OTN com determinada QoT mínima. O gerenciamento do caminho ótico é possível através do monitoramento proativo da qualidade do sinal e dos alarmes da OTN, tendo sido integrada ao plano de controle GMPLS (*Generalized Multi-Protocol Label Switching*) [Mannie 2004] da rede.

O algoritmo é validado experimentalmente com equipamentos OTN disponíveis no mercado e um plano de controle GMPLS integrado, reproduzindo a operação real de uma rede OTN. Demonstra-se também que o algoritmo é capaz de estabelecer e restaurar um caminho ótico dentro das especificações de potência ótica e de taxa de erro de bits (BER – *Bit-Error Rate*) preestabelecidas.

O trabalho está estruturado da seguinte forma. Primeiramente, na Seção 2, é apresentada uma discussão sobre o estado da arte e trabalhos relacionados ao provisionamento dinâmico de caminhos óticos na presença de restrições da camada física. Na Seção 3, a proposta do algoritmo de gerenciamento de caminhos óticos é detalhada. A validação experimental do algoritmo proposto é apresentada na Seção 4. Finalmente, as conclusões do trabalho são discutidas na Seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

Como não há regeneração do sinal em uma rede ótica transparente, algumas rotas podem não ter um desempenho de transmissão aceitável [Ramamurthy et al. 1999]. Para se contornar esse problema, muitos estudos da literatura levam em consideração os fatores ligados a QoT, além dos tradicionais fatores topológicos, no provisionamento de caminhos óticos.

Um levantamento de algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda cientes de restrições na camada física (PLI-RWA – *Physical Layer Impairments-aware Routing and Wavelength Assignment*) é mostrado em [Azodolmolky et al. 2009a], no qual tais algoritmos são categorizados e suas estratégias de integração no plano de controle são discutidas.

Em [Pavani et al. 2008], são apresentados dois algoritmos distribuídos para o provisionamento de caminhos óticos para uma classe específica de problemas PLI-RWA, chamada de roteamento e alocação de comprimentos de onda com considerações de potência (RWA-P – *RWA with Power considerations*), que foi primeiramente proposta por [Ali et al. 2000, Ali 2001] e depois estendida em [Pavani and Waldman 2004]. O objetivo é estabelecer um caminho ótico enquanto se mantém um nível aceitável de potência

ótica e de relação sinal-ruído ótica (OSNR – *Optical Signal-Noise Ratio*) em toda a rede.

O monitoramento da rede e a compensação de degradações em redes óticas transparentes também é um problema importante. Uma visão geral dessas técnicas é apresentada em [Teixeira et al. 2009]. A recomendação ITU-T G.697 [ITU-T Recommendation G.697 2009] indica uma série de parâmetros que podem ser usados para monitoramento da rede.

Poucos trabalhos experimentais podem ser encontrados tratando da gerência de redes óticas transparentes com uso do plano de controle GMPLS. Entretanto, tais experimentos propõe grandes modificações, ora para o protocolo de roteamento [Azodolmolky et al. 2009b, Martínez et al. 2010, Liu et al. 2011], ora para o protocolo de sinalização [Cugini et al. 2008] da rede, para viabilizar o tratamento das restrições da camada física.

3. Algoritmo Proposto

A recomendação ITU-T G.697 classifica as degenerações de acordo com sua frequência de ocorrência [ITU-T Recommendation G.697 2009]. Três tipos de degenerações ocorrem com frequência, degradando a qualidade do sinal ótico: atenuação, mudança da potência do sinal ótico devido a variações no ganho dos amplificadores e desvio da frequência nominal do sinal ótico.

A potência do sinal ótico está correlacionada a todos essas degenerações, sendo que tal parâmetro pode ser facilmente monitorado, pois tal monitoramento é comumente encontrado nos *transponders* disponíveis comercialmente.

A recomendação ITU-T G.709, por outro lado, prevê uma medida confiável do desempenho de transmissão no nível elétrico, através do uso de um bit de paridade entrelaçado (BIP-8 – *Bit Interleaved Parity*) [ITU-T Recommendation G.707 2007]. O uso de BIP-8 permite a detecção da BER até o limite de $6,56 \times 10^{-5}$.

A tarefa do monitoramento no domínio ótico é facilitada pela avaliação do desempenho de transmissão no domínio elétrico. Assim, evita-se o uso de métodos sofisticados no domínio ótico para a estimação da BER, como OSNR ou fator-Q, que, além de ser mais caros e complexos, são suscetíveis a erros em situações em que há formatação de ruído ou dispersão residual [ITU-T Recommendation G.697 2009].

Além disso, a ITU-T G.709 prevê alarmes que podem diagnosticar degradações do serviço ou falhas, tais como:

- Alarme de perda de quadro (LOS – *Loss-Of-Frame*): É disparado quando o processo de alinhamento de quadros está no estado de fora de quadro (OOF – *Out-Of-Frame*) por 3 milissegundos. O estado OOF acontece quando o sinal de alinhamento de quadro (FAS – *Frame Alignment Signal*) não é encontrado em 5 quadros OTN consecutivos;
- Alarme de perda de sinal (LOF – *Loss-Of-Signal*): É disparado quando a perda do sinal ótico é detectada, seja porque um determinado período de tempo é atingido sem transições no sinal ótico ou, alternativamente, o sinal ótico recebido está abaixo de um nível de potência pré-determinado.

