

TUTORIAL Nº 3

Visão Geral do GMPLS

1 - OBJETIVO

O objetivo deste tutorial é apresentar uma visão geral do GMPLS, relacionando e conceituando os aspectos primordiais em que se fundamenta o GMPLS, visão essa a ser utilizada como embasamento para o entendimento das funções primordiais e do enfoque completo dessa importante tecnologia de plano de controle, de ampla aplicação.

Não foram intencionalmente abordados com a devida atenção os seguintes aspectos do GMPLS, que serão tratados, por sua importância, em próximos tutoriais especificamente a eles dedicados:

- Roteamento no GMPLS;
- Sinalização no GMPLS;
- Aplicações do GMPLS.

2 - INTRODUÇÃO

O GMPLS consiste em um conjunto de protocolos e funções de plano de controle, que se destina a controlar o funcionamento do plano de dados de múltiplas tecnologias de redes comutadas modo pacote e de redes comutadas modo circuito. O termo “*generalized*” decorre dessa multiplicidade de aplicações.

Como vimos no tutorial anterior, o desenvolvimento do GMPLS tem como base o plano de controle do RSVP-TE. A arquitetura do GMPLS foi definida pelo IETF com a emissão da RFC 3945 (*Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS) Architecture*), em outubro de 2004.

Até um certo ponto, o GMPLS opera de modo análogo ao plano de controle do RSVP-TE. Ambos suportam engenharia de tráfego, utilizando roteamento explícito na fonte (*source routing*) e *constrained-routing*, com distribuição de labels *downstream* no sentido *upstream*.

O GMPLS oferece algumas funções inexistentes no plano de controle do RSVP-TE, como por exemplo a distribuição de labels *upstream* no sentido *downstream*. Essa função torna possível o estabelecimento de LSPs bidirecionais corroteados pelo GMPLS.

Em paralelo com os esforços do IETF, registra-se as iniciativas do ITU-T e da OIF (*Optical Interworking Forum*) para o desenvolvimento de concepções tecnológicas de alguma forma conflituosas com o GMPLS. A concepção mais notória é a ASON (*Automatically Switched Optical Network*), desenvolvida pelo ITU-T.

ASON representa uma concepção arquitetônica mais ampla e mais abstrata, enquanto o GMPLS representa efetivamente um plano de controle. Para adequar o

GMPLS à ASON, o IETF emitiu, como base, a RFC 4139 (*Requirements for GMPLS Signaling Usage and Extensions for ASON*).

Os protocolos que fundamentam o GMPLS são os seguintes:

- Para roteamento, o protocolo GMPLS OSPF-TE ou o protocolo GMPLS ISIS-TE (IS-IS TE);
- Para sinalização, o protocolo GMPLS RSVP-TE;
- Para gerenciamento de link, o protocolo LMP (*Link Management Protocol*).

Os protocolos acima relacionados, assim como o processo de cálculo de rotas, serão abordados com maiores detalhes em futuros capítulos deste livro.

Dada a amplitude da missão estabelecida para o GMPLS, foram definidas algumas funções adicionais para o GMPLS, dentre as quais destacam-se as seguintes:

- Controle de redes modo circuito comutadas e de redes modo pacote comutadas (controle generalizado);
- Plano de controle do GMPLS operando com rede independente da rede do plano de dados da rede controlada;
- Possibilidade de constituição de TE LSPs bidirecionais, simétricos ou assimétricos, em uma única instância de sinalização;
- Possibilidade de constituição de conexões (TE LSPs) e de chamadas (*calls*).

3 – CONTROLE GENERALIZADO

O GMPLS foi concebido para suportar tipos múltiplos de redes comutadas. Além de controlar a operação do plano de dados do MPLS-TP e de outras possíveis redes modo pacote, o GMPLS abrange o controle das versões comutadas de redes TDM como SDH e OTN, de redes WDM e de redes ópticas.

3.1 – Hierarquização de TE LSPs

Para possibilitar o controle de diferentes tipos de rede, o GMPLS opera em cinco níveis hierárquicos de TE LSPs, que se encontram a seguir relacionados em escala crescente de níveis:

- *Fiber Switch Capable* (FSC), utilizando Fiber LSPs;
- *Lambda-Switch Capable* (LSC), utilizando λ LSPs;
- *Time-Division Multiplexing Capable* (TDM), utilizando TDM LSPs;
- *Layer-2 Switch Capable* (L2SC), utilizando *Layer 2* LSPs;
- *Packet-Switched Capable* (PSC), utilizando *Packet* LSPs.

Nos termos definidos pelo IETF, os tipos de comutação (*switching types*) acima relacionados são classificados, de acordo com as respectivas capacidades de comutação, como diferentes tipos de SC (*switch capable*). Um tipo de SC é também referido como ISC (*interface switching capability*).

A Figura 1 apresenta a estrutura hierarquizada dos níveis de TE LSPs acima relacionados.

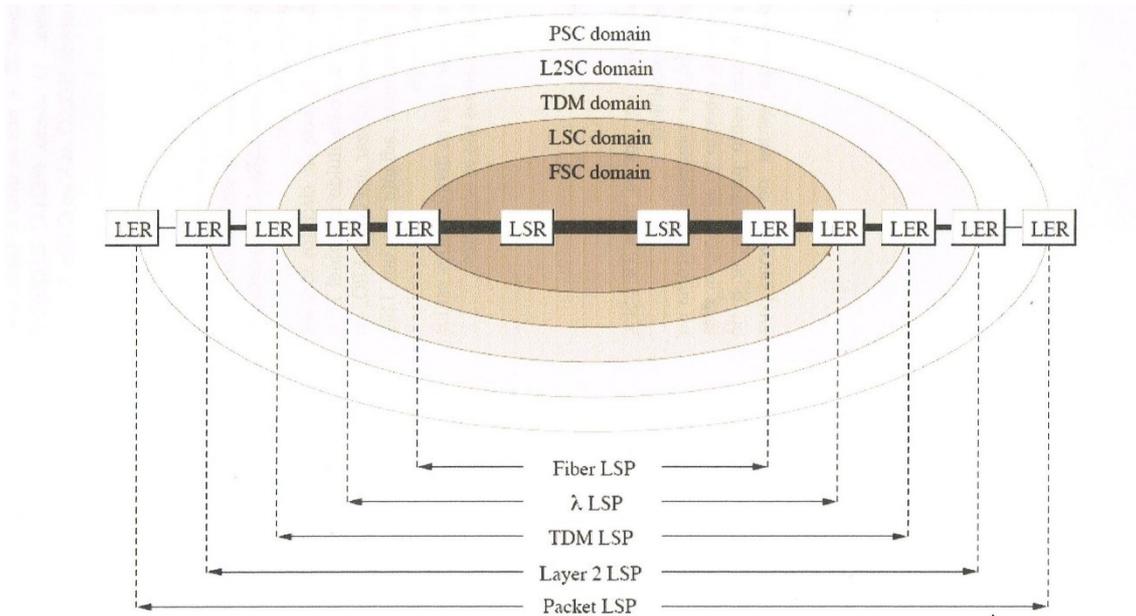


Figura 1 - Níveis hierárquicos dos tipos de comutação no GMPLS.

A Figura 2, por sua vez, evidencia a multiplexação que inerentemente acompanha a hierarquização dos TE LSPs no GMPLS.

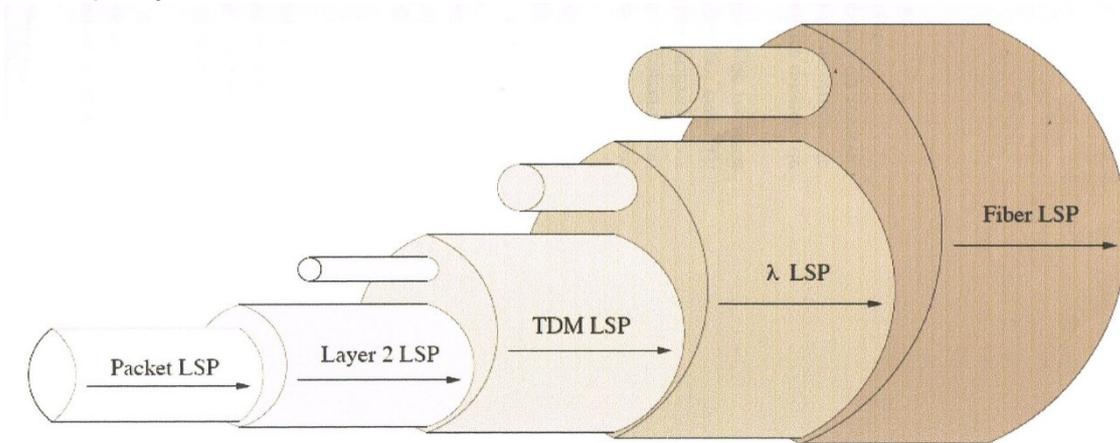


Figura 2 - Multiplexação de TE LSPs hierarquizados no GMPLS.

Como mostra a figura, os TE LSPs de níveis hierárquicos, ou regiões hierárquicas, superiores são multiplexados e transportados pelos TE LSPs de níveis hierárquicos a eles inferiores.

Um TE LSP de nível hierárquico superior pode ser transportado por um TE LSP do nível hierárquico inferior mais próximo disponível. Assim, por exemplo, um TE LSP MPLS-TP (PSC) será transportado diretamente por um comprimento de onda (LSC) caso não exista TDM.

Em redes modo pacote controladas pelo GMPLS, os labels são utilizados tanto no plano de controle quanto no plano de dados. Em redes modo circuito controladas pelo GMPLS, no entanto, os labels são utilizados apenas no plano de controle. Após o seu

estabelecimento, uma conexão modo circuito não requer qualquer tipo de identificação na informação para o seu encaminhamento.

Para atender o vasto domínio de aplicação do GMPLS são necessários diferentes formatos de labels. A RFC 3471 (*Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Functional Description*) definiu um novo tipo de label, referido como label generalizado (*generalized label*), que engloba todas as formas de label utilizadas no GMPLS.

Um label generalizado pode identificar, por exemplo, uma posição em um multiplex por divisão de espaço, um time-slot em um TDM ou a posição de um comprimento de onda em um WDM. Por outro lado, o label generalizado pode representar também um label genérico, um DLCI (Frame Relay) ou um par VPI/VCI (ATM), no caso do MPLS-TP.

Foram especificadas pelo IETF, dentre outras, as seguintes aplicações do GMPLS:

- MPLS-TP (*MPLS Transport Profile*), no nível PSC;
- SONET/SDH comutado, no nível TDM;
- OTN comutado, no nível TDM;
- WSON (*Wavelength Switched Optical Network*), no nível LSC;
- Rede de fibras ópticas comutada, no nível FSC.

