

# TUTORIAL Nº 5

## Cálculo de Caminhos (Rotas) no GMPLS

### 1 – OBJETIVOS

O presente tutorial tem como um objetivo apresentar a arquitetura definida na RFC 4655 (*A Path Computation Element (PCE) – Based Architecture*) para um modelo baseado em PCE destinado ao cálculo de caminhos (rotas) no MPLS-TE e em redes controlados pelo GMPLS.

Um outro objetivo deste tutorial é abordar os principais aspectos do protocolo PCEP, especificado na RFC 5440 (*Path Computation Element (PCE) Communication Protocol*) e destinado a definir a comunicação entre PCCs (*Path Computation Clients*) e PCEs e entre PCEs.

### 2 - INTRODUÇÃO

Como vimos em nosso tutorial Nº 2 para o plano de controle do MPLS-TE com relação à constituição de LSPs, o que é extensível para o GMPLS, após a montagem das TEDs nos LSRs passíveis de se tornarem *head end LSRs* de LSPs, ocorrem mais três etapas significativas.

Verifica-se primeiramente a requisição de serviço por parte do usuário, da qual constam as condicionantes (*constraints*) a serem aplicadas para o LSP a ser constituído. É possível que ocorra nessa etapa também a explicitação de critérios políticos aplicáveis especificamente ao LSP em constituição ou a uma determinada sequência de LSPs.

Ressaltamos que o termo “usuário” deve ser considerado de modo flexível, pois pode significar o próprio provedor quando é ele o solicitador do LSP.

Processa-se então o cálculo de caminhos, que se resume na aplicação de um algoritmo de batimento dos parâmetros requisitados pelo usuário, ou impostos politicamente, contra o conjunto de parâmetros que definem as características da totalidade de links da rede contido na TED considerada. Desse batimento resulta o caminho mais indicado para o atendimento ao LSP solicitado.

Ocorre então a última etapa, que consiste na aplicação do processo de sinalização para a constituição do LSP. O caminho escolhido passa a constar do objeto de sinalização ERO (*explicit route object*), enviado ao longo da rede a partir do *head end LSR*, em uma mensagem *RSVP Path*. Após o correto recebimento da mensagem *RSVP Resv* de resposta retornada pelo *tail end LSR*, o *head end LSR* considera o LSP constituído.

O roteamento no GMPLS foi contemplado em nosso tutorial Nº 4, sendo o presente tutorial destinado à apresentação da etapa correspondente ao cálculo de caminhos. O nosso próximo tutorial, específico para a sinalização no GMPLS, encerrará a abordagem dos aspectos básicos do GMPLS.

Ressaltamos o embasamento proporcionado pelos nossos tutoriais Nº 1, Nº 2 e Nº 3 para o entendimento do GMPLS como um todo.

Cálculo de caminhos com base em condicionantes é um componente fundamental para sistemas que utilizam engenharia de tráfego, como o MPLS-TE e o GMPLS. Em redes amplas, multi-domínios, multi-regiões ou multi-camadas, o cálculo de caminhos torna-se mais complexo, podendo requerer componentes computacionais especiais e cooperação entre diferentes domínios de rede.

Existem diferentes tipos de mecanismos para cálculo de caminhos. O IETF expressou a sua preferência por um modelo de cálculo de caminhos baseado em PCEs (*Path Computation Elements*).

Um PCE é uma entidade que é capaz de calcular um caminho ou rota de rede com base em uma árvore (grafo) de rede, sendo também capaz de aplicar condicionantes computacionais durante o cálculo.

A entidade PCE é uma aplicação que pode se localizar em um nó ou outro componente da rede, em um servidor fora da rede, etc.

Cálculo de caminhos pode ocorrer no contexto intra-domínio, inter-domínios e inter-camadas.

Um domínio é qualquer coleção de elementos de rede dentro de uma esfera comum de gerenciamento de endereços ou de responsabilidade de cálculo de caminhos. Áreas IGP, Sistemas Autônomos (ASes) e conjuntos de múltiplos ASes em uma rede de provedor de serviços, constituem exemplos de domínios de rede.

O IETF emitiu a RFC 4655 com o propósito de definir uma arquitetura baseada em PCE para o cálculo de caminhos no MPLS-TE e no GMPLS.

As solicitações de serviço são enviadas para cálculo de caminhos no PCE a partir de uma outra entidade, representativa do usuário, referida como PCC (*Path Computation Client*), que, como o PCE, pode ser implantada em diferentes localizações.

Para especificar a comunicação nos dois sentidos entre PCEs e PCCs, assim como entre PCEs, foi emitida a RFC 5440, que define o protocolo PCEP (*PCE Communication Protocol*).

Apresentamos a seguir, neste tutorial, a RFC 4655 e a RFC 5440, além de abordarmos, em linhas gerais, o algoritmo CSPF (*Constrained Shortest Path First*) por sua intensa utilização.

### **3 – ARQUITETURA BASEADA EM PCE (RFC 4655)**

Vamos considerar, neste ítem, os seguintes aspectos da RFC 4655:

- Classificações e definições;
- Configurações de uso de PCEs.

#### **3.1 – Classificações e Definições**

A primeira classificação a se considerar é a que considera cálculo de caminhos com um único PCE em um domínio e cálculo de rotas com múltiplos PCEs em um domínio,

sendo esses PCEs utilizados para o cálculo de um dado caminho no domínio. Caso existam múltiplos PCEs em um domínio, estando, contudo, cada um deles envolvido em seu próprio cálculo de caminhos, caracteriza-se uma situação coletiva de PCEs únicos nesse domínio.

Outra classificação divide os modelos de cálculo de caminhos em modelo de cálculo centralizado e modelo de cálculo distribuído. No modelo de cálculo centralizado, todos os caminhos no domínio são calculados por um único, centralizado PCE. No modelo de cálculo distribuído, todos os caminhos no domínio são calculados de forma compartilhada entre múltiplos PCEs.

Caminhos que abrangem múltiplos domínios podem ser calculados pelo modelo de cálculo centralizado mediante a definição de um domínio que engloba todos os demais domínios, ou pelo modelo de cálculo distribuído definindo um ou mais PCEs como responsáveis por cada domínio.

Um PCE pode ou não ser localizado no *head end LSR* do caminho. Uma solução intra-domínio convencional é a localização do PCE no head end LSR do TE LSP. Diferentes exemplos de alternativas para a localização de PCEs serão vistas adiante neste tutorial.

Um caminho calculado pode ser um caminho explícito (ou seja, um caminho composto por uma sucessão de *strict hops*) ou um caminho *strict/loose* (ou seja, uma mistura de *strict hops* e de *loose hops*. Um *loose hop* é um passo da rede que não é controlado pelo plano de controle do MPLS-TE ou pelo GMPLS.