Nesse contexto, através do monitoramento proativo da potência de cada sinal ótico e a respectiva informação sobre a BER obtida do BIP-8, em conjunto com os alarmes LOS

e LOF, é possível projetar um algoritmo que seja capaz de gerenciar caminhos óticos em redes óticas de transporte com restrições de camada física, controlando a potência do sinal ótico e mantendo um nível adequado de QoT nas extremidades da conexão.

Essas informações devem ser incorporadas ao plano de controle GMPLS, para que as operações de OAM&P relacionadas sejam automatizadas, obtendo um aprovisionamento de caminhos óticos que não necessitem de configuração manual, como é tipicamente o caso em redes OTN. Considerando que há presença de comutação de comprimentos de onda em cada nó da rede gerenciada pelo plano de controle, cada caminho ótico pode ser representado por um caminho comutado por rótulo (LSP – *Label Switched Path*).

A comunicação dessas informações entre as extremidades de uma conexão é feita através de mensagens RSVP-TE *Notify* [Berger 2003], sendo propostos novos valores de sub-código de erro para o tipo 25 (*Notify Error*) no objeto *ERROR_SPEC*:

- *OTN Below Minimum Optical*: O sinal ótico recebido está abaixo do limiar da potência de sensibilidade (P_{in}^{min}) ou quando um alarme LOS está ativo;
- *OTN Above Maximum Optical*: O sinal ótico recebido está acima do limiar da potência de saturação (P_{in}^{max});
- *OTN Below Minimum Electrical*: A BER observada na conexão está acima do nível máximo tolerável (BER_{max}) ou quando um alarme LOF está ativo;

A Tabela 1 mostra os valores de sub-código que o *Notify Error* pode assumir.

Tabela 1. Valores de sub-código do *Notify Error*.

Valor	Descrição	RFC
1	RRO too large for MTU	3209
2	RRO Notification	3209
3	Tunnel locally repaired	3209
4	Control Channel Active State	3473
5	Control Channel Degraded State	3473
6	Preferable path exists	4736
7	Local link maintenance required	4736
8	Local node maintenance required	4736
9	LSP Failure	4872
10	LSP Recovered	4872
11	LSP Locally Failed	4872
12	No OOB mapping received	6511
13	OTN Below Minimum Optical	Proposto
14	OTN Above Maximum Electrical	Proposto
15	OTN Below Minimum Electrical	Proposto

O comportamento para as extremidades da conexão proposto para gerenciamento do sinal ótico, ilustrado na Figura 1, é descrito como:

1. O nó origem envia uma mensagem RSVP-TE *Path* em direção ao nó destino. Tal mensagem contém os objetos *Generalized Label Request* e *Upstream Label*, especificando um comprimento de onda disponível nos sentidos *downstream* e

- upstream*, respectivamente. Um objeto *Notify Request* é incluído para habilitar a notificação de eventos por mensagens *Notify*. Um objeto *Explicit Route* pode ser usado para determinar a rota do caminho ótico. Adicionalmente, caso tal caminho ótico necessite ser protegido contra falhas, os objetos *Protection* e *Association* são também encaminhados, indicando o nó origem como interessado neste LSP e as informações que serão utilizadas para recuperação. Então, o nó origem adiciona as informações sobre o LSP em sua tabela *PathState*;
2. Se há nós intermediários ao longo da rota, estes deverão configurar seus OXC para estabelecer o LSP;
 3. No nó destino, a mensagem *Path* configura o *transponder* no comprimento de onda especificado no objeto *Upstream Label*, mas não inicia a transmissão. Então, o nó destino envia uma mensagem RSVP-TE *Resv* de volta para o nó origem, também contendo um objeto *Notify Request*, indicando que o nó destino também é interessado neste LSP. Caso haja algum mecanismo de recuperação associado, os objetos relacionados também são adicionados. Então, o nó destino adiciona as informações sobre este LSP em sua tabela *ResvState*;
 4. Ao receber as informações da mensagem *Resv*, o nó origem configura seu *transponder* e inicia a transmissão no sentido *downstream*. Além disso, envia uma mensagem RSVP-TE *Resv Confirm* para o nó destino;
 5. Quando o nó destino recebe a mensagem *Resv Confirm*, ele inicia a transmissão no outro sentido, fechando a conexão bidirecional;
 6. Em caso de violação dos limites de potência, do nível mínimo de BER ou alarme LOS/LOF, uma mensagem *Notify* é enviada pelo nó que detectou o problema para seu par, que registrou anteriormente o interesse em eventos ligados a tal LSP, contendo o sub-código de erro apropriado, conforme Tabela 1.
 7. O nó par da conexão que recebe tal mensagem *Notify* deve incrementar o ganho do seu amplificador de potência (*booster*) por uma quantidade igual a $I_{booster}$ dB. Note que tanto o valor “*OTN Below Minimum Optical*” quanto o valor “*OTN Above Maximum Optical*” causam o aumento do ganho. O ganho do amplificador pode ser incrementado até o seu máximo valor ($G_{booster}^{max}$), até que um determinado limiar seja alcançado ($G_{booster}^{threshold}$) ou até receber uma mensagem *Notify* com o sub-código de erro “*OTN Above Maximum Optical*”. Caso isso aconteça, o LSP não consegue atingir o QoT desejado e, por isso, deve ser finalizado. Se o nó for a origem, ele deve enviar uma mensagem RSVP-TE *Path Tear* ao destino para apagar os estados do plano de controle correspondentes. Caso o nó seja o destino, a mensagem RSVP-TE *Resv Tear* é enviada em direção à origem, também apagando os estados do plano de controle correspondentes.