3.2 - Redes Ópticas Comutadas

As redes ópticas comutadas serão abordadas neste tutorial apenas sob o ponto de vista de sua utilização com o GMPLS.

As redes ópticas, comutadas ou não, admitem duas formas de constituição:

- Redes com apenas sinais ópticos;
- Redes com sinais elétricos e sinais ópticos (como SDH e OTN, por exemplo);

Dentre as redes com apenas sinais ópticos não comutadas, podem ser citados os seguintes exemplos:

- Fibras ópticas;
- Sistemas WDM (CWDM e DWDM);
- Sistemas OTDM (*Optical TDM*).

Redes com sinais elétricos e sinais ópticos modo circuito não comutadas, como por exemplo redes SDH e OTN, assim como redes com apenas sinais ópticos não comutadas acima relacionadas, podem ser interligadas por meio de cross-conectores para constituir redes comutadas.

Em função do tipo de sinal de ingresso e egresso, assim como do tipo de sinal comutado, os cross-conectores podem ser classificados da seguinte forma:

- Cross-conectores EEE (*Electrical, Electrical, Electrical*);
- Cross-conectores OEO (*Optical, Electrical, Optical*);
- Cross-conectores OOO (*Optical, Optical, Optical*).

Dentre os tipos mais utilizados de cross-conector, podem ser destacados os seguintes:

- ADM (*Add-Drop Multiplexer*);
- DXC (*Digital Cross-Connect*) ou DCS (*Digital Cross-Connect System*);
- OADM (*Optical ADM*) ou WADM (*Wavelength ADM*);
- OXC (*Optical Cross-Connect*) ou PXC (*Photonic Cross-Connect*);
- WSXC (*Wavelength-Selective Cross-Connect*);
- MG-OXC (*Multigranularity OXC*);
- ROADM (*Reconfigurable OADM*);
- ROXC (*Reconfigurable OXC*).

A título de ilustração, a Figura 3 apresenta um exemplo de utilização de um OADM contendo duas terminações de sistemas WDM com M λ_s .

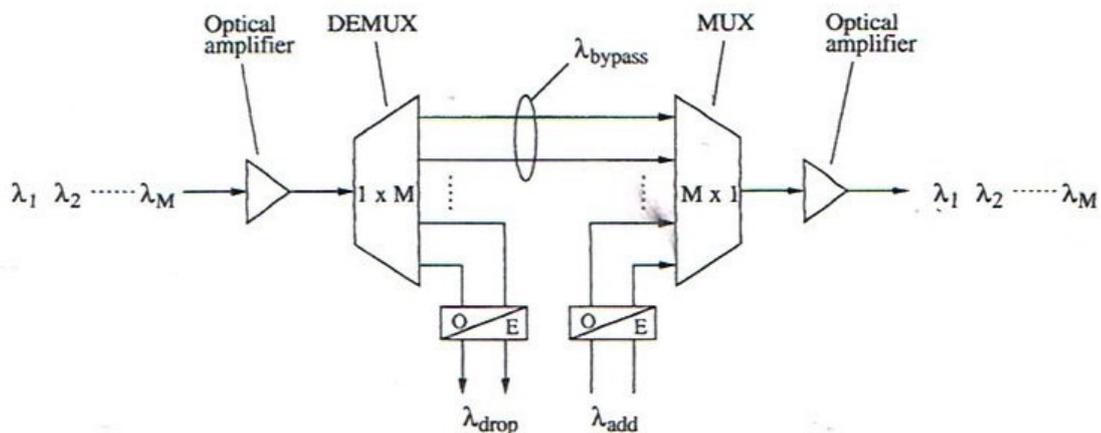


Figura 3 - OADM com M λ_s (livro *Optical Switching Networks*, Cambridge University Press).

Como se observa nessa figura, um determinado número de λ_s bypassa o OADM em nível óptico.

No DEMUX, os demais lambdas, ou parte deles, são retirados localmente (*dropped*), através de conversores OE. No MUX, um outro subconjunto de λ_s não bypassados é inserido (*added*), utilizando agora conversores EO.

Na fase inicial de funcionamento, os cross-conectores acima listados destinavam-se apenas à comutação por cross-conexão, quando a comutação ocorre administrativamente, sob o comando da gerência da rede. Ademais, os cross-conectores eram todos configurados de forma estática, com limitada flexibilidade para alterações.

Foram então criados os OADMs e OXCs reconfiguráveis, referidos respectivamente como ROADM e ROXC. Esses novos dispositivos possibilitam aos administradores de rede selecionar, via software de gerenciamento, que canais WDM serão acrescentados, retirados, bloqueados ou redirecionados na comutação. Registra-se que as versões convencionais de OADM e de OXC continuam sendo utilizadas.

As redes TDM utilizam cross-conectores ADM ou DXC, que são do tipo EEE.

Os cross-conectores MG-OXC são utilizados no caso de WBS (*Waveband Switching*), quando uma faixa de comprimentos de onda (ou seja, uma *waveband*) é comutada em conjunto.

A comutação óptica ocorre nas seguintes principais granularidades:

- *Fiber switching*;
- *Waveband switching* (WBS);
- *Wavelength switching*;
- *Subwavelength switching*;
- *Optical circuit switching* (OCS);
- *Optical burst switching* (OBS);
- *Optical packet switching* (OPS).

Para entendimento da classificação acima, vamos definir o que são as AONs (*All-Optical Networks*). AONS são, rigorosamente, redes constituídas por links e dispositivos por onde cursam exclusivamente sinais ópticos.

Um dos tipos de AON são as redes por comutação de circuito óptica (ou seja, as redes OCS), onde os circuitos são comutados na granularidade de comprimento de onda. Uma rede OCS utiliza exclusivamente cross-conectores do tipo OOO.

A partir da definição da arquitetura ASON (*Automatic Switched Optical Networks*) pelo ITU-T e da tecnologia GMPLS pelo IETF, os cross-conectores utilizados para comutação em redes ópticas de transporte passaram a ser adaptados para operar com comutação automática, com sinalização. No caso do GMPLS, isso significa que os cross-conectores passaram a funcionar como LSRs.

De início, as redes de transporte que atendiam a arquitetura ASON foram genericamente denominadas ASTNs (*Automatic Switched Transport Networks*).

Observa-se que, como as ASTNs não se restringem ao domínio óptico, passou-se a referir-se às ASTNs também como ASONs para o caso de redes ópticas de transporte. Assim, redes de fibras ópticas, WDM, OTDM, SDH e OTN são exemplos de ASON.

Merece menção também as redes ópticas denominadas *multiprotocol Lambda switching* (*MPLambdaS* ou *MPλS*). Essas redes, concebidas nos moldes do MPLS e de forma independente do GMPLS, restringem-se á comutação automática de canais WDM.

É preciso não confundir redes MPλS com redes WSON (*Wavelength Switched Optical Network*), que embora desempenhem funções similares às primeiras, têm as características próprias das aplicações do GMPLS.

4 - PLANO DE CONTROLE COM REDE INDEPENDENTE

No contexto do IP/MPLS (MPLS Básico e MPLS-TE), onde o plano de controle e o plano de dados operam ambos no modo pacote, as mensagens do plano de controle cursam usualmente pelos links utilizados pelos quadros de dados.

No caso do GMPLS, que controla tanto planos de dados modo pacotes quanto planos de dados de redes ópticas de transporte no modo circuito, contudo, ocorrem duas situações distintas.

Como o IETF deliberou pela operação do GMPLS utilizando a arquitetura TCP/IP, que é modo pacote, o controle de redes modo pacote pelo GMPLS ocorre em moldes análogos aos do MPLS-TE. Em outras palavras, o plano de controle e o plano de dados podem utilizar a mesma rede.

No caso de controle de redes óptica de transporte pelo GMPLS, no entanto, as mensagens do plano de controle não devem transitar pelos canais utilizados pelo plano de dados. O plano de controle utiliza usualmente uma rede independente da rede do plano de dados. Dessa forma, falhas no plano de controle não afetam a operação do plano de dados.

Os nós (*nodes*) da rede independente utilizada no plano de controle são referidos como controladores (*controllers*). Os controladores são conectados entre si por meio de canais de controle. Os controladores são conectados aos canais de controle através de interfaces de controle.

No plano de dados dessas redes, os switches de dados, ou switches de transporte, que constituem os LSRs, são interconectados por canais de dados. Os canais de dados podem existir sob a forma de links isolados ou sob a forma de agregados de links (*link bundles*).

Um link de dados ou um agrupamento de links de dados configurado com os atributos de link necessários para fins de roteamento, constitui um link TE.

Em redes ópticas de transporte controladas pelo GMPLS, os LSRs são tipicamente crossconectores ópticos ou digitais configurados com funções GMPLS. Os canais de dados que interligam esses LSRs transportam apenas o tráfego de dados, uma vez que as mensagens de controle cursam pelos canais de controle.

Um par de LSRs pode ser interconectado por um ou mais links de dados da mesma camada de rede, ou por dois ou mais links de dados de diferentes camadas de rede. Em redes ópticas de transporte, os links de dados são usualmente bidirecionais, o que se reflete certamente nos LSPs com eles constituídos.

A conexão dos LSRs aos links de dados ocorre localmente através das interfaces de dados, também referidas como interfaces de link ou simplesmente interfaces.

As informações no domínio de roteamento TE são referentes a links TE. Contrastando com os links de dados, que são físicos, os links TE são agrupamentos lógicos de recursos de rede para fins de roteamento.

A separação de canais ou de redes entre o plano de controle e o plano de dados pode ocorrer em dois modelos:

- Modelo *in-fiber-out-of-band*;
- Modelo *out-of-fiber-out-of-band*.

No primeiro modelo, as mensagens do plano de controle podem cursar na mesma fibra óptica que as mensagens do plano de dados, porém através de um canal dedicado a esse propósito, como por exemplo um canal WDM ou um *time-slot* de TDM. Nesse caso, o canal dedicado para controle é referido como um *optical supervisory channel* (OSC).

No segundo modelo, o trânsito das mensagens do plano de controle pode se dar por um link físico independente na própria rede do plano de dados ou mesmo por uma rede separada, como por exemplo uma rede IP.

A Figura 4 exibe um exemplo de separação entre os tráfegos do plano de controle e do plano de dados, onde são aplicados os dois modelos acima mencionados e ilustrados os conceitos acima apresentados.