O modelo de cálculo de rotas com base em PCEs não requer exclusividade de uso em um contexto inter-domínios ou mesmo um mesmo domínio de rede. Podem ser utilizados diferentes modelos de cálculo para diferentes LSPs de um mesmo domínio.

Um PCE pode ser utilizado para o cálculo coordenado de caminhos de serviço e dos respectivos caminhos backup no contexto de proteção FRR (*fast reroute*) de TE LSPs. A coordenação permite a eliminação, ou pelo menos a redução, da possibilidade de uso de links contidos em SRLGs comuns.

Um PCE pode utilizar uma política local que impacta a escolha do caminho para o atendimento de uma requisição de serviço. Essa política pode inclusive atuar na informação provida pelo PCC solicitante.

O resultado da aplicação de uma política pode ser, por exemplo, a rejeição da solicitação de serviço, ou o provisionamento de um caminho que não satisfaz a todas as condicionantes da solicitação de serviço.

Um PCC pode aplicar política local que atua sobre a seleção do PCE a calcular um dado caminho e sobre as condicionantes a serem utilizadas.

No contexto de PCEs, a política adotada pode ser sensível ao tipo de caminho a ser calculado. Assim, por exemplo, conjuntos diferentes de políticas podem ser aplicados para LSPs em uma camada e para LSPs multi-camadas.

### **3.2 – Configurações de Uso de PCEs**

Com base na RFC 4655, vamos apresentar alguns exemplos de configuração de uso de PCEs, nos casos em que não se considera e no caso em que se considera a aplicação de políticas externas.

### 3.2.1 – Configurações sem Políticas Externas

Serão apresentados exemplos das seguintes configurações:

- PCE único em composição com o *head end LSR*
- PCE único externo ao *head end LSR*;
- PCEs múltiplos externos ao *head end LSR*;
- PCEs múltiplos externos ao *head end LSR* com comunicação inter-PCEs;
- PCE único operando com base em gerenciamento.

#### 3.2.1.1 – PCE Único em Composição com o Head End LSR

A configuração em que se utiliza um PCE de forma composta com o head end LSR, mostrada na Figura 1, é certamente a mais utilizada, particularmente no MPLS-TE.

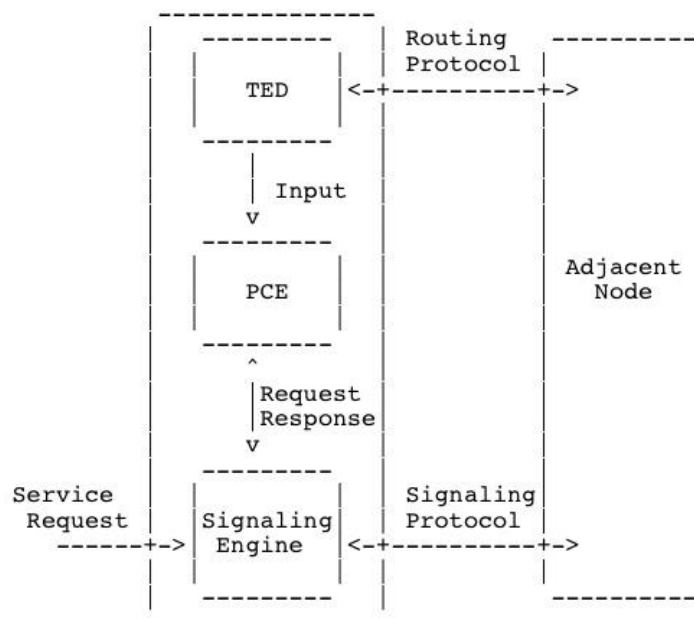


Figura 1 – PCE composto com o head end LSR.

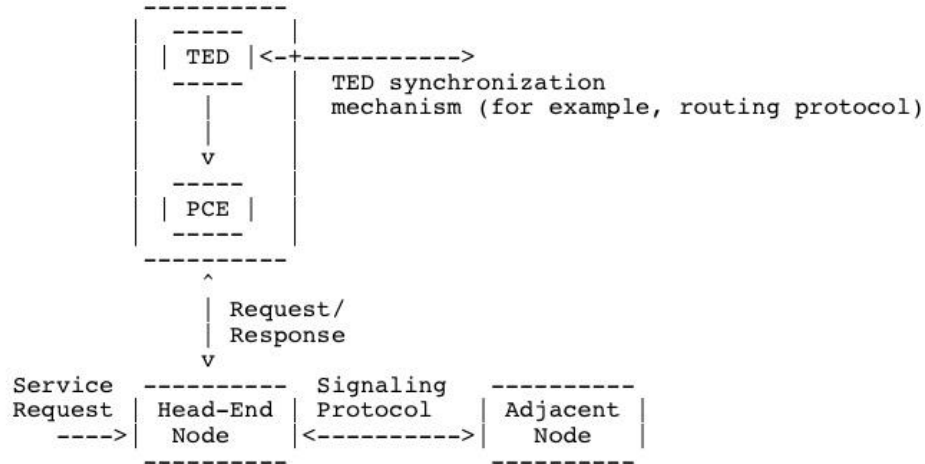
Nessa configuração, as requisições de serviço são recebidas pelo dispositivo de sinalização (signaling engine), onde se encontra também a função PCC. Do PCC, as requisições de serviço são encaminhadas, por meio do protocolo PCEP, para o PCE.

O PCE, alimentado pelas informações contidas na TED (informações essas providas pelo roteamento), faz o batimento de cada requisição de serviço contra as informações sobre os links da rede fornecidas pela TED, do que resulta o objeto ERO.

O PCE envia então o ERO para o dispositivo de sinalização, de novo via protocolo PCEP, onde é iniciada a sinalização para constituição do LSP. Algumas condicionantes estabelecidas pelo usuário na solicitação de serviço para o LSP, ou delas resultantes, são enviadas por meio de objetos da sinalização.

### 3.2.1.2 – PCE Único Externo ao Head End LSR

A Figura 2 exibe uma configuração que consiste em um PCE único localizado externamente ao *head end LSR* (onde se localizam o dispositivo de sinalização e o PCC).