Note que o algoritmo RWA usado e o esquema de provisionamento de conexão são mecanismos independentes. Qualquer algoritmo de RWA pode ser usado com o algoritmo proposto, seja ele ciente ou não das restrições da camada física, seja a rota determinada na origem ou não. Em efeito, os passos 6 e 7 tornam o provisionamento das conexões ciente das restrições da camada física, diferindo do provisionamento meramente topológico de caminhos óticos, convencionalmente realizado em redes óticas, que é restrito aos passos 1 a 5.

O algoritmo também assume, sem perda da generalidade, que os amplificadores óticos de linha no núcleo da rede estão compensando as atenuações que porventura exis-

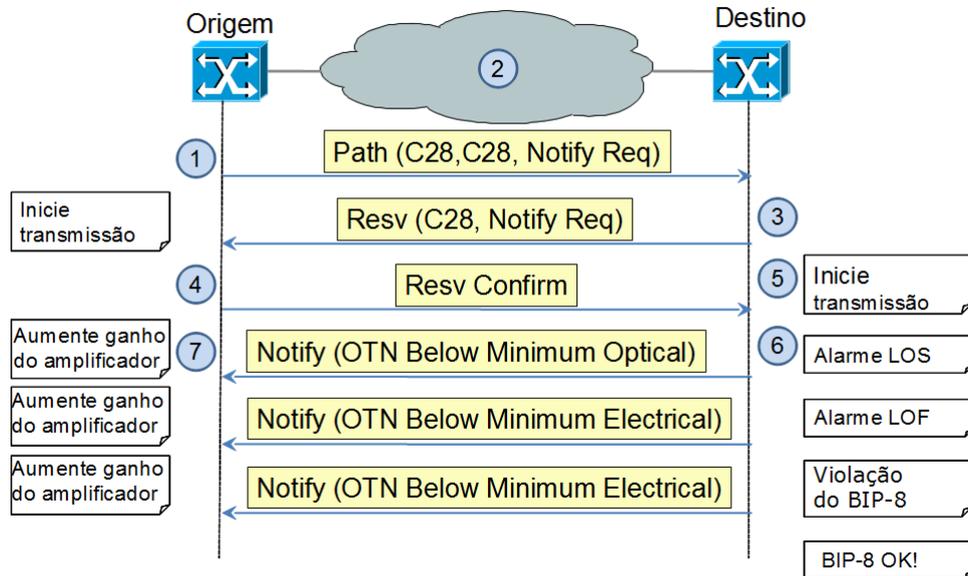


Figura 1. Esboço do provisionamento com sucesso de um caminho óptico.

tam nos enlaces intermediários da rede. Em outras palavras, se considera que a rede ótica foi cuidadosamente projetada de tal maneira que pelo menos uma parte representativa das rotas em potencial possam ser realizadas de forma totalmente ótica e transparente. Dessa maneira, uma estratégia para colocação de amplificadores, apesar de fora do escopo deste trabalho, é necessária para se atingir um bom desempenho em termos de probabilidade de bloqueio.

Note ainda que o uso dos amplificadores de potência nos nós da rede é uma das formas mais fáceis de se controlar a potência de cada canal ótico. Em efeito, a vasta maioria dos *transponders* são produzidos com uma potência ótica de saída fixa (P_{out}), na ordem de dBm.

Após o estabelecimento de uma conexão, mensagens *Path* e *Resv* são trocadas entre os nós origem e destino, respectivamente, com intervalos fixos de $T_{refresh}$ para a manutenção do LSP. Em caso de um nó não receber as mensagens de atualização em um intervalo maior que 3 vezes $T_{refresh}$, o LSP deve ser encerrado.

3.1. Restauração

Quando uma falha acontece em um determinado LSP e é detectada por um nó, a mensagem *Notify* com o sub-código “*LSP Locally Failed*” deve ser enviada ao nó que registrou o interesse via objeto *Notify Request*. Este nó, ao receber tal mensagem, deve iniciar o processo de recuperação do LSP [Lang et al. 2007].

Nesta implementação, consideramos a estratégia de re-roteamento completo de LSP (*Full LSP Rerouting*) com um mecanismo *break-before-make* [Lang et al. 2007]. Uma mensagem *Path Tear* é enviada para liberar os recursos do LSP com falha. Nesse

ponto, o mesmo algoritmo deve ser repetido, considerando que no passo 1 o objeto *Association* deve usar o mesmo identificador que o LSP com falha e que uma nova rota livre da falha deve ser utilizada.