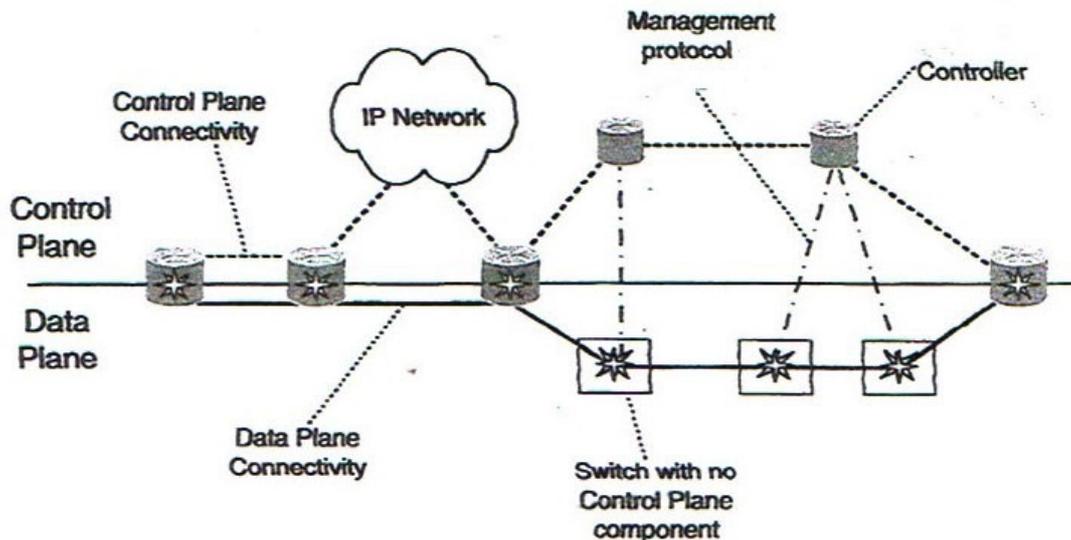


Figura 4 - Exemplo de separação do plano de controle e do plano de dados (livro GMPLS - Architecture and Applications, editora Morgan Kaufmann).

No primeiro link à esquerda na figura observa-se a aplicação do primeiro modelo, onde se constata o uso de um OSC entre os dois primeiros LSRs.

Para os demais links a partir do segundo LSR à esquerda, aplica-se o segundo modelo. No link entre o segundo LSR e o terceiro LSR, opera uma rede IP independente para o plano de controle. Observa-se que esses LSRs acumulam a função de controle nesse trecho da rede.

Cada controlador comunica-se com o LSR ou os LSRs por ele controlado(s) por meio de um protocolo de gerenciamento, como o *Link Management Protocol* (LMP). Por esse protocolo, cada um dos LSRs recebe mensagens de controle enviadas pelo seu controlador.

Após o devido tratamento das mensagens recebidas, o LSR as reenvia para o respectivo controlador, que se encarrega da sua transmissão pelo devido canal de controle para o próximo controlador. Esse procedimento processa-se entre o *head end LSR* e o *tail end LSR* do LSP, e vice-versa.

5 - BIDIRECIONALIDADE DE TE LSPs

No IP/MPLS, os LSPs são unidirecionais. Quando desejado, um processo inverso independente é utilizado para a constituição de um LSP no outro sentido, podendo levar a um LSP bidirecional.

A constituição de LSPs bidirecionais dessa forma, no entanto, apresenta algumas dificuldades, dentre as quais evidenciam-se as seguintes:

- A independência dos processos pode conduzir ao uso de diferentes meios de transmissão, o que pode provocar variações de delays de quadros indesejáveis;
- Pode ocorrer falta ou insuficiência de recursos para a montagem do LSP inverso, o que pode conduzir à interrupção da sinalização em seu andamento;

- A instauração da bidirecionalidade com simetria de recursos é, de início, imprevisível;
- A bidirecionalidade requer dois processos completos de constituição de LSPs, o que representa uso desnecessário de recursos da rede.

No caso particular do GMPLS essa questão torna-se particularmente crítica. As aplicações de redes ópticas de transporte são tipicamente bidirecionais, exigindo simetria de recursos de rede nos dois sentidos.

A solução adotada no GMPLS é a constituição de TE LSPs bidirecionais, simétricos ou assimétricos, em um único processo de sinalização.

O ponto crucial para esse intento foi a definição de uso do label do tipo *upstream label*.

Na constituição de um TE LSP para o sentido *downstream* no MPLS-TE e no próprio GMPLS, o *head end LSR* requisita aos LSRs ao longo do percurso do ERO, pela mensagem *RSVP Path*, a atribuição de valores de labels *downstream*, a serem utilizados posteriormente para o tráfego no sentido *downstream*.

Na réplica, por meio da mensagem *RSVP Resv* iniciada pelo *tail end LSR*, cada um dos LSRs envia para o respectivo LSR *upstream* vizinho, o valor de label *downstream* por ele atribuído. Dessa forma, fica constituído o TE LSP para tráfego no sentido *downstream* (do *head end LSR* para o *tail end LSR*).

Para a constituição do TE LSP inverso, isto é, para tráfego no sentido *upstream*, ao contrário, são os LSRs *upstream* os responsáveis pela atribuição dos valores de label *upstream* solicitados, e por sua distribuição nas próprias mensagens *RSVP Path*. As mensagens *RSVP Resv* de resposta não contêm os valores de label *upstream*.

Quando um LSR recebe uma mensagem *RSVP Path* do seu LSR *upstream* trazendo o valor do label *upstream* atribuído, está sendo sinalizado para o LSR *downstream* que se trata de um LSP bidirecional, devendo então ser dado andamento aos procedimentos complementares aplicáveis.

Quando do envio da mensagem *RSVP Path*, o *head end LSR* indica os valores desejados de banda passante nos dois sentidos. Caso esses valores coincidam e o atendimento seja viável e se consume, fica constituído um TE LSP simétrico (em termos de reserva de bandas passantes).

6 - MLNs e MRNs

Como vimos no subitem 3.1 deste tutorial, os planos de dados das redes controladas pelo GMPLS constituem as diferentes ISCs, como por exemplo o PSC, o TDM e o LSC.

A RFC 5212 (*Requirements for GMPLS-Based Multi-Region and Multi-Layer Networks (MRN/MLN)*) especifica os conceitos de região (*region*) de plano de dados, ou simplesmente região, e de camada (*layer*) de plano de dados, ou simplesmente camada.

As regiões e as camadas são hierarquizadas em níveis, sendo que os níveis inferiores transportam sucessivamente os níveis superiores.

Um ISC identifica de modo único uma região, que pode ser composta por diferentes elementos. Um TDM SDH é composto, dentre outros tributários, por exemplo, por um OC-4 e um OC-12.

No exemplo anterior, o OC-4 e o OC-12 nos dois extremos de um TDM constituem duas camadas da região TDM.

Uma MRN é uma rede constituída pelo menos por dois tipos de ISC, controlados por uma única instância de plano de controle GMPLS.

Uma MLN, por sua vez, é uma rede constituída por duas ou mais camadas, contidas ou não em uma mesma região (mesmo ISC), controladas por uma única instância de plano de controle GMPLS. As MRNs são um caso particular de MLN quando as camadas se encontram em regiões diferentes.

Os LSRs que operam os planos de dados das redes controladas pelo GMPLS podem ser classificados em dois tipos, em conformidade com a forma de suporte às ISCs:

- LSRs que suportam apenas uma ISC (denominados *single-switching-type-capable LSRs*);

- LSRs que suportam mais que um ISC ao mesmo tempo (denominados *multi-switching-type-capable LSRs*).

Uma MLN pode ser constituída por qualquer combinação desses dois tipos de LSR.

Vale lembrar que, no GMPLS, os controladores dos planos de controle, ou do plano de controle, podem ou não co-residir com os LSRs, que operam os planos de dados.

7 - MODELOS DE SERVIÇO NO GMPLS

Como vimos na Figura 2 do subitem 3.1 anterior, o GMPLS utiliza uma hierarquia de camadas, onde uma camada de menor ordem transporta, com a possibilidade de multiplexação, a camada de maior ordem que se situa imediatamente acima dela.

Os modelos de serviço no GMPLS estabelecem o modo pelo qual funções de controle das camadas interligadas interagem para atender o tráfego de dados entre essas camadas.

Uma importante aplicação das redes controladas pelo GMPLS, inclusive do MPLS-TP, é interligar sites distintos de uma rede MPLS-TE ou mesmo de outros tipos de rede. Assim, a definição dos modelos de serviço no GMPLS objetiva particularmente o atendimento dessa aplicação.

Foram definidos pelo IETF os seguintes modelos de serviço no GMPLS:

- Modelo overlay (*overlay model*) ou modelo de serviço de domínio (*service model domain*);

- Modelo par (*peer model*) ou modelo de serviço unificado (*unified service model*);

- Modelo híbrido ou modelo aumentado (*augmented model*).

7.1 - Modelo Overlay

Em uma rede multi-camadas, utiliza-se o modelo overlay quando os planos de controle GMPLS das camadas envolvidas operam independentemente.

Estabelece-se uma interface entre camadas de modo tal que os nós da camada de nível superior, têm que solicitar serviços através da rede da camada de nível inferior. Uma vez disponibilizados esses serviços, a camada de nível superior pode passar a utilizá-los.

O modelo overlay apresenta características favoráveis. Podem ser citadas a maior confidencialidade entre os provedores e a maior flexibilidade na escolha de alternativas de serviços de conectividade por parte do provedor da camada de nível superior. Por outro lado, as camadas podem utilizar, por exemplo, diferentes protocolos de sinalização.

A interface de serviço entre camadas é definida em função das redes das camadas. Podem ser utilizados com esse propósito protocolos de gerenciamento como o SNMP ou o interfaciamento pode ocorrer por meio de um protocolo de sinalização como o GMPLS RSVP-TE ou um dos protocolos de UNI.

7.2 - Modelo Par

A melhor palavra para definir o modelo par é unificação. De fato, os planos de controle das camadas interligadas são unificados de forma tal que o controle global se processa em uma única instância de controle. Existe um único *head end LSR*, situado na borda da camada de nível superior, e uma única TED armazena as informações de roteamento do conjunto de camada envolvidas.

No modelo par, utiliza-se um único processo de cálculo de rotas e um único e integrado protocolo de sinalização. Para a aplicação do modelo par, é necessário que todas as camadas envolvidas suportem o GMPLS.

Observa-se então que, considerando-se as camadas envolvidas em uma aplicação do modelo par, o conjunto dessas camadas constitui uma MLN.