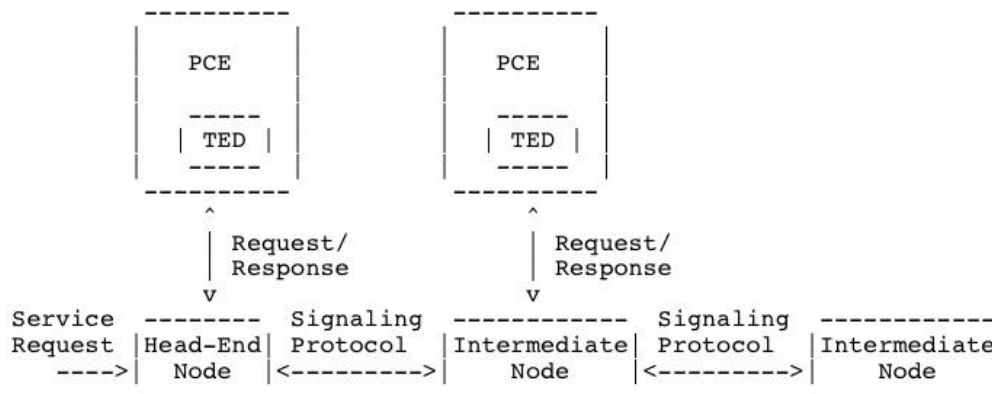
**Figura 2 – PCE Único Externo ao Head End LSR.**

Após o recebimento de uma solicitação de serviço, o *head end LSR*, em sua função PCC, envia uma mensagem PCEP solicitando o cálculo do caminho ao PCE externo. O PCE utiliza as informações da TED sujeito á política local, calcula o ERO e o retorna para o PCC no head end LSR, de onde a função de sinalização inicia a constituição do LSP.

Observa-se que, nessa configuração, o nó que suporta o PCE pode também atuar como um nó composto por um PCE e um *head end LSR*, mas essas duas funções são independentes.

### 3.2.1.3 - PCEs Múltiplos Externos ao Head End LSR

A Figura 3 ilustra como múltiplos PCEs podem realizar cálculos de caminhos ao longo do caminho sendo sinalizado. Essa solução justifica-se quando o primeiro cálculo não é suficiente, sendo necessária a realização de cálculos complementares adiante no caminho.



**Figura 3 – PCEs múltiplos Externos ao Head End LSR.**

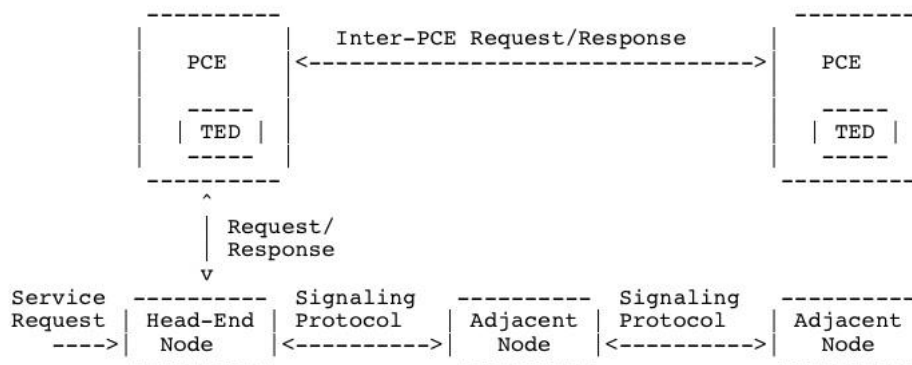
No primeiro cálculo, fica determinado apenas o caminho para alcançar o nó intermediário onde se realiza o segundo cálculo, onde é finalizada a definição do restante do caminho.

Omo se observa na figura, o elemento de rede *downstream* consulta um segundo PCE para definir os passos restantes do caminho.

Os dois nós (ou apenas um deles) podem também atuar como diferentes nós compostos por PCEs e *head end LSRs*, ressalvada a independência funcional entre eles.

### 3.2.1.4 – PCEs múltiplos Externos ao Head End LSR com comunicação Inter-PCEs

A segmentação e distribuição da função de cálculo de caminhos do subitem anterior podem ser logradas mediante a introdução de um mecanismo de comunicação entre os PCEs, de forma tal que a requisição/consulta só ocorra no primeiro PCE, como mostra a Figura 4.

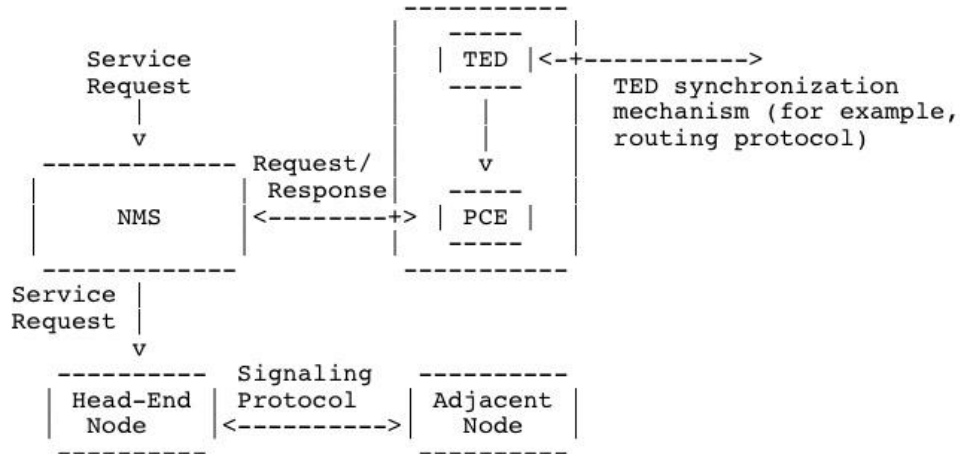


**Figura 4 – Múltiplos PCEs com comunicação inter-PCEs.**

Observa-se que, na configuração da figura, o PCC não enxerga a diferença entre esse caso e o caso de cálculo de caminhos centralizado em um PCE. A comunicação coordenada entre os PCEs ocorre transparentemente para o PCC.

### 3.2.1.5 – PCE Único Operando com Base em Gerenciamento

Observamos que a função não se encontra necessariamente localizada no *head end LSR*. O PCC pode se localizar, como mostra o exemplo da Figura 5, no NMS (Network Management System) da rede, de onde parte a solicitação de cálculo de caminhos para o PCE.



**Figura 5 – PCE único operando com base em gerenciamento.**

O NMS utiliza um mecanismo do plano de gerenciamento para o envio das solicitações e recebimento das respostas do PCE, codificando as informações utilizando uma representação tal como o *TE MIB Module* (RFC 3812).

Uma vez definido o melhor caminho (o ERO), o PCC (no NMS) o envia para o *head end LSR*, onde se localiza o dispositivo de sinalização. De posse do ERO, esse dispositivo dispara a sinalização através da sequência de nós adjacentes.