Note que o algoritmo deve ser repetido integralmente, pois a nova rota do LSP de recuperação pode ter características de atenuação e ganho diferentes do que a rota original de trabalho.

4. Validação Experimental

Para a validação experimental do algoritmo proposto, foi usado o ambiente esboçado na Figura 2.

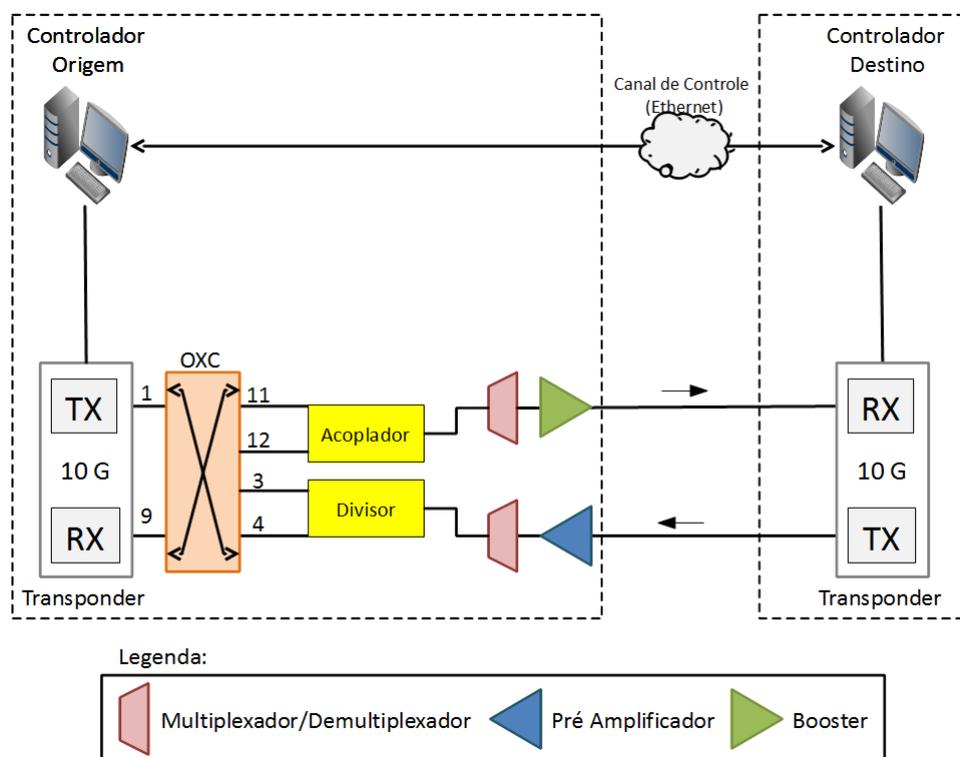


Figura 2. Esboço do ambiente usado para validação experimental do algoritmo.

Nesse ambiente, temos dois equipamentos OTN com interfaces sintonizáveis de 10 GBps conectados cada um ao seu próprio controlador GMPLS. O controlador GMPLS conta com uma pilha RSVP-TE e módulos para comunicação com as gerências dos equipamentos totalmente escritos em Java. Os controladores GMPLS estão interconectados entre si por uma rede Ethernet fora de banda, que serve para troca de mensagens RSVP-TE.

O nó origem é constituído do equipamento OTN, controlador GMPLS, OXC, amplificadores e multiplexador/demultiplexador. Para que fosse emulada uma segunda rota entre o nó origem e o nó destino, foram adicionados um acoplador e um divisor ao OXC. O nó destino é formado apenas pelo equipamento OTN e por seu respectivo controlador. Devido a distância de poucos metros entre cada componente, foram usados atenuadores

de potência nas saídas dos amplificadores e dos transmissores para emular enlaces de longa distância.

A implicação dessa configuração é que apenas o nó origem irá atuar sobre a potência do sinal ótico com as informações passadas pelo nó destino, isto é, pelas mensagens *Notify*. Em uma situação real, ambos os nós estariam operando sobre as potências do sinal ótico enviado. Contudo, ambos os processos seriam praticamente simétricos, de tal forma que conseguimos avaliar o algoritmo observando apenas pela perspectiva do nó origem.

No OXC, as portas 1 e 9 são as portas de adição e derivação, respectivamente, do equipamento OTN relativo ao nó origem. As portas 11 e 3 são as portas usadas pelo caminho de trabalho enquanto as portas 12 e 4 estão reservadas para uso no caminho de recuperação. O uso do acoplador e do divisor permite que o caminho de trabalho e de recuperação tenham características de atenuação diferentes, apesar de compartilharem exatamente a mesma rota.

A monitoração da potência que sai do OXC para o equipamento OTN do nó origem pode ser usado para se detectar falhas de LSP. O OXC pode notificar o plano de controle caso um determinado limiar mínimo de potência não seja observado nessa porta $P_{OXC}^{failure}$. No experimento descrito, caso um valor menor que $P_{OXC}^{failure}$ seja observado na porta 9, o OXC deve notificar o plano de controle que o LSP falhou.