A grande vantagem do modelo par é que os serviços podem ser concebidos e provisionados de um modo globalmente direcionado para as necessidades do usuário e, de forma integrada. Essa integração libera os provedores do exaustivo trabalho de associação entre os TE LSPs das diferentes camadas, o que ocorre tipicamente de modo administrativo.

Registramos, contudo, a ocorrência de um certo grau de perda de confiabilidade entre os provedores, além da perda de um certo grau de flexibilidade na definição de opções de serviço.

7.3 - Modelo Híbrido

O modelo de serviço híbrido no GMPLS busca atenuar, em uma única solução intermediária, as limitações do modelo overlay e do modelo par. O modelo híbrido reduz o controle mútuo entre camadas como ocorre no modelo par, ao mesmo tempo que permite um certo grau de otimização no provisionamento de serviços de nível superior através da camada de nível inferior, otimização essa que não ocorre no modelo overlay.

No modelo híbrido, a fronteira entre camadas pode compartilhar diferentes quantidades de informação, de maneira intermediária entre os outros dois modelos. Com esse propósito, são instalados, nessa fronteira, nós de borda que recebem informações de roteamento dos domínios das camadas que se comunicam.

São armazenadas, em databases distintos, as informações de roteamento dos domínios das camadas, diferentemente do que se passa no modelo par, onde essas informações se concentram em uma única TED situada no *head end LSR* da camada de nível superior.

É possibilitado aos nós de borda calcular rotas e controlar a constituição de TE LSPs na camada de nível inferior, e de associá-los à camada de nível superior.

Como a plena visibilidade da camada de nível inferior é exclusiva para os nós de borda, torna-se possível, do mesmo modo que no modelo overlay, utilizar-se, no nível superior, redes que não capazes de suportar o GMPLS.

8 - CONEXÕES (TE LSPs) e CALLS (CHAMADAS)

A arquitetura ASON especificou dois conceitos de sinalização para a efetivação da comunicação e do provisionamento de serviços. Esses conceitos dizem respeito à constituição de conexões e à constituição de chamadas (*calls*).

Chamada é uma associação fim a fim entre dois pontos finais (LSRs de borda). As chamadas são utilizadas para facilitar e gerenciar o funcionamento de um conjunto de TE LSPs que proveem serviços de dados fim a fim.

Uma chamada não provê conectividade real para transmissão de dados, mas apenas constrói uma relação fim a fim pela qual podem ser estabelecidos subsequentemente TE LSPs terminando nesses LSRs de borda.

O conceito de chamada foi assimilado pelo IETF para aplicação no GMPLS. Dessa forma, foi emitida a RFC 4974 (*Generalized MPLS (GMPLS) RSVP-TE Signaling Extensions in Support of Calls*), estendendo o RSVP-TE para sinalização objetivando a constituição de chamadas.

Os mecanismos definidos na RFC 4974 são aplicáveis para qualquer tipo de interface, ou seja, pacotes, camada 2 (*layer 2*), TDM, *lambda* ou fibra.

As chamadas são construídas pelo sequenciamento de segmentos de chamadas (*call segments*), que representam associações entre dois pontos de trânsito ou entre um ponto final e um ponto de trânsito.

Uma chamada pode estar associada a nenhum, a um ou a mais de um TE LSP, e um TE LSP pode estar associado a nenhuma ou a uma chamada. Em consequência, torna-se necessária a separação total e lógica entre TE LSPs e chamadas.

Chamadas e conexões são estabelecidas independentemente. O estabelecimento de chamadas realiza-se por meio do intercâmbio de mensagens *Notify* entre um iniciador e um respondedor dessas mensagens. A mensagem *Notify* é uma mensagem endereçada (*targeted*), não necessitando assim seguir o ERO das mensagens para o estabelecimento de TE LSPs.

Uma configuração GMPLS possui sempre uma rede controlada por GMPLS central, referida como rede *core*. O iniciador de chamadas, e também de TE LSPs associados às chamadas, podem localizar-se no interior ou no exterior da rede *core*. A localização exterior pode ocorrer quando a rede interligada pela rede *core*, referida como rede de borda (*edge network*), é também controlada por GMPLS.

A Figura 5 ilustra a utilização de uma chamada fim a fim, iniciada e terminada na rede de borda, constituída, por opção, por uma sequência de segmentos de chamada.

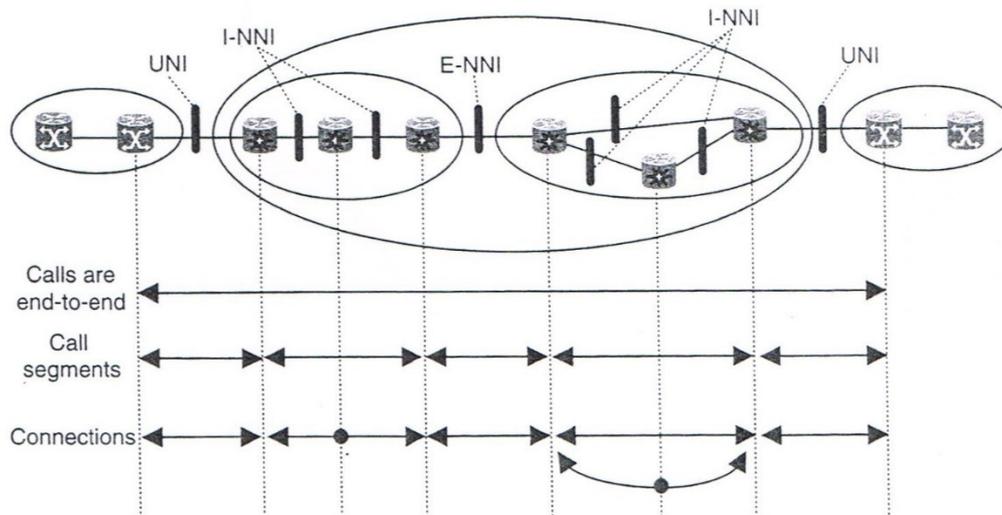


Figura 5 - Chamada/segmentos de chamada e LSPs com terminações na rede de borda (livro GMPLS - Architecture and Applications, editora Morgan Kaufmann).

Observem que a chamada fim a fim e os segmentos de chamada têm as suas terminações obrigatoriamente localizadas em LSRs diretamente conectados a UNIs ou a E-NNIs.

Paralelamente à chamada fim a fim e aos respectivos segmentos de chamada, a figura mostra também uma sequência de conexões que operacionalizam os segmentos de chamada. Embora a figura não mostre, podem existir um ou mais LSPs fim a fim que suportam a chamada fim a fim.

Observa-se também na figura, que, diferentemente do que ocorre em chamadas, todos os LSRs no percurso das conexões envolvem-se no processamento para possibilitar o fluxo de dados. A possibilidade da multiplicidade de conexões sobre uma chamada encontra-se ilustrada na parte direita da figura.

O link entre o nó *core* e o nó de borda do lado do iniciador e do lado do respondedor no estabelecimento de uma chamada, são referidos, respectivamente, como link de rede de ingresso e link de rede de egresso.

As informações de roteamento do link de rede de acesso, necessárias para o adequado cálculo de rotas na fase subsequente de constituição de TE LSPs associados à chamada, não são normalmente obteníveis por meio do roteamento no GMPLS.

Caso essas informações se encontrem disponíveis na TED do nó iniciador, elas serão utilizadas para cálculo de rotas. Caso contrário, o próprio mecanismo de constituição da chamada proporciona uma solução para o problema.

As chamadas são sinalizadas por meio de mensagens *Notify*. Na mensagem *Notify* enviada pelo nó iniciador para o estabelecimento da chamada, podem ser enviados os parâmetros desejados para os subsequentes TE LSPs.

O nó respondedor pode então utilizar os parâmetros recebidos para selecionar um subconjunto de links de rede de egresso, e reportá-los na mensagem *Notify* de resposta, discriminando as respectivas capacidades.

Dessa forma, o nó iniciador pode selecionar um link de rede de acesso de egresso adequado para cada TE LSP que venha a ser constituído.

A título de informação, observamos que, no caso de rede MPLS, os LSPs terminam invariavelmente nos PEs, ou seja, no interior da rede.

9 – LINKS E LSPs ESPECIAIS

O presente item é dedicado aos diferentes conceitos e mecanismos definidos pelo IETF para a constituição de links e de LSPs especiais. Serão apresentados os seguintes mecanismos:

- Links não numerados, com base na RFC 3477 (*Signalling Unnumbered Links in Resource ReSerVation Protocol – Traffic Engineering (RSVP-TE)*);
- Agregação de links (*link bundling*), com base na RFC 4201 (*Link Bundling in MPLS Traffic Engineering (TE)*);
- *Forwarding adjacencies (FAs)*, com base na RFC 4206 (*Label Switched Paths (LSPs) Hierarchy with Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Traffic Engineering (TE)*);
- LSPs hierarquizados (H-LSPs), com base na RFC 6107 (*Procedures for Dynamically Signaled Hierarchical Label Switched Paths*);
- *LSP Stitching* com GMPLS TE, com base na RFC 5150 (*Label Switched Path Stitching with Generalized Multiprotocol Label Switching Traffic Engineering (GMPLS TE)*).

9.1 – Links não numerados

Até a emissão da RFC 3477, a sinalização para o MPLS-TE, e conseqüentemente para o GMPLS, não dispunha de suporte para links não numerados, ou seja, para links que não possuem endereços IP.

A RFC 3477 define procedimentos e extensões necessários para a sinalização de links não numerados especificamente pelo RSVP-TE.

O suporte a links não numerados pelo RSVP-TE, envolve também a habilidade de transportar informações relativas a esses links pelos protocolos de roteamento TE.

Anteriormente à RFC 3477, o RSVP-TE não suportava links não numerados porque não possuía uma forma de indicar esses links nos objetos ERO e RRO.

Um link não numerado tem que ser ponto a ponto. Para a identificação de um link não numerado, cada LSR em suas extremidades atribui um identificador para si. Esse identificador é um número com 32 bits, que é único no escopo do LSR que o atribuiu.

Os dois LSRs nos extremos de um link não numerado intercambiam os valores dos identificadores por eles atribuídos. Esse intercâmbio pode ocorrer por configuração, por meio de um protocolo como o LMP, por meio de extensões do OSPF ou do ISIS ou por meio do próprio RSVP-TE.

Do ponto de vista de cada um dos LSRs de um link não numerado, o identificador por ele atribuído é referido como “identificador local de link”, ou simplesmente “identificador local”. O identificador atribuído pelo outro LSR, por sua vez, é referido como “identificador remoto de link”, ou simplesmente “identificador remoto”.