### 3.2.2 – Configurações com Políticas Externas

O uso de políticas no cálculo de caminhos impacta múltiplos aspectos da arquitetura de PCEs. Existem duas aplicações de políticas para consideração:

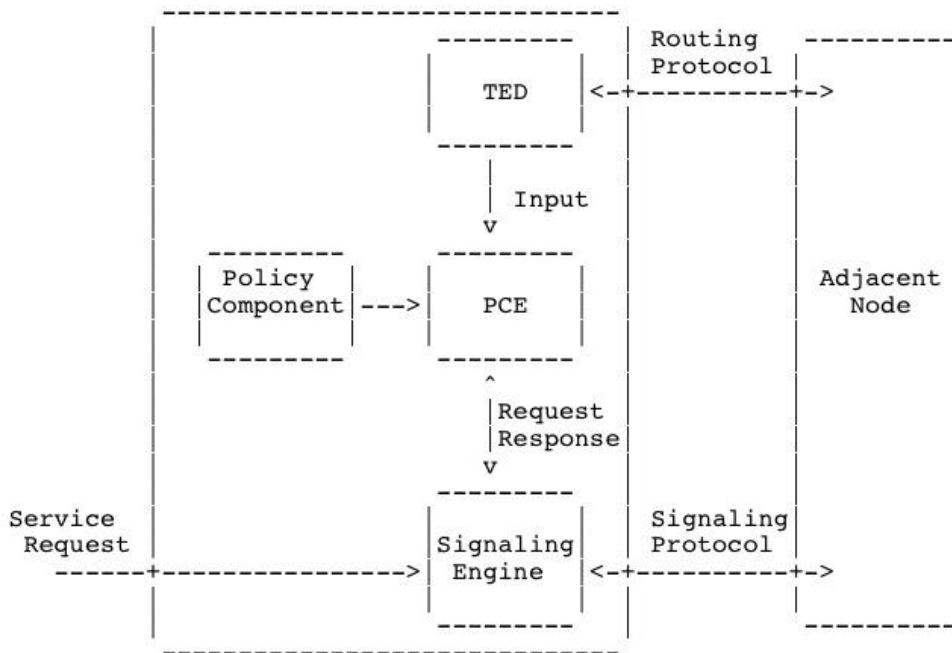
- Aplicação de política em uma entidade de arquitetura, ou seja, no PCE ou no PCC;
- Aplicação de política na comunicação relativa a PCEs.

Alguns exemplos dessas políticas dizem respeito à seleção de um PCE por um PCC, à rejeição de uma solicitação de serviço por um PCE com base na identificação do PCC solicitante ou à consideração/desconsideração de condicionantes adicionais.

Componentes de política podem ser aplicados nas diferentes configurações de uso de PCEs, inclusive naqueles apresentados no subitem anterior.

Apresentamos, a seguir, dois exemplos de configuração de uso de política no contexto da arquitetura de PCEs.

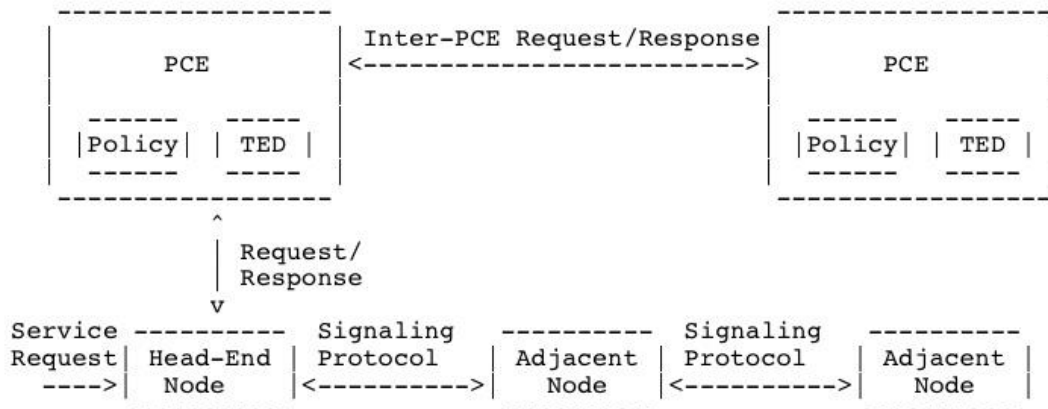
Na Figura 6, é mostrado um componente externo de política como entrada em um PCE operando em composição com o *head end LSR* (configuração da Figura 1 anterior).



**Figura 6 – Componente externo de política em um PCE em composição.**

O componente de política dessa figura pode opcionalmente consultar uma base de dados externa de política.

A Figura 7 exibe o caso de aplicação de componentes políticos em múltiplos PCEs da configuração em que se utiliza comunicação inter-PCEs (configuração da Figura 4 anterior).



**Figura 7 – Componentes de política em múltiplos PCEs com comunicação inter-PCEs.**

#### 4 – CSPF (CONSTRAINED SHORTEST PATH FIRST)

O CSPF é certamente o algoritmo para cálculo de caminhos mais utilizado no plano de controle do MPLS-TE e no GMPLS.

Os leitores interessados em adquirir o conhecimento básico do CSPF pode consultar nosso tutorial Nº 2 (Plano de Controle do MPLS-TE: Base para o GMPLS).



## 5 – PROTOCOLO PCEP (RFC 5440)

A RFC 5440 (*Path Computation Element (PCE) Communication Protocol (PCEP)*) especifica o protocolo PCEP para comunicação entre um PCC e um PCE, assim como entre dois PCEs.

Essa comunicação inclui o envio de requisições para cálculo de caminhos e de respostas notificando a realização do cálculo de caminhos requisitado. Engloba também o envio de notificações de estados específicos relativos ao uso de um PCE no contexto de engenharia de tráfego no MPLS-TE e no GMPLS.

PCEP foi concebido para ser flexível e para também permitir facilmente a adição de eventuais mensagens e objetos no futuro.

Os requisitos genéricos para a definição do PCEP foram estabelecidos na RFC 4657 (*Path Computation Element (PCE) Communication Protocol Generic Requirements*), que estabelece que um mesmo protocolo seja utilizado para a comunicação entre um PCC e um PCE assim como para a comunicação entre dois PCEs.

Requisitos específicos para o uso do PCEP em aplicações especiais de PCEs foram definidos, por exemplo, na RFC 4927 (*Path Computation Element Communication Protocol (PCEP) Specific Requirements for Inter-Area MPLS and GMPLS Traffic Engineering*) e na RFC 5376 (*Inter-AS Requirements for the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP)*).

A RFC 5440 define o PCEP utilizando a modelagem definida na RFC 4101 (*Writing Protocol Models*).

Quando o PCC e o PCE não se localizam em um mesmo dispositivo, torna-se necessária a utilização de um protocolo de comunicação entre eles. Nos termos dos requisitos estabelecidos na RFC 4657, o PCEP, definido na RFC 5440, englobou também a comunicação entre PCEs.

Um PCC pode enviar a um PCE uma requisição de cálculo de caminhos para um ou mais TE LSPs, e o PCE pode responder com um conjunto de caminhos calculados, caso tenham sido encontrados caminhos que satisfaçam as condicionantes impostas.

PCEP opera sobre TCP, visto que o TCP satisfaz os requisitos para a troca confiável de mensagens mediante o uso de mecanismos de controle de fluxo.