Um fator que merece destaque é que a validação experimental está limitada pelos equipamentos usados no ambiente. De fato, foram observados 2 tipos de limitação:

- Os *transponders* e os amplificadores utilizados neste experimento têm um grande atraso de retorno de informações atualizadas através de sua interface de gerenciamento, com atrasos observados de até 9 segundos para atualização. Isso faz que o plano de controle receba informações atrasadas do estado do equipamento.
- O amplificador de potência demora até 30 segundos para completar um comando de mudança de seu ganho, enquanto o laser do *transponder* pode demorar até 40 segundos para estabilizar. O OXC demora um tempo relativamente mais curto para conclusão de um comando, que é cerca de 410 milissegundos.

Assim, as características e as limitações dos equipamentos devem ser consideradas pelo algoritmo proposto. Logo é necessário observar um intervalo $T_{command}$ entre mudanças de ganho do amplificador e um intervalo T_{warmup} para estabilização do laser após ser ligado, de acordo com as características dos equipamentos usados. Como critério para se determinar esses intervalos, se usou o tempo máximo observado empiricamente para efetivação do comando em uma sequência de testes com os equipamentos. Assim, um nó irá ignorar mensagens *Notify* que porventura cheguem no intervalo $T_{command}$, visto que o aumento do ganho ainda não foi terminado.

Para evitar falsas violações nos limiares de potência, são medidas $N_{samples}$ amostras no cálculo da potência média do canal, sendo cada amostra obtida com um intervalo de tempo T_{power} .

A Tabela 2 mostra os valores das características dos equipamentos e dos parâmetros usados na validação experimental.

O experimento começa com a inicialização do plano de controle em cada um dos

Tabela 2. Valores das características dos equipamentos e dos parâmetros usados no ambiente experimental.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Potência de sensibilidade do receptor	P_{in}^{min}	-24 dBm
Potência de saturação do receptor	P_{in}^{max}	-5 dBm
Potência de saída do transmissor	P_{out}	5,9 dBm
Ganho máximo do amplificador de potência	$G_{booster}^{max}$	25 dB
Limiar de potência para falha de LSP	$P_{OXC}^{failure}$	-35 dBm
Incremento do ganho por iteração	$I_{booster}$	3 dB
Tempo de intervalo entre comandos	$T_{command}$	30 s
Tempo para estabilização do laser	T_{warmup}	45 s
Tempo entre leituras da potência do canal	T_{power}	100 ms
Número de amostras para cálculo da potência	$N_{samples}$	10
Tempo entre atualizações de estado RSVP-TE	$T_{refresh}$	20 s
Tempo de intervalo entre mensagens <i>Notify</i>	T_{Notify}	1 s
BER máxima tolerada na conexão	BER_{max}	10^{-9}

nós do ambiente. Devido ao tempo de estabilização do laser ser relativamente grande, o laser do transmissor é inicializado junto com o plano de controle e se aguarda um tempo T_{warmup} antes de se enviar uma mensagem *Path* do nó origem ao nó de destino. Essa mensagem solicita o estabelecimento de um novo LSP, com identificador igual 0, cujo envio pode ser visto no ponto **A** da Figura 3.

A troca de mensagens *Resv* e *Resv Confirm* se dá normalmente entre os nós origem e destino, o que estabelece o LSP. O nó destino, então, começa a coletar amostras do nível de potência que chega em seu receptor e verifica que está abaixo do limiar mínimo de sensibilidade (P_{in}^{min}). De fato, essa verificação acontece no ponto **B** da Figura 3, em que a potência que entra no receptor é de cerca de -28 dBm enquanto o mínimo aceitável seria de -24 dBm. Nesse momento, o nó destino começa a enviar mensagens *Notify* com o indicativo de erro “*OTN Below Minimum Optical*” com intervalo T_{Notify} entre elas.

O nó origem ao receber a primeira mensagem *Notify*, envia o comando ao amplificador de potência para aumentar o ganho em 3 dB, fazendo com que o ganho original suba de 13 dB para 16 dB. O comando é executado no ponto indicado como **C** e é completado no ponto indicado como **D** da Figura 3.

Pode-se observar no ponto **E** da Figura 3 que a potência que chega ao receptor no nó de destino aumentou, registrando o valor de -24,7 dBm. Como essa potência é ainda inferior ao limiar P_{in}^{min} , o nó de destino continua a enviar mensagens *Notify* com o indicativo de erro “*OTN Below Minimum Optical*”.