9.2 – Agregação de Links (Link Bundling)

Conforme a RFC 4201, o propósito da agregação de links (*link bundling*) é aumentar a escalabilidade da rede pela redução da quantidade de informação que é conduzida pelas extensões do OSPF e/ou do IS-IS para TE. Em outras palavras, agregação de links

reduz o volume de divulgações do roteamento TE, reduzindo, conseqüentemente o tamanho das TEDs.

Para que ocorra a agregação de dois ou mais links, é necessário que esses links satisfaçam as seguintes condições:

- Eles devem iniciar e terminar nos mesmos LSRs;
- Eles devem possuir o mesmo tipo de link (ou seja, ponto a ponto ou multiponto);
- Eles devem possuir a mesma métrica TE;
- Eles devem possuir o mesmo conjunto de classes de recurso em cada terminação de link.

Se todos os links forem multipontos, para que eles constituam um agregado de links é necessário que o conjunto de roteadores a eles conectados seja o mesmo, e que o roteador designado para cada um desses links seja o mesmo.

A RFC 4201 especifica uma forma de sumarizar os atributos de links de dados paralelos que satisfaçam as condições acima, e divulgar todo o agregado como um único link TE, ou seja, em um único *Link TLV* do OSPF-TE ou do GMPLS OSPF-TE, ou então em um único *Extended IS Reachability TLV* do ISIS-TE ou do GMPLS ISIS-TE.

Um link de dados no interior de um agregado de links é referido como um link componente, que é identificado por um link componente ID. Os links componentes IDs são relevantes exclusivamente no escopo dos controladores que controlam os LSRs nas extremidades do agregado de links.

Cabe ao controlador que controla o LSR *upstream* do agregado de links a responsabilidade da escolha do link componente a ser utilizado em cada LSP em constituição. A definição do LSR *upstream* diz respeito ao sentido do estabelecimento do LSP. A escolha é sinalizada para o controlador ou controladores que controla(m) o outro LSR ou os outros LSRs do agregado de links.

Em configurações de rede em que ocorre o paralelismo de links ou de LSPs, constata-se ambigüidade na identificação de cada um deles. A agregação desses links e/ou desses LSPs elimina essa ambigüidade, pela identificação de cada um deles como um link componente.

Observa-se que links não numerados podem constituir-se em links componentes de um agregado de links, inclusive juntamente com links numerados e com FAs, ressalvado o atendimento das condições para tanto.

9.3 - Forwarding Adjacencies (FAs)

O conceito de *forwarding adjacency* (FA) foi ventilado em diferentes RFCs para aplicação no MPLS-TE e no GMPLS, mas a sua especificação formal foi efetivada na RFC 4206.

Forwarding adjacency é uma ferramenta que possibilita ao administrador da rede constituição de TE LSPs entre dois quaisquer LSRs de uma rede MPLS-TE ou GMPLS, de forma tal que esse TE LSPs se comportem como um único link TE. Objetiva-se, dessa forma, a redução da carga de overhead na rede.

O tratamento de uma FA como um só link TE afeta a transmissão de informações de roteamento, o cálculo de rotas e a sinalização. Os objetos ERO e RRO, por exemplo,

transportam uma única informação de rota correspondente a uma FA, ao invés das múltiplas rotas que compõem essa FA.

Os LSRs conectados por um link TE comum podem possuir uma adjacência de roteamento. Contudo, os LSRs conectados por uma FA não possuem usualmente adjacências de roteamento, uma vez que as adjacências de roteamento se encontram entre os LSRs que compõem a FA.

Os LSRs limites de um link TE de qualquer tipo, seja do tipo comum seja uma FA, podem possuir uma adjacência de sinalização, para com isso possibilitar o estabelecimento de TE LSPs utilizando o link.

A criação de uma FA pode ser concretizada por meios administrativos via plano de gerenciamento, ou por meio de sinalização controlada pelo *head end LSR* da FA.

A RFC 4206 só considera o caso em que a criação de uma FA e a sua utilização como um link TE ocorrem em uma mesma instância do plano de controle.

Quando múltiplos FA LSPs começam e terminam em um mesmo par de LSRs, a técnica *link bundling* pode ser aplicada, inclusive em conjunto com links TE. Ressalvase, contudo, a necessidade de satisfação das condições para essa possibilidade.

A Figura 6 apresenta uma rede GMPLS com a utilização de duas FAs.

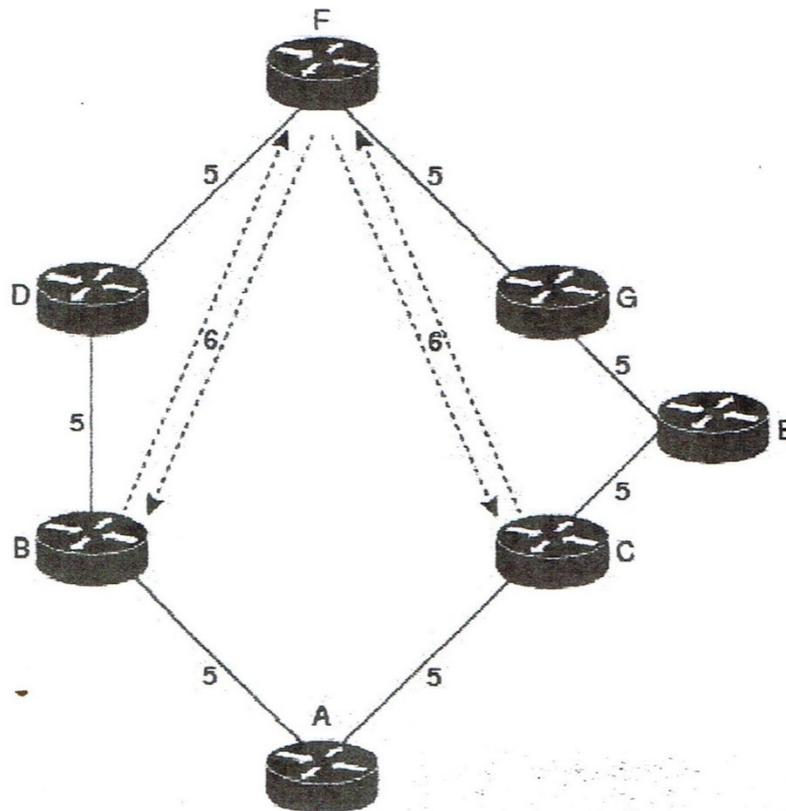


Figura 6 - Rede GMPLS com duas FAs.

Nessa figura, caso não houvessem sido criadas ainda as FAs representadas em linhas pontilhadas, todo o tráfego entre o LSR A e o LSR F fluiria pelos LSRs B e D, o que incorreria em um custo igual a 15 (3×5), inferior ao custo da outra alternativa, que é igual a 20 (4×5).

Não satisfeita com essa condição e com o propósito de reduzir a carga de controle na rede, foram criadas duas FAs na rede, com os respectivos FA-LSPs, uma no trecho

<LSR B, LSR F> e a outra no trecho <LSR C, LSR F>. Foram também criadas duas FAs nos sentidos inversos, que são as FAs <LSR F, LSR B> e <LSR F, LSR C>.

Para essas FAs foi atribuído o custo seis (6).

Dessa forma, após a constituição das FAs o caminho mais curto indicado para o tráfego entre os LSRs A e F passou a ser, indiferentemente, via LSRs B e D ou via LSRs C, E e G, pois ambos os caminhos passaram a apresentar o custo 11 (5+6).

Essa nova condição caracteriza o ECMP, possibilitando a aplicação de algoritmos para a distribuição do tráfego entre os dois caminhos.

9.4 - LSPs Hierarquizados (H-LSPs)

O conceito de LSP hierarquizado foi abordado inicialmente na RFC 4206, mas a sua definição foi formalizada na RFC 6107 (*Procedures for Dynamically Signaled Hierarchical Label Switched Paths*).

É possível a criação de TE LSPs (que passaremos a denominar simplesmente LSPs neste item) entre dois quaisquer LSRs, adjacentes ou não adjacentes, de um TE LSP fim a fim. Os LSPs assim criados podem ser classificados da seguinte forma:

- LSPs ordinários;
- LSPs hierarquizados (H-LSPs);
- Stitching LSPs (S-LSPs).

Os H-LSPs e S-LSPs constituem a base para a construção de TE links em uma rede MPLS-TE ou em redes controladas pelo GMPLS (redes GMPLS), sendo coletivamente referidos como links virtuais.

Os H-LSPs podem constituir *forwarding adjacencies* (FAs) caso sejam instalados como links TE incorporados a uma instância do plano de controle.

Sendo links TE virtuais, os H-LSPs ou os S-LSPs, assim como as FAs em geral, podem ser agrupados (*bundled*) nos termos da RFC 4201, desde que comecem e terminem nos mesmos LSRs e que possuam as mesmas propriedades de TE.

Trataremos dos H-LSPs no presente item, enquanto os S-LSPs serão abordados no item subsequente.

Os LSPs hierarquizados podem ser utilizados para definir links de dados que atravessam a rede entre LSRs que não são necessariamente fisicamente adjacentes, mas que são adjacentes em uma camada de rede particular. Esses links de dados podem multiplexar LSPs e se constituir em parte da topologia da rede, isto é, proverem flexibilidade adicional à rede.

Os H-LSPs oferecem uma vantagem significativa em termos de escalabilidade em redes que utilizam TE, por permitirem que múltiplos LSPs sejam multiplexados e tunelados em um único H-LSP. Disso resultam uma considerável simplificação e redução de carga nos planos de controle e de dados nos LSRs de trânsito da rede.

A RFC 4206 estabeleceu que um H-LSP podem transportar outros LSPs somente em conformidade com os respectivos tipos de comutação, que se refletem nas formas pelas quais os labels são utilizados.

Assim, em redes PSC, um H-LSP pode transportar outros LSPs PSC utilizando a pilha de labels (label stack) do plano de dados da rede.

Em redes ópticas de transporte (redes não PSC), por outro lado, onde os labels são implícitos no plano de dados, as pilhas de protocolo não podem ser usadas, e os H-LSPs baseiam-se na habilidade de multiplexação da rede servidora. Assim, por exemplo, um LSC LSP pode transportar TDM LSPs, mas não pode transportar outros LSC LSPs.

A Figura 7 ilustra a utilização de um H-LSP unidirecional (<LSR W, LSR X, LSR Y, LSR Z>), aplicável tanto em redes PSC quanto em redes ópticas de transporte, que transporta três LSPs nele multiplexados. O H-LSP é parte integrante do processo de controle de todos os três LSPs multiplexados quando considerados fim a fim.