### 5.1 – Mensagens PCEP

Diversos tipos de mensagens foram definidos para o PCEP:

- Mensagem *Open* e mensagem *Keepalive*: mensagens utilizadas para inicializar e manter uma sessão PCEP, respectivamente;
- Mensagem *PCReq* (*Path computation Request*): mensagem PCEP enviada por um PCC para um PCE requisitando um cálculo de caminho;
- Mensagem *PCRep* (*Path Computation Reply*): mensagem PCEP enviada por um PCE a um PCC em resposta a uma mensagem *PCReq*. Essa resposta pode ser positiva ou negativa (com indicação da razão para a negação do cálculo).

- Mensagem *PCNtf* (*Path Computation Notification*): mensagem PCEP enviada de um PCC para um PCE, ou de um PCE para um PCC, para notificar um evento específico;
- Mensagem *PCErr* (*Path Computation Error*): mensagem PCEP enviada quando da ocorrência de uma condição de erro;
- Mensagem *Close*: mensagem utilizada para encerrar uma sessão PCEP.

O conjunto de PCEs disponíveis pode ser estaticamente registrado em um PCC ou pode ser descoberto dinamicamente. Os mecanismos para a descoberta dinâmica de um ou mais PCEs encontram-se descritos na RFC 5088 (*OSPF Protocol Extensions for Path Computation Element (PCE) Discovery*) e na RFC 5089 (*IS-IS Protocol Extensions for Path Computation Element (PCE) Discovery*). Os requisitos para a definição dos mecanismos descritos nessas RFCs encontram-se especificados na RFC 4674 (*Requirements for Path Computation Element (PCE) Discovery*).

Um PCC pode possuir sessões PCEP com mais que um PCE, e, similarmente, um PCE pode possuir sessões PCEP com mais que um PCC.

Na comunicação entre dois PCEs, um dos PCEs atua como se fosse um PCC, desempenhando as suas funções.

## **5.2 – Fase de Inicialização e Mecanismo Keepalive**

A fase de inicialização consiste em passos sucessivos, que são o estabelecimento de uma conexão TCP entre o PCC e o PCE, seguida pelo estabelecimento de uma sessão PCEP sobre a conexão TCP.

A conexão TCP (3-way handshake) é estabelecida conforme os padrões estabelecidos pelo IETF para o protocolo TCP. É utilizada a porta TCP 4189 para suporte a sessões PCEP.

O estabelecimento de uma sessão PCEP sobre a conexão TCP é normalmente acompanhado pelo uso de um mecanismo *keepalive*, como mostra a Figura 8.

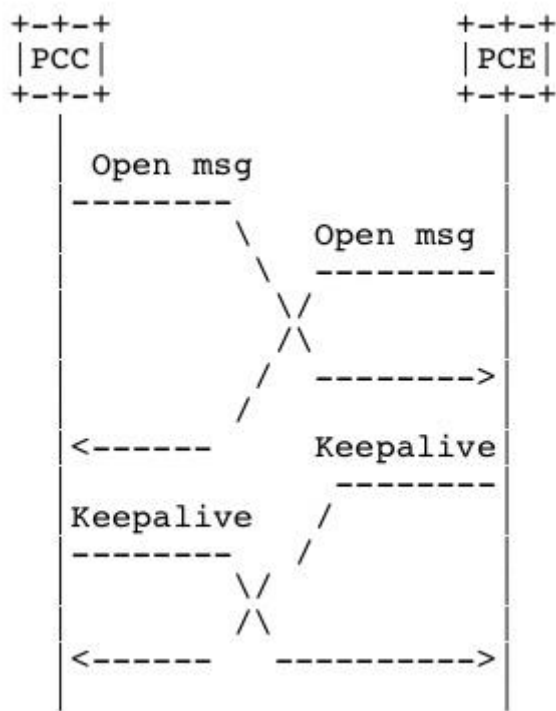


Figura 8 – Estabelecimento de uma sessão PCEP e mecanismo keepalive.

### 5.2.1 – Estabelecimento da Sessão PCEP

Uma vez constituída a conexão TCP, o PCC e o PCE, que são também referidos como pares PCEP (*PCEP peers*), dão início à fase de estabelecimento da sessão PCEP. Nessa fase, são negociados entre os pares PCEP vários parâmetros referentes à sessão PCEP sendo estabelecida.

Como se verifica na figura anterior, o estabelecimento de uma sessão PCEP começa com o envio de uma mensagem *Open* do PCC para o PCE. Estando tudo certo, o PCE responde com outra mensagem *Open*, o que propicia o estabelecimento da sessão PCEP.

Os parâmetros negociados são transportados nas mensagens *Open*, e incluem o *Keepalive Timer*, o *DeadTimer* e potencialmente outras capacidades e regras políticas que especificam as condições sob as quais as solicitações de cálculo de caminhos são enviadas para o PCE.

Se a fase de estabelecimento da sessão PCEP falha porque os pares PCEP não concordam com os parâmetros propostos, ou se um dos pares PCEP não responde antes da expiração do temporizador de estabelecimento, a conexão TCP é imediatamente encerrada.

Apenas uma sessão PCEP pode existir entre par de pares PCEP em um dado momento. Além disso, apenas uma conexão TCP em uma porta PCEP pode existir entre um par de pares PCEP em um dado momento.

### 5.2.2 – Mecanismo Keepalive

Durante a existência de uma sessão PCEP, o PCC ou o PCE pode desejar saber se o seu par PCEP permanece operacionalmente disponível.

É possível a realização dessa função pelo TCP, mas o mecanismo definido na RFC 5440 com esse propósito apresenta vantagens que justificam a preferência pelo seu uso.

O mecanismo da RFC 5440 baseia-se no uso de um temporizador *Keepalive*, de um *DeadTimer* e da mensagem *Keepalive*.

Cada par PCEP utiliza um temporizador *Keepalive*. O par PCEP reestarta esse temporizador a cada vez que ele envia uma mensagem na sessão PCEP. Quando o temporizador expira, o par PCEP envia uma mensagem *Keepalive*. Cada par PCEP pode utilizar um valor próprio para o temporizador *Keepalive*.

A mensagem *Keepalive* é também utilizada em resposta a uma mensagem *Open* para notificar que a mensagem *Open* foi recebida e que as características por ela transportadas foram aceitas.

Observa-se que as mensagens não requerem respostas do par receptor.

O valor mínimo para o temporizador *Keepalive* é de 1 segundo, mas o valor default é de 30 segundos.

Os pares PCEP utilizam também *DeadTimers*, que são reestertados quando uma mensagem é recebida na sessão PCEP. Se um par PCEP não receber qualquer mensagem até que o *DeadTimer* expire, esse par declara a sessão morta (*dead*).

O valor default recomendado para o *DeadTimer* é de 4 vezes o valor do temporizador *Keepalive* utilizado pelo par PCEP remoto.