Decorrido o tempo $T_{command}$, como o nó origem continua a receber mensagens *Notify*, ele envia um novo comando de aumento de ganho ao amplificador de potência. Esse comando está indicado como **F** da Figura 3, sendo que o comando completa no ponto **G**. Nesse momento, o receptor no destino verifica que as leituras de potência estão por volta de -22 dBm, o que é acima do limiar de sensibilidade e abaixo do limiar de saturação. Verifica então o valor do BIP-8 e vê que o mesmo indica uma BER igual a 0. Assim, com também não há nenhum alarme, o nó de destino cessa o envio de men-

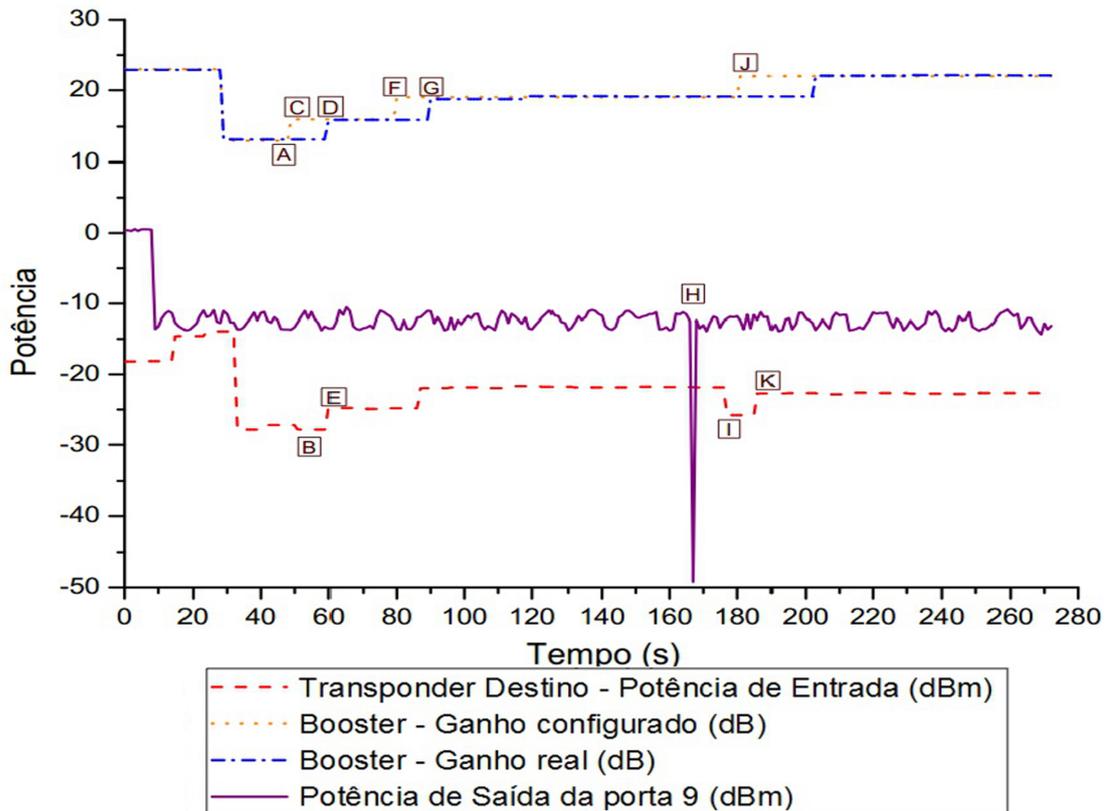


Figura 3. Variação da potência e do ganho no provisionamento e restauração do caminho óptico.

sagens *Notify*. Decorrido outro intervalo $T_{command}$, a ausência de mensagens chegando no nó origem indica que o caminho óptico já possui o nível adequado de potência ótica e, por isso, não necessita mais de aumento algum no ganho do amplificador de potência. Finalmente, em cerca de 42 segundos após o envio da primeira mensagem *Path* e com o uso de duas iterações do algoritmo, foi possível o estabelecimento de um LSP dentro das características de QoT determinadas.

Devido ao fato de os nós origem e destino estarem conectados por um enlace de fibra ótica de alguns poucos metros, a qualidade do sinal ótico não pode ser degenerada suficientemente a ponto de obter taxas de erros significativas de BER pela leitura do BIP-8. Em uma situação mais realista, portanto, poderia não haver violações dos limiares de potência ótica, mas o BIP-8 poderia indicar uma BER acima do tolerável, o que continuaria o processo de envio de mensagens *Notify*, mas com o indicativo de erro “*OTN Below Minimum Electrical*”.

Para validar a restauração, um falha causa a interrupção do sinal ótico no instante 168 segundos, como indicado no ponto **H** da Figura 3. A falha foi emulada com a desconexão da porta de entrada 3 do OXC, fazendo com que não chegue mais potência ótica na porta 9 do OXC.

Detectada a falha pelo OXC, que possui a capacidade de gerar uma ação ou notificação caso a potência na porta de entrada fique abaixo de $P_{OXC}^{failure}$, o nó origem verifica que o LSP afetado tem objetos *Protection* e *Association* ao seu estado, indicando

que o LSP era protegido por um mecanismo de *Full LSP Rerouting*. Então, o nó origem faz uso de uma rota pré-calculada, o que gera a comutação do caminho de trabalho para o caminho de recuperação. Assim, o OXC comuta das portas $1 \rightarrow 11$ e $3 \rightarrow 9$ para $1 \rightarrow 12$ e $4 \rightarrow 9$. Uma mensagem *Notify* com o sub-código de erro “*LSP Locally Failed*” é enviado para o nó destino. Também é enviada uma mensagem *Path Tear* para liberar os recursos do plano de controle.