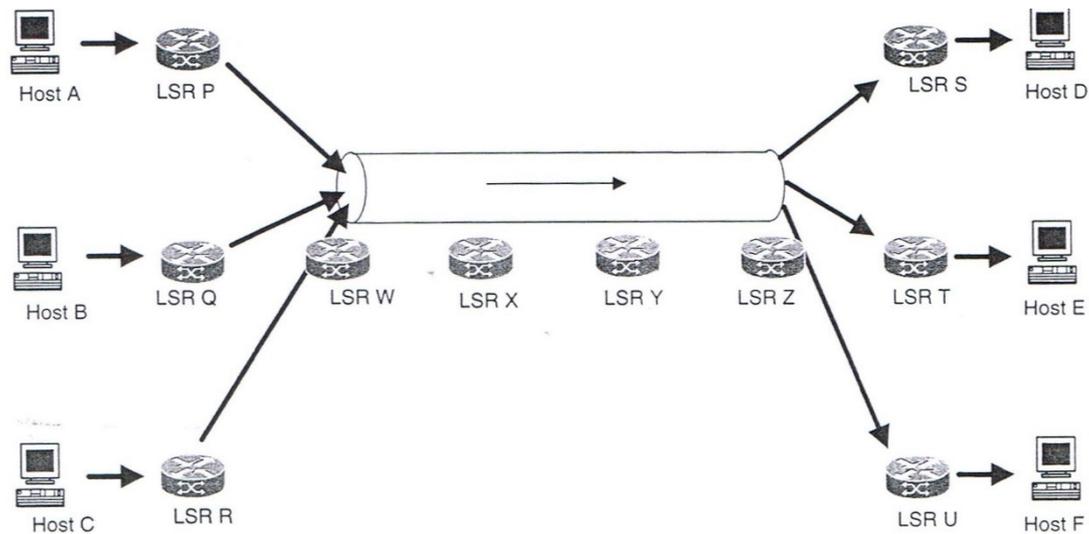


Figura 7 - Exemplo de H-LSP transportando múltiplos LSPs (livro GMPLS - Architecture and Applications, editora Morgan Kaufmann).

9.4.1 - H-LSPs em Redes PSC

O IP/MPLS e o MPLS-TP, que são redes PSC, possibilitam a criação de H-LSPs por meio de pilhas de labels, de forma tal que os LSPs transportados pelos H-LSPs preservem suas individualidades nas extremidades dos H-LSPs.

Essa possibilidade aumenta a escalabilidade dos LSRs no interior da rede e aprimora significativamente o gerenciamento dos LSPs através da rede.

Para a criação dinâmica de um túnel (H-LSP) em um sentido entre dois LSRs de um LSP fim a fim, é necessário aplicar-se o procedimento normal de sinalização a partir do *head end LSR* do túnel, quando se distribui os labels do túnel. Esses labels localizam-se na base da pilha de labels, ou seja, na posição mais próxima à camada física. Em outras palavras, os labels de túnel envelopam os labels do LSP (labels do LSP fim a fim).

No GMPLS, é possível a constituição de túneis bidirecionais sobre LSPs fim a fim bidirecionais. A sinalização no GMPLS será apresentada em um futuro tutorial.

Para exemplificar, vamos considerar a Figura 8.

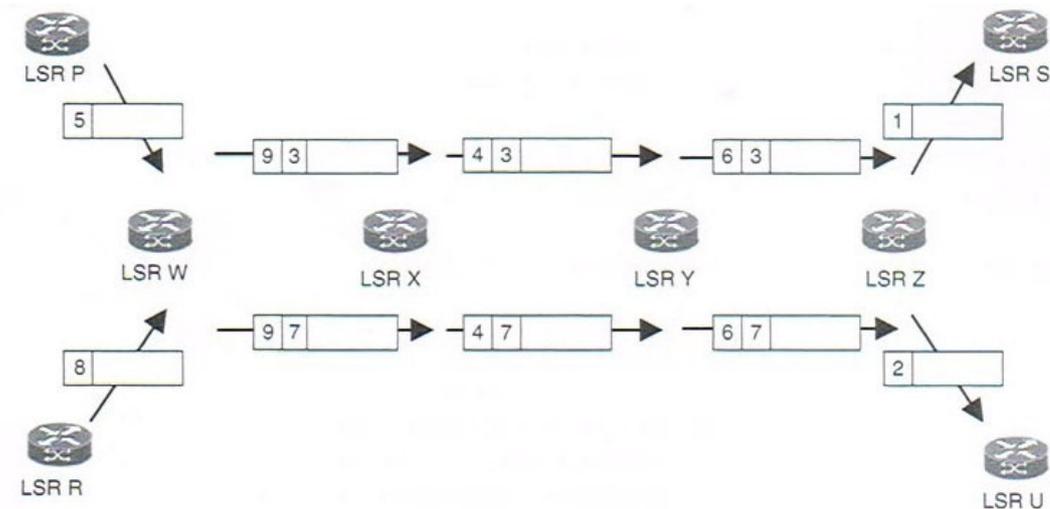


Figura 8 - H-LSP em rede PSC (livro MPLS: Next Steps, Editora Morgan Kaufmann).

Nessa figura, foi criado um túnel H-LSP unidirecional do LSR W para o LSR Z, passando pelos LSR X e LSR Y. Esse túnel transporta, por multiplexação estatística, os LSPs fim a fim <LSR P, LSR S> e <LSR R, LSR U>.

Nos retângulos onde se encontram os labels no interior do túnel, os labels à esquerda são os labels do túnel, enquanto os labels à direita são os labels do LSP.

Como se observa, os valores envelopados dos labels do LSP permanecem imutáveis ao longo do túnel, não tendo qualquer função, uma vez que a comutação se baseia nos labels do túnel. Os labels do LSP reassumem suas funções a partir do final do túnel.

Suponhamos, por exemplo, que o LSR P tenha enviado um quadro com o label do LSP igual a 5 para o LSR W, com destino final no LSR S. O LSR W altera esse valor para 3, insere o label do túnel igual a 9, e envia o quadro para o LSR X.

O LSR X, já comutando com base no label do túnel, altera o valor 9 para 4, ignora e mantém o valor 3 (label do LSP), e envia o quadro para o LSR Y.

O LSR Y repete as ações do LSR X, enviando o quadro para o LSR Z, tendo alterado o valor 4 para 6. No caso do IP/MPLS (mas não no caso do MPLS-TP, que é controlado pelo GMPLS), o label do túnel com valor 6 poderia ser descartado, quando se aplicaria a técnica referida como PHP (*penultimate hop popping*) no nível de túnel.

O LSR Z, sendo a terminação do túnel, descarta o label do túnel (valor 6), passa a considerar o label de LSP, alterando o valor 3 para 1, e envia o quadro para o LSR S, encerrando assim a transmissão.

Uma observação importante é que, tanto no LSP <LSR P, LSR S> quanto no LSP <LSR R, LSR U>, os valores dos labels de túnel são os mesmos ((9, 4 e 6). Se considerarmos a possível existência de um número considerável de LSPs fim a fim compartilhando um túnel, e também o congelamento dos valores de labels de LSP no interior do túnel, resultará uma também considerável redução de escala no número necessário de valores de labels e a simplificação dos processos de roteamento e sinalização.

9.4.2 - H-LSPs em Redes Ópticas de Transporte

Conforme menção anterior, como as redes ópticas de transporte controladas pelo GMPLS não utilizam labels no plano de dados, não é possível o uso de tunelamento, e

em consequência o uso de H-LSPs, com base em pilhas de labels como em redes de comutação de pacotes (redes PSC).

A solução para essa questão ocorre naturalmente, dada a característica multiplexadora dos sistemas ópticos de transporte. Como se sabe, fibras ópticas são multiplexadas por WDM, que são multiplexados por TDM (SDH e/ou OTN), que por sua vez são multiplexados por redes de pacotes.

Para exemplificar, vamos considerar a Figura 9.

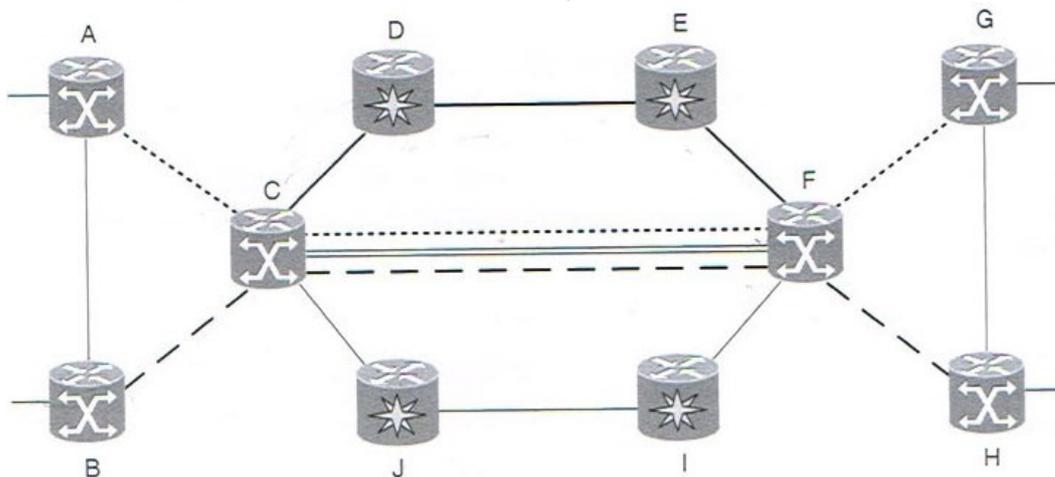


Figura 9 - H- LSPs em redes ópticas de transporte (livro MPLS: Next Steps, Editora Morgan Kaufmann).

A parte central dessa figura é constituída por WDM switches (WDM OXCs) controlados por GMPLS. Nos extremos localizam-se redes TDM também controladas por GMPLS.

Nas fronteiras entre essas redes encontram-se os LSR C e LSR F, que operam no modo misto TDM/WDM. Verifica-se a existência de um H-LSP na rede WDM entre esses LSRs.

Nesse caso, os dois (poderiam ser mais) LSPs TDM, <A, G> e <B, H> são transportados pelo H-LSP <C, F>, que representa um único canal WDM.

A alternativa seria a alocação de um canal WDM para cada um dos LSPs TDM, o que obviamente representaria uma subutilização da rede WDM.