### 5.3 – Solicitação e Resposta de Cálculo de Caminho

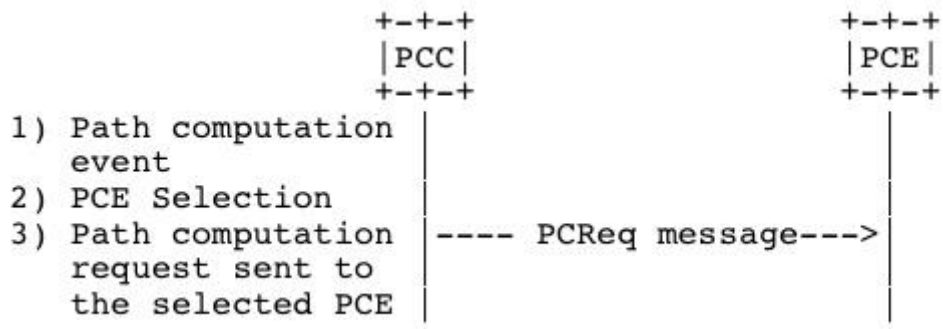
Conforme menção anterior neste tutorial, um cálculo de caminho é solicitado por uma mensagem *PCReq* do PCC para o PCE, que é respondida por uma mensagem *PCRep* originada pelo PCE.

#### 5.3.1 – Mensagem PCReq do PCC para o PCE

Estando estabelecida uma sessão PCEP, quando um evento que requisita o cálculo de um conjunto de caminhos é acionado, o PCC passa a selecionar um ou mais PCEs para esse cálculo. Observa-se que esse processo de seleção pode ocorrer antes do estabelecimento da sessão PCEP.

Uma vez estabelecida a sessão PCEP e selecionado um PCE pelo PCC, esse PCC envia uma mensagem *PCReq* contendo uma variedade de objetos que especificam o conjunto de condicionantes e atributos para o caminho a ser estabelecido.

A Figura 9 ilustra o envio de uma mensagem *PCReq* do PCC para o PCE.



**Figura 9 – Envio de mensagem PCReq.**

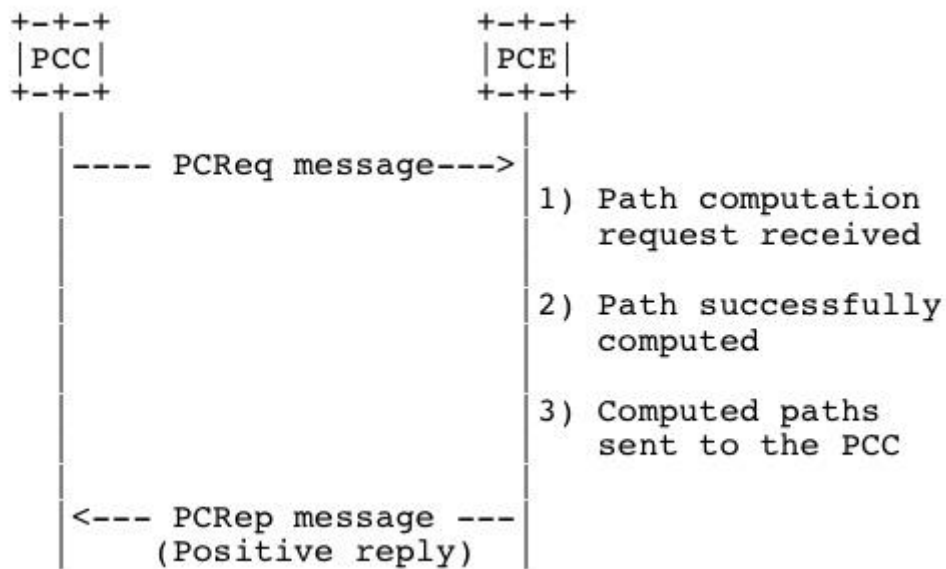
Por comparação dessas condicionantes e desses atributos com as informações contidas na TED e considerando as políticas aplicáveis, o PCE é capaz de definir o melhor caminho a ser utilizado.

### 5.3.2 – Mensagem PCRep do PCE para o PCC

Tendo recebido uma mensagem *PCReq* do PCC, o PCE verifica a viabilidade de atendimento à solicitação requerida.

Caso o PCE encontre um caminho que satisfaça o conjunto requerido de condicionantes, ele envia uma mensagem *PCRep* notificando o recebimento da solicitação, informando a realização com sucesso do cálculo e enviando o conjunto de caminhos calculados para o PCC solicitante.

A Figura 10 ilustra uma solicitação de cálculo de caminho atendida com sucesso.



**Figura 10 – Solicitação de cálculo de caminho atendida com sucesso.**

Caso o PCE não encontre caminhos satisfatórios, ele envia uma mensagem *PCRep* notificando esse fato, podendo indicar o conjunto de condicionantes que levaram ao

insucesso. O PCC decide então se reenvia uma solicitação alterada ou se toma outra ação que julgue apropriada.

A Figura 11 ilustra uma solicitação de cálculo de caminho sem sucesso.

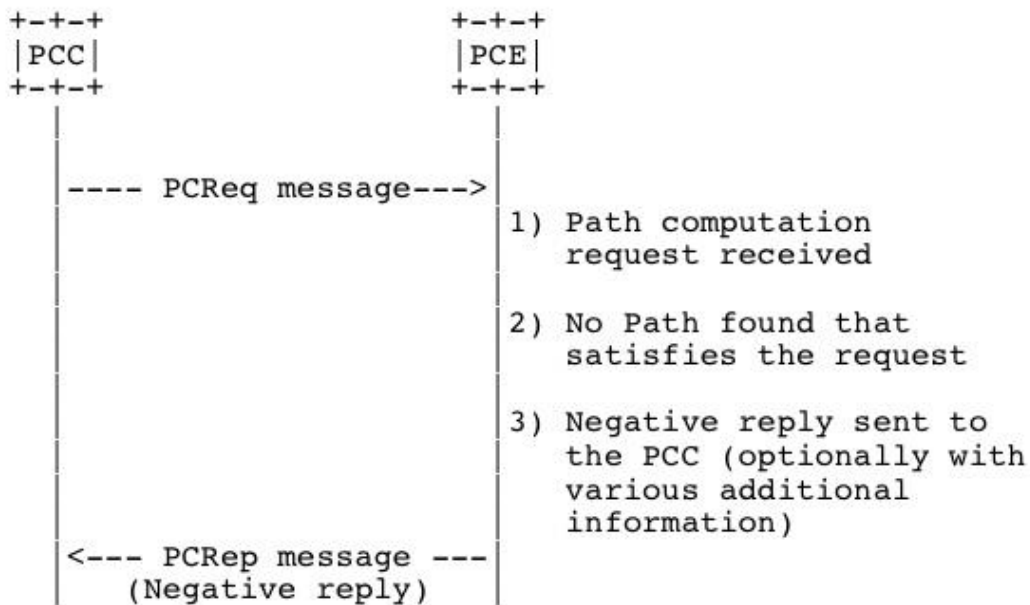


Figura 11 – Solicitação de cálculo de caminho sem sucesso.