Como o LSP com identificador 0 deve ser recuperado, o nó de origem inicia o estabelecimento de um novo LSP, com objeto *Association* contendo o identificador 0 do LSP com falha. Foi colocado um atenuador de 3 dB na porta 12 do OXC, de forma que o receptor do nó de destino, 13 segundos após a comutação do caminho de recuperação, percebe que a potência caiu abaixo do limiar de sensibilidade, conforme indicado no ponto **I** da Figura 3. A partir desse momento, o nó destino começa a gerar mensagens *Notify* com o indicativo de erro “*OTN Below Minimum Optical*” e intervalo T_{Notify} entre elas.

Ao receber a primeira mensagem *Notify*, o nó origem incrementa o ganho do seu amplificador de potência em 3 dB, elevando o ganho para 22 dB, como pode ser visto no ponto **J** da Figura 3.

Cerca de 5 segundos após o aumento do ganho, no ponto **K**, o receptor do nó destino verifica que a potência está entre os limiares estabelecidos. Verifica também que não há alarmes nem violação do limite aceitável da BER. Assim, cessa o envio de mensagens *Notify*.

O tempo total decorrido pela recuperação foi de cerca de 24,3 segundos e necessitou somente de uma iteração do algoritmo. Deste tempo total, a troca de mensagens de sinalização foi responsável por um tempo ínfimo, de cerca de 10 milissegundos. Assim, quase a totalidade do tempo gasto na recuperação é devido aos tempos de resposta dos equipamentos.

A Figura 4 representa o experimento mostrado na Figura 3, mas observado sob a ótica da troca de mensagens RSVP-TE entre o nó origem e o nó destino. Para facilitar a leitura de tal gráfico, as mensagens *Resv* e *ResvConfirm* foram omitidas, pois as mesmas acontecem frações de segundo após uma mensagem *Path*.

Observe que, durante o processo de configuração dos amplificadores para se ter uma potência e uma BER dentro dos níveis aceitáveis, o processo de manutenção do LSP acontece de forma independente.

5. Conclusões

Neste trabalho, foi proposto um algoritmo que é capaz de estabelecer, manter e restaurar um caminho ótico com determinado QoT em redes com interfaces ITU-T G.709 através do monitoramento proativo das camadas ótica e elétrica da rede.

Combinado com um criterioso projeto da rede, conforme preconizado na recomendação ITU-T G.697, o uso dos alarmes LOF e LOS em conjunto com o monitoramento da potência ótica recebida e dos valores de BIP-8 na extremidade da conexão constitui, de fato, uma solução fácil de ser implantada no gerenciamento de redes óticas de transporte (OTN).

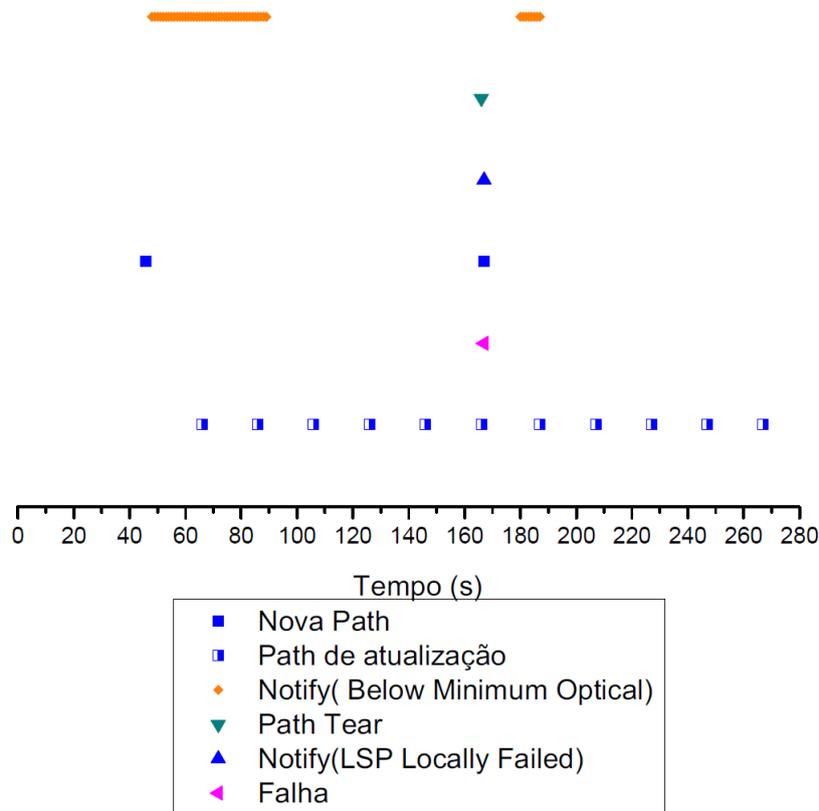


Figura 4. Troca de mensagens RSVP-TE no provisionamento e restauração do caminho ótico no experimento.

O algoritmo proposto necessita de poucas iterações para provisionar um caminho ótico, sendo que somente informações locais, presentes nas extremidades do caminho, são utilizadas nesse provisionamento. Assim, melhorias na velocidade de configuração dos equipamentos que compõe a rede são importantes para tal algoritmo. Na demonstração apresentada no artigo, o provisionamento de um caminho ótico foi alcançado em menos de 1 minuto para equipamentos de prateleira que demoram até 30 segundos para completar um comando de configuração. Nesse contexto, equipamentos que pudessem ser configurados na ordem de milissegundos fariam que o algoritmo proposto também conseguisse provisionar caminhos óticos nessa ordem de grandeza.