9.5 - LSP Stitching com GMPLS TE

Em certos cenários, pode tornar-se necessário combinar diversos LSPs GMPLS, de forma tal que seja estabelecido um único LSP fim a fim (referido como um LSP e2e, de *end-to-end LSP*) constituído por essas combinações. Essa construção é denominada "*LSP stitching*" (costura de LSPs), e cada um dos LSPs combinados é referido como um segmento de LSP (S-LSP).

A RFC 5150 define extensões do protocolo GMPLS RSVP-TE para possibilitar o estabelecimento de LSPs e2e a partir dos S-LSPs que os constituem, além de definir o modo pelo qual os LSPs são gerenciados pelos protocolos de roteamento e sinalização do GMPLS. Os LSPs e2e assim criados operam tanto no plano de controle quanto no plano de dados.

Nos limitaremos no presente documento à apresentação dos conceitos básicos de LSP stitching, não abordando extensões de protocolos consequentemente.

Para o melhor entendimento do que representa *LSP stitching*, vamos comparar S-LSPs com H-LSPs.

Em primeiro lugar, os H-LSPs são constituídos por componentes de diferentes camadas, sendo os LSPs de maior ordem aninhados (*nested*) em LSP de menor ordem. Como vimos anteriormente neste texto, o aninhamento pode ocorrer por *label stacks* (redes modo pacote) ou por multiplexação modo circuito (redes ópticas de transporte).

Um S-LSP criado em uma camada, ao contrário, provê um link de dados para outros LSPs nessa mesma camada. Não se utiliza *label stacking* nem tampouco multiplexação.

Enquanto existe uma *forwarding adjacency* (FA) entre pontos de terminação de um link H-LSP TE, não existe FA entre pontos de terminação de um link S-LSP TE.

De forma similar ao que se passa em H-LSPs, diferentes S-LSPs podem ser agrupados (*bundled*) para constituir um único link TE. Dessa forma, os ganhos de escalabilidade e de reotimização proporcionados por esses mecanismos tornam-se mais expressivos.

Por outro lado, tanto H-LSPs quanto S-LSPs podem ser links TE numerados ou não numerados.

10 - LINK MANAGEMENT PROTOCOL (LMP).

Vimos no item 4 anterior deste texto, que em redes modo pacote controladas pelo GMPLS, como redes MPLS por exemplo, o plano de controle opera *in-band* com o plano de dados, utilizando-se usualmente um único canal para os tráfegos desses dois planos.

Na aplicação do GMPLS para redes ópticas de transporte, no entanto, o plano de controle opera *out-of-band* com relação ao plano de dados, com redes independentes de diferentes formas.

Para qualquer uma das duas hipóteses, foi definido, na RFC 4204 (*Link Management Protocol (LMP)*), o protocolo LMP.

O LMP é um protocolo de aplicação ponto a ponto entre dois LSRs GMPLS que são adjacentes no plano de dados, mas que podem ser não adjacentes no plano de controle (podem existir múltiplos roteadores IP entre eles, por exemplo). Os dois LSRs GMPLS entre os quais se aplica o LMP são referidos como vizinhos LMP ou simplesmente nós vizinhos.

O LMP tem como suporte o protocolo UDP, utilizando a porta 701. Pelo fato de que se utiliza o UDP, o próprio LMP é responsável pela recuperação de erros no plano de controle.

O LMP requer que os endereços dos canais de controle sejam configurados nos LSRs em seus extremos. Para o funcionamento do LMP, é necessário que exista pelo menos um canal de controle bidirecional ativo entre os dois LSRs. Cada sentido de um canal de controle é identificado por um *CC_Id* (*control channel identifier*), cujos valores devem ser únicos em qualquer um dos LSRs.

Os objetos *MESSAGE_ID* e *MESSAGE_ID_ACK* são incluídos nas mensagens LMP para permitir a transmissão confiável dessas mensagens.

De acordo com a RFC 4204, um link de dados pode ser considerado, por cada um dos LSRs onde termina, como uma porta ou como um link componente. Links componentes são capacitados para multiplexação, enquanto portas não o são.

A RFC 4204 define dois procedimentos fundamentais para o LMP:

- Gerenciamento do canal de controle;
- Correlação de propriedades de link (*link property correlation*).

Foram também definidos dois procedimentos adicionais para o LMP:

- Verificação de conectividade de link;
- Gerenciamento de falhas.

10.1 - Gerenciamento de Canal de Controle

Para que o plano de controle no GMPLS entre em operação, é necessário que pelo menos um canal de controle esteja ativado. Como é do conhecimento dos leitores, os canais de controle no GMPLS são utilizados para a transmissão das mensagens de roteamento, de sinalização e do protocolo LMP.

O gerenciamento de um canal de controle consiste em duas etapas, que são a ativação do canal e a posterior manutenção da conectividade do canal. As mensagens utilizadas nessas duas etapas devem ser transmitidas especificamente no canal de controle a que se referem. As demais mensagens do LMP podem ser transmitidas em qualquer canal de controle que se encontre ativado.

10.1.1 - Ativação de Canais de Controle

Para a ativação de um canal de controle no GMPLS, são utilizados três tipos de mensagem:

- Mensagens *Config* (*configuration*);
- Mensagens *ConfigAck* (*configuration acknowledgment*)
- Mensagens *ConfigNack*.

Previamente à ativação de um canal de controle, é necessário que esse canal esteja estabelecido. Para sinalização *in-band*, um canal de controle pode ser configurado explicitamente no link de dados.

Como foi visto anteriormente neste texto, existem diferentes formas de estabelecimento de canais de controle em redes ópticas de transporte.

A ativação de um canal de controle inicia-se pela troca de parâmetros de negociação entre o par de LSRs que terminam esse canal, utilizando-se para isso as mensagens *Config*, *ConfigAck* e *ConfigNack*. Os conteúdos dessas mensagens consistem em objetos LMP, que são negociáveis ou não negociáveis

A Figura 10 ilustra a ativação de canais de controle, que será vista neste subitem, assim como o processo de manutenção da conectividade do canal, o que será abordado no próximo subitem.

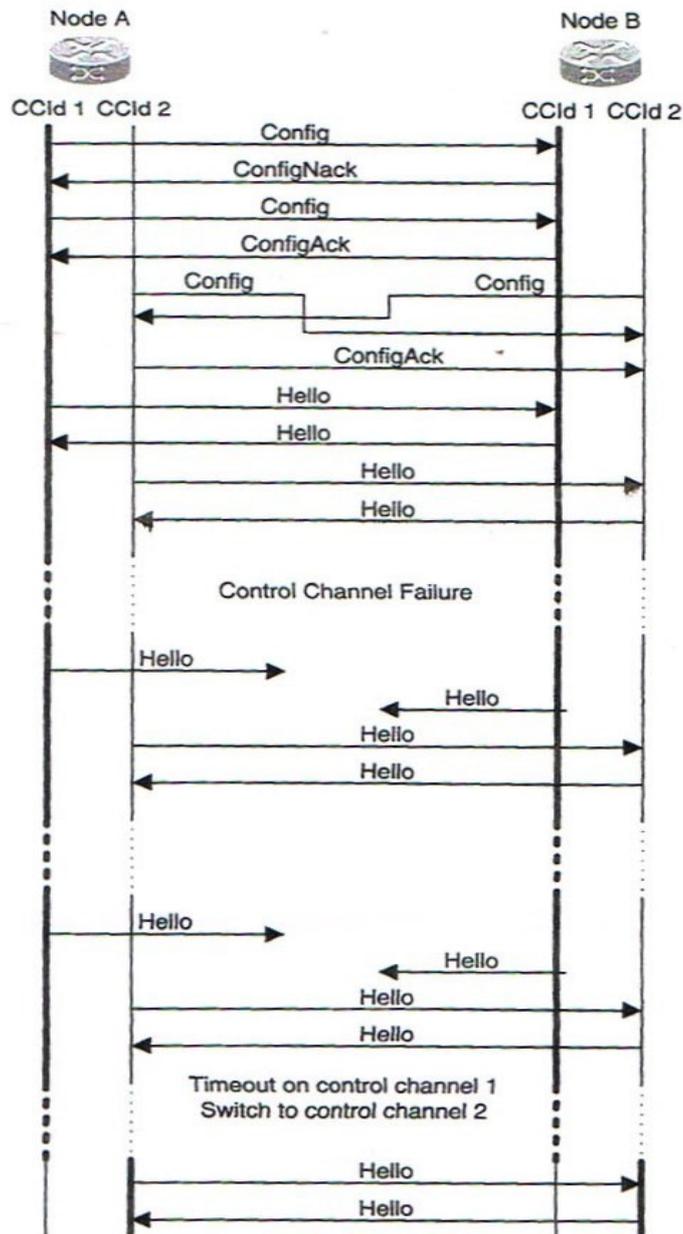


Figura 10 - Etapas do gerenciamento de canais de controle (livro GMPLS - Architecture and Applications, editora Morgan Kaufmann).

Vamos considerar, neste subitem, apenas a parte superior da figura, relativa à ativação de dois canais de controle, um identificado pelo CC_Id 1 e o outro pelo CC_Id 2.

O LSR A enviou inicialmente uma mensagem *Config* para o LSR B, propondo a ativação do primeiro canal (CC_Id 1), mas esse LSR rejeitou a proposta, respondendo com uma mensagem *ConfigNack*.

O LSR A repetiu a proposta, que foi agora aceita, tendo o LSR B respondido com uma mensagem *ConfigAck*.

Foi então iniciado um novo processo para a ativação de um outro canal de controle (CC_Id 2), tendo ocorrido uma coincidência, tendo o LSR A e o LSR B enviado mensagens *Config* ao mesmo tempo.

Por convenção, sendo o valor do *node ID* do LSR **B** superior ao do LSR **A**, prevaleceu a proposta do LSR **B**. Assim, apenas o LSR **A** respondeu com uma mensagem *ConfigAck*.

Dessa forma, ficam ativados os dois canais de controle pretendidos. O canal de controle solicitado pelo LSR **A** (CC_Id 1) foi configurado como canal primário, que se encontra destacado pelas linhas verticais mais grossas. O outro canal de controle (CC_Id 2) foi configurado como canal backup, destacado pelas linhas verticais mais finas.

10.1.2 - Manutenção da Conectividade de Canais de Controle

Assim que um canal de controle é ativado entre dois LSRs adjacentes no plano de dados, o protocolo *LMP Hello* pode ser utilizado para manter a conectividade do canal e para detectar falhas no canal. O protocolo *LMP Hello* consiste em um mecanismo *keep-alive* que deve reagir rapidamente a falhas no canal de controle.