#### 5.4 – Notificação de Eventos

Em determinadas circunstâncias, pode tornar-se necessário o envio de mensagens *PCNtf*, pelo PCE ou pelo PCC, para notificar certos eventos.

Notificações pelo PCE podem ser causadas, por exemplo, por sobrecarga no PCE, o que inviabiliza o atendimento de uma determinada solicitação. A Figura 12 exhibe o envio de mensagem *PCNtf* pelo PCE nessa hipótese.

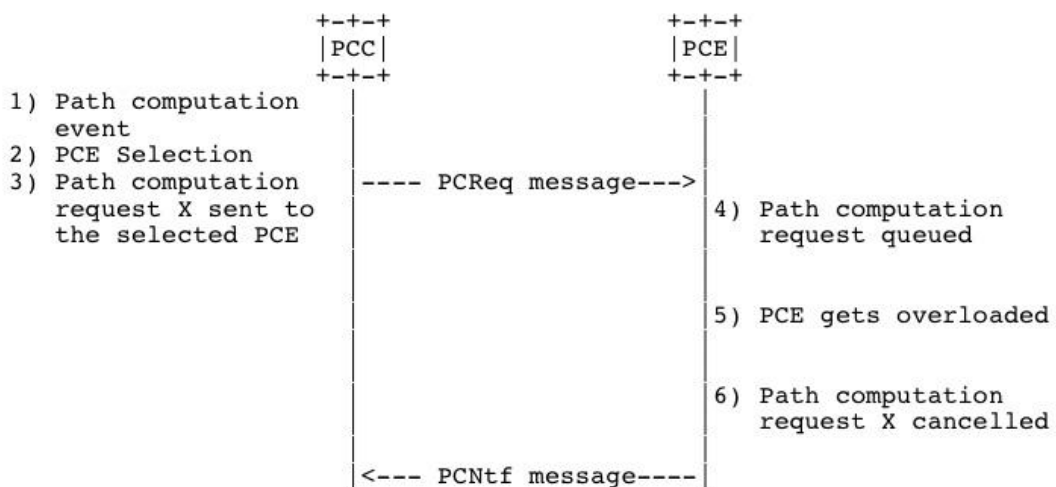
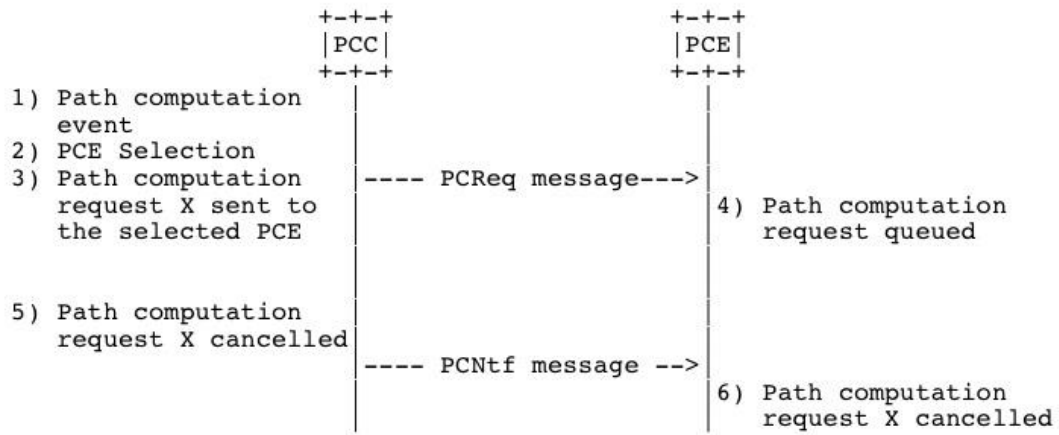


Figura 12 – Notificação pelo PCE por sobrecarga.

No exemplo dessa figura, o PCE entra em sobrecarga enquanto mantinha uma solicitação em fila, o que provoca o cancelamento dessa solicitação e o envio de mensagem *PCNtf* notificando esse fato.

O PCC, por sua vez, pode enviar uma mensagem *PCNtf* para o PCE, por exemplo, na hipótese de desejar cancelar uma solicitação enviada, como mostra a Figura 13.



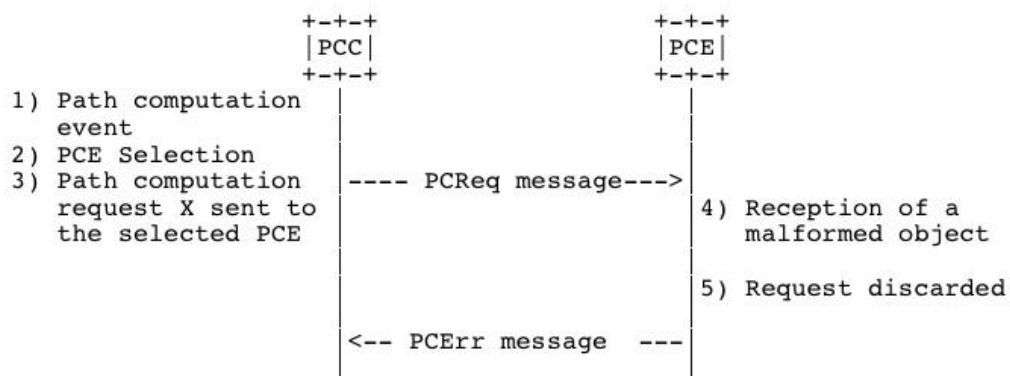
**Figura 13 – Notificação pelo PCC para cancelamento de solicitação.**

Como se observa na figura, a notificação pelo PCC resulta no cancelamento pelo PCE da solicitação que se encontrava na fila para atendimento.

### 5.5 – Notificação de Erros

A ocorrência de determinadas condições de erro provoca o envio de uma mensagem *PCErr* notificando essa ocorrência. Essas mensagens podem ser geradas também no caso em que a solicitação recebida não atende as especificações do PCEP, tais como objetos malformados, mensagens não esperadas ou violação de política estabelecida.

A Figura 14 exhibe um exemplo de envio de uma mensagem *PCErr* pelo PCE, em decorrência da recepção de uma solicitação com um objeto malformado.



**Figura 14 – Envio de mensagem *PCErr* pelo PCE por má formação de objeto.**

## 5.6 – Encerramento de Sessão PCEP

Quando um dos pares PCEP deseja encerrar uma sessão PCEP, ele envia inicialmente uma mensagem *Close* e então fecha a conexão TCP.

Se a sessão PCEP é encerrada por um par PCEP, o outro par PCEP deleta todos os estados relativos às solicitações nele pendentes.

Uma mensagem *Close* só pode ser enviada para encerrar uma sessão PCEP já estabelecida.