Diferentemente de propostas anteriores da literatura que modificam o protocolo de sinalização, não há necessidade da mensagem RSVP-TE coletar informações das restrições da camada física nos enlaces atravessados, como é feito em [Cugini et al. 2008], por exemplo. Em efeito, foi somente necessário estender o mecanismo tradicional do RSVP-TE, com a adição de novos sub-códigos de erro no objeto *ERROR_SPEC* da mensagem *Notify*, para que fosse possível um provisionamento distribuído e ciente das restrições da camada física na gerência dos caminhos óticos.

Trabalhos futuros incluem a simulação do algoritmo considerando-se conexões existentes na rede, mesmo que tal fato é raramente levado em consideração devido às dificuldades impostas pela interdependência das conexões já estabelecidas [Azodolmolky et al. 2009a].

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Fotônica para Comunicações Ópticas (FOTONICOM).

Referências

- Ali, M. (2001). *Transmission-efficient Design and Management of Wavelength-routed Optical Networks*. Kluwer Academics Publishers.
- Ali, M., Ramamurthy, B., and Deogun, J. (2000). Routing and wavelength assignment with power considerations in optical networks. *Computer Networks*, 32:539–555.
- Azodolmolky, S., Klinkowski, M., Marin, E., Careglio, D., Pareta, J., and Tomkos, I. (2009a). A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks. *Computer Networks*, 53:926–944.
- Azodolmolky, S., Klionidis, D., Tomkos, I., Yabin, Y., Saradhi, C., Salvadori, E., Gunkel, M., Manousakis, K., Vlachos, K., Varvarigos, E., Nejabati, R., Simeonidou, D., Eiselt, M., Comellas, J., Sole-Pareta, J., Simonneau, C., Bayart, D., Staessens, D., Colle, D., and Pickavet, M. (2009b). A dynamic impairment-aware networking solution for transparent mesh optical networks. *IEEE Communications Magazine*, 47(5):38–47.
- Berger, L. (2003). Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions. RFC 3473 (Proposed Standard).
- Cugini, F., Sambo, N., Andriolli, N., Giorgetti, A., Valcarenghi, L., Castoldi, P., Rouzic, E. L., and Poirrier, J. (2008). Enhancing GMPLS signaling protocol for encompassing quality of transmission (QoT) in all-optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 26(19):3318–3328.
- Gumaste, A. and Krishnaswamy, N. (2010). Proliferation of the optical transport network: a use case based study. *IEEE Communications Magazine*, 48(9):54–61.
- ITU-T Recommendation G.697 (2009). *Optical Monitoring for DWDM systems*. International Telecommunication Union.
- ITU-T Recommendation G.707 (2007). *Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)*. International Telecommunication Union.
- ITU-T Recommendation G.709 (2009). *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)*. International Telecommunication Union.
- ITU-T Recommendation G.872 (2001). *Architecture of optical transport networks*. International Telecommunication Union.
- Lang, J., Rekhter, Y., and Papadimitriou, D. (2007). RSVP-TE Extensions in Support of End-to-End Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Recovery. RFC 4872 (Proposed Standard).
- Liu, L., Tsuritani, T., and Morita, I. (2011). Experimental investigation of dynamic impairment-aware bi-directional lightpath provisioning in GMPLS-enabled optical networks. In *Asia Communications and Photonics Conference (ACP2011)*, pages 1–6.

- Mannie, E. (2004). Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture. RFC 3945 (Proposed Standard).
- Martínez, R., Casellas, R., Muñoz, R., and Tsuritani, T. (2010). Experimental translucent-oriented routing for dynamic lightpath provisioning in GMPLS-enabled wavelength switched optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 28(8):1241–1255.
- Pan, J., Paul, S., and Jain, R. (2011). A survey of the research on future internet architectures. *IEEE Communications Magazine*, 49(7):26–36.
- Pavani, G. S. and Waldman, H. (2004). Using genetic algorithms in constrained routing and wavelength assignment. In *8th IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modelling – ONDM'04*, volume 1, pages 565–584.
- Pavani, G. S., Zuliani, L. G., Waldman, H., and Magalhães, M. (2008). Distributed approaches for impairment-aware routing and wavelength assignment algorithms in GMPLS networks. *Computer Networks*, 52(10):1905–1915.
- Ramamurthy, B., Datta, D., Feng, H., Heritage, J., and Mukherjee, B. (1999). Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 17(10):1713–1723.
- Teixeira, A., Costa, L., Franzl, G., Azodolmolky, S., Tomkos, I., Vlachos, K., Zsigmond, S., Cinkler, T., Gravey, G. T.-B. P., Loukina, T., Lázaro, J., Vazquez, C., Montalvo, J., and Rouzic, E. (2009). An integrated view on monitoring and compensation for dynamic optical networks: from management to physical layer. *Photonic Network Communications*, 18:191–210.