Cada canal de controle é mantido em operação pela troca de mensagens *Hello* entre os LSRs pares, em um intervalo de tempo regular. Esse intervalo é denominado *Hello Interval*, sendo aplicado em ambos os sentidos do canal de controle.

Caso pelo menos um dos LSRs pares de um canal de controle fique sem receber mensagens *Hello* por um outro intervalo de tempo referido como *Hello Dead Interval*, esse LSR declara a interrupção do canal e encerra a transmissão de mensagens *Hello*. O *Hello Dead Interval* é tipicamente configurado com um valor no mínimo superior a três vezes o valor do *Hello Interval*.

Caso a interrupção tenha ocorrido apenas no canal de controle primário, os LSRs comutam a transmissão para o canal de controle backup, designando-o como canal primário.

Observem que a situação descrita nos parágrafos anteriores ocorreu no exemplo da Figura H anterior, como ilustra a parte inferior da figura.

Nessa situação, é de se supor que os dois LSRs serão comandados para aplicar um novo processo de configuração, para restaurar a proteção operacional por meio de um novo canal de controle backup.

Para fins de controle, as mensagens *Hello* são numeradas sequencialmente (parâmetro *TxSeqNum*), e contêm também o número sequencial da última mensagem *Hello* recebida do LSR adjacente por esse canal de controle (parâmetro *RxSeqNum*).

10.2 - Verificação de Conectividade de Link

A RFC 4204 descreve um procedimento opcional que pode ser utilizado para verificar a conectividade física de links de dados e para dinamicamente determinar os estados dos LSRs que os delimitam. Esse procedimento deveria ser aplicado quando se estabelece um link TE, ou periodicamente para todos os links de dados não alocados de um link TE.

O processo de verificação de conectividade de links de dados se efetiva mediante o intercâmbio de mensagens *BeginVerify*, *BeginVerifyAck* e *BeginVerifyNack*. O LSR que deseja verificar um link de dados envia uma mensagem *BeginVerify*, e o outro LSR responde com uma mensagem *BeginVerifyAck* ou uma mensagem *BeginVerifyNack*, dependendo de sua possibilidade ou de seu desejo de atender à solicitação.

Uma vez constatada a conectividade entre dois LSRs, essa conectividade pode passar a ser testada para cada link de dados especificado no link TE, por meio do intercâmbio de mensagens de teste (*Test messages*) através do próprio canal de dados que está sendo testado., no que se denomina processo de verificação de links de dados.

Observamos que as mensagens de teste são as únicas mensagens do LMP que podem transitar pela rede do plano de dados. As mensagens Hello continuam a ser intercambiadas por cada canal de controle durante o processo de verificação de links de dados.

10.3 - Correlação de Propriedades de Link

Como parte do LMP, foi definido um na RFC 4204 um mecanismo para o estabelecimento da correlação das propriedades de um link TE e dos links de dados que constituem esse link TE, entre os LSRs que os delimitam.

Essa correlação é estabelecida pelo intercâmbio de mensagens *LinkSummary*, *LinkSummaryAck* e *LinkSummaryNack* entre esses LSRs. Uma mensagem *LinkSummary* pode envolver múltiplos canais de dados que pertençam a um único link TE.

Como no caso da configuração de canais de controle, as mensagens de correlação de links contêm objetos LMP negociáveis ou não negociáveis. Objetos negociáveis podem ser utilizados para permitir que ambos os LSRs acordem quanto ao uso de certos parâmetros enquanto os objetos não negociáveis apenas comunicam valores de parâmetros não sujeitos a negociações.

Identificadores de links TE (*Link_Id*) e de links de dados (*Interface_Id*) devem ser de um mesmo tipo, o que deve ser conferido no processo de correlação. Esse processo é também utilizado com outros propósitos, tais como a agregação de links de dados em um link TE, determinação de outras inconsistências e comunicação de informações.

10.4 - Gerenciamento de Falhas

A RFC 4204 define um procedimento LMP opcional, que é utilizado para gerenciar falhas pela rápida notificação do estado de um ou mais canais de dados de um link TE. Esse procedimento pode ser utilizado para isolar rapidamente falhas de links de dados e de links TE, sendo capacitado para operar tanto com LSPs unidirecionais quanto com LSPs bidirecionais.

A detecção de uma falha deve ser tratada na camada mais próxima à falha. Para redes ópticas, por exemplo, a falha deve ser tratada na camada óptica física.

O processo é iniciado pelo LSR downstream que detecta uma falha em um canal de dados. Esse LSR envia então uma mensagem *ChannelStatus* para o LSR *upstream* utilizando a rede de controle, que responde imediatamente com uma mensagem *ChannelStatusACK*, acusando o recebimento. O *upstream* LSR pode então examinar destrutivamente os sinais de dados recebidos no sentido upstream sem qualquer consequência.

O LSR *upstream* verifica então se o sinal recebido de seu LSR *upstream* está corrompido ou não.

Se não está corrompido, a falha está localizada em um canal de dados, em múltiplos canais de dados ou em todo o link TE, no sentido *downstream*, o que é notificado ao LSR *downstream* por meio de uma mensagem *ChannelStatus*.

Se o sinal recebido pelo LSR *upstream* de seu LSR *upstream* está corrompido, a falha não está localizada, sendo necessário continuar a pesquisa. Para isso, o LSR *upstream* repete os procedimentos realizados pelo LSR *downstream*, agora com relação a seu LSR *upstream*.

11 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vimos neste tutorial que o GMPLS é um conjunto de protocolos de controle, definido com o propósito de controlar diferentes tipos de rede comutadas, particularmente redes comutadas orientadas a conexão modo circuito ou modo pacote. O termo "generalized" foi atribuído ao GMPLS em decorrência dessa diversidade de redes por ele controladas. u

Outra característica importante que caracteriza o GMPLS é a possibilidade de trafegar as suas mensagens de controle por canais de controle independentes dos canais de dados. Essa característica é obrigatoriamente utilizada quando o GMPLS controla a operação de redes ópticas de transporte, onde os canais de dados modo circuito são inadequados para o transporte dos datagramas IP utilizados nas mensagens de controle.

Vale destacar também a capacidade do GMPLS de possibilitar a constituição de circuitos virtuais bidirecionais, ou seja, de LSPs bidirecionais, em uma única instância de sinalização. Os LSPs bidirecionais assim constituídos são necessariamente corroteados (isto é, os dois sentidos de transmissão do LSP encontram-se obrigatoriamente na mesma rota), podendo ocorrer ou não igualdade dos valores de banda passante reservadas para os dois sentidos.

O GMPLS teve uma grande aceitação, tanto para MPLS-TP quanto para redes ópticas de transporte. A possibilidade de provisionamento dinâmico de conexões proporcionada pelo GMPLS revolucionou a utilização das redes ópticas de transporte, tanto redes com cross-conexão EOE (*electrical-optical-electrical*) como as redes SDH e OTN, quanto redes AON (*all-optical networks*) como as redes WDM e redes de fibras ópticas que operam com cross-conexão OOO (*optical-optical-optical*).

12 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

12.1 - Livros

- ENNE, A. J. F. – TCP/IP sobre MPLS. Rio de Janeiro: Ciência Moderna 2009.
- ENNE, A. J. F. – Frame Relay: Redes, Protocolos e Serviços. Rio de Janeiro: Axel Books e Embratel, 1998.
- FARREL, A., BRYNSKIN, I. – GMPLS: Architecture and Applications. San Francisco, USA: Morgan and Kaufmann, 2006.
- FARREL, A., DAVIE, B. S. – MPLS: Next Steps. San Francisco, USA: Morgan and Kaufmann, 2008.

- DAVIE, B. S., RECKHTER, Y. – MPLS: Technology and Applications. San Francisco, USA: Morgan and Kaufmann, 2000.
- CAVANAGH, J. P. – Frame Relay Applications. San Francisco, USA: Morgan and Kaufmann, 1998.
- SACKET, G. C., METZ, C. Y. – ATM and Multiprotocol Networking, New York, USA: McGraw Hill, 1997.

12.2 - Padrões do IETF (RFCs)

- RFC 3471 (*Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Functional Description*).
- RFC 3473 (*Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions*)).
- RFC 3477 (*Signaling Unnumbered Links in Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE)*)).
- RFC 3945 (*Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS) Architecture*).
- RFC 4139 (*Requirements for GMPLS Signaling Usage and Extensions of ASON*).
- RFC 4201 (*Link Bundling in MPLS Traffic Engineering (TE)*).
- RFC 4204 (*Link Management Protocol (LMP)*).
- RFC 4206 (*Label Switched Paths (LSPs) Hierarchy with Generalized Label Switching (GMPLS) Traffic Engineering*).
- RFC 4974 (*Generalized MPLS (GMPLS) RSVP-TE Signaling Extensions in Support of Calls*).
- RFC 5150 (*Label Switched Path Stitching with Generalized Multiprotocol Label Switching Traffic Engineering (GMPLS-TE)*).
- RFC 6107 (*Procedures for Dinamically Signaled Hierarchical Label Switched Paths*).

13 - TESTE SEU ENTENDIMENTO

13.1 - Qual a frase correta?

- a) O GMPLS utiliza labels no plano de controle e no de dados de redes ópticas de transporte.
- b) O GMPLS não utiliza labels no plano de dados de redes PSC.
- c) O GMPLS não utiliza labels no plano de dados de redes ópticas de transporte.
- d) Nenhuma delas.

13.2- Qual a frase correta?

- a) No GMPLS a rede do plano de controle e a rede do plano de dados são sempre coincidentes.
- b) No GMPLS a rede do plano de controle e a rede do plano de dados são sempre separadas.
- c) No GMPLS as redes do plano de controle e do plano de dados são sempre separadas em redes PSC.
- d) No GMPLS as redes do plano de controle e do plano de dados são sempre separadas em redes ópticas de transporte.

13.3 - Qual a frase correta?

- a) O LMP utiliza canais de controle para gerenciar os canais de controle e os canais de dados.

- b) O LMP utiliza canais de controle para gerenciar apenas os canais de dados.
- c) Todas as mensagens do LMP sem exceção trafegam pelos canais de controle.
- d) O LMP gerencia apenas canais de dados unidirecionais.

13.4 - Qual a frase correta?

- a) Conexões (LSPs) e chamadas (calls) são ambas fim a fim, envolvendo apenas os LSRs terminais de um LSP.
- b) Uma conexão pode suportar múltiplas chamadas.
- c) Uma chamada pode suportar múltiplas conexões.
- d) Uma chamada envolve LSRs no interior da rede.

RESPOSTAS NA PÁGINA SEGUINTE

-

RESPOSTAS:

13.1: c)

13.2: d)

13.3: a)

13.4: c)