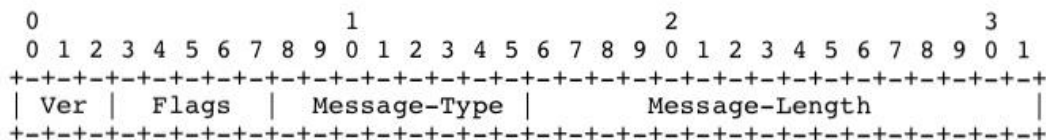
Em caso de falha da conexão TCP, a sessão PCEP suportada é imediatamente encerrada.

## 5.7 - Formatos de Mensagens PCEP

Uma mensagem PCEP é constituída por um cabeçalho comum, seguido por um payload de tamanho variável, composto por um conjunto de objetos que podem ser obrigatórios ou opcionais.

### 5.7.1 – Cabeçalho Comum de Mensagens PCEP

O cabeçalho comum das mensagens PCEP tem o formato apresentado na Figura 15.



**Figura 15 – Cabeçalho comum de mensagens PCEP.**

Os campos desse cabeçalho possuem os significados expostos a seguir.

+ **Ver** (*Version*), com 3 bits: A versão atual do PCEP é versão 1.

+ **Flags**, com 5 bits: Nenhum flag foi definido na RFC 5440. São considerados como reserva, utilizam o valor zero e são ignorados na recepção.

+ **Message-Type**, com 8 bits:  
Correntemente encontram-se definidos os seguintes tipos:



Valor	Significado
1	Open
2	Keepalive
3	Path Computation Request (PCReq)
4	Path Computation Reply (PCRep)
5	Notification (PCNtf)
6	Error (PCErr)
7	Close

+ **Message-Length**, com 2 bytes: Comprimento total da mensagem PCEP incluindo o cabeçalho comum, expresso em bytes.

## 5.7.2 – Objetos de Mensagens Específicas

Vamos aqui apresentar, a título de ilustração e exemplo, os objetos utilizados pelas mensagens *Path Computation Request (PCReq)*. Os objetos das demais mensagens podem ser encontrados no item 6 da RFC 5440.

### 5.7.2.1 – Objetos de Mensagens PCReq

Uma mensagem *PCReq* pode transportar mais que uma solicitação de cálculo de caminho. Conforme subitem anterior, as mensagens *PCReq* são identificadas pelo código 3.

Existem dois objetos obrigatórios que devem ser incluídos nas mensagens *PCReq*, que são o objeto RP (*Request Parameters*) e o objeto END-POINTS. Se um desses objetos, ou ambos, não for transmitido, o PCE receptor deve recusar a mensagem *PCReq* recebida e enviar uma mensagem *PCErr* para o PCC que a enviou.

Os demais objetos das mensagens *PCReq* são opcionais.

A relação de objetos das mensagens *PCReq* é a seguinte:

- Objeto **SVEC** (*Synchronization Vector*): O objeto opcional SVEC, que pode ser transportado em uma mensagem *PCReq*, é utilizado pelo PCC para solicitar a sincronização de múltiplas solicitações de cálculo de caminhos, dependentes ou independentes. Possui a classe de objeto 11 e o tipo de objeto 1;

- Objeto **RP** (*Request Parameters*): O objeto RP, obrigatório em mensagens *PCReq* e *PCRep* e opcional em mensagens *PCNtf* e *PCErr*, é utilizado para especificar diversas características da solicitação de cálculo de caminhos. Possui a classe de objeto 2 e o tipo de objeto 1;

- Objeto **END-POINTS**: O objeto obrigatório END-POINTS é utilizado em mensagens *PCReq* para especificar o endereço IP de origem e o endereço IP de destino do caminho solicitado. Esse caminho pode corresponder a um LSP ou a um segmento de caminho. Possui a classe de objeto 4 e os tipos de objeto 1 (IPv4) ou 2 (IPv6);

- Objeto **LSPA** (*LSP Attributes*): O objeto opcional LSPA, utilizado em mensagens *PCReq* e circunstancialmente em mensagens *PCRep*, tem o propósito de especificar

vários atributos de TE PSP considerados pelo PCE durante o cálculo de caminhos. Possui a classe de objeto 9 e o tipo de objeto 1;

- Objeto **BANDWIDTH**: O objeto BANDWIDTH é utilizado para especificar a banda passante requisitada para um TE LSP. Se a banda solicitada for igual a 0, esse objeto é opcional, mas se for diferente de 0, a mensagem *PCReq* DEVE contê-lo. Pode ser transportado em mensagens *PCReq* e em mensagens *PCRep*. Possui a classe de objeto 15 e os tipos de objeto 1 (solicitação de banda passante) ou 2 (reotimização de banda passante);

- Objeto **METRIC**: O objeto opcional METRIC, utilizado em mensagens *PCReq* e em mensagens *PCRep*, objetiva especificar a métrica a ser adotada e outros propósitos. As métricas possíveis são o custo IGP, a métrica TE e o número de hops atravessados pelo TE LSP. Possui a classe de objeto 6 e o tipo de objeto 1;

- Objeto **RRO** (*Reported Route Object*): O objeto opcional RRO, utilizado exclusivamente em mensagens *PCReq*, objetiva reportar a rota seguida por um TE LSP para o qual uma reotimização é desejada. Seu conteúdo é idêntico em codificação ao conteúdo do *Record Route Object* definido para sinalização no MPLS-TE e no GMPLS. Possui a classe de objeto 8 e o tipo de objeto 1;

- Objeto **IRO** (*Include Route Object*): O objeto opcional IRO, utilizado em mensagens *PCReq* e em mensagens *PCRep*, pode ser utilizado para especificar que o caminho calculado DEVE atravessar um conjunto especificado de elementos de rede. Possui a classe de objeto 10 e o tipo de objeto 1;

- Objeto **LOAD- BALANCING**: O objeto opcional LOAD-BALANCING, utilizado em mensagens *PCReq*, objetiva possibilitar a um PCC solicitar a constituição de um conjunto de TE LSPs cuja soma de bandas passantes seja igual a X Mbps, caso não esteja disponível um caminho com essa disponibilidade de banda passante. Possui a classe de objeto 14 e o tipo de objeto 1.

### 5.7.2.2 – Objetos das Demais Mensagens

As demais mensagens utilizam outros objetos, conforme a relação abaixo:

- Objeto **OPEN**: Classe de objeto 1 e tipo de objeto 1 (obrigatório em mensagens *Open* e opcional em mensagens *PCErr*);

- Objeto **NO-PATH**: Classe de objeto 3 e tipo de objeto 1 (mensagens *PCRep*);

- Objeto **ERO** (*Explicit Route Object*): Classe de objeto 7 e tipo de objeto 1 (mensagens *PCRep*);

- Objeto **NOTIFICATION**: Classe de objeto 12 e tipo de objeto 1 (mensagens *PCNtf*);

- Objeto **PCEP-ERROR**: Classe de objeto 13 e tipo de objeto 1 (mensagens *PCErr*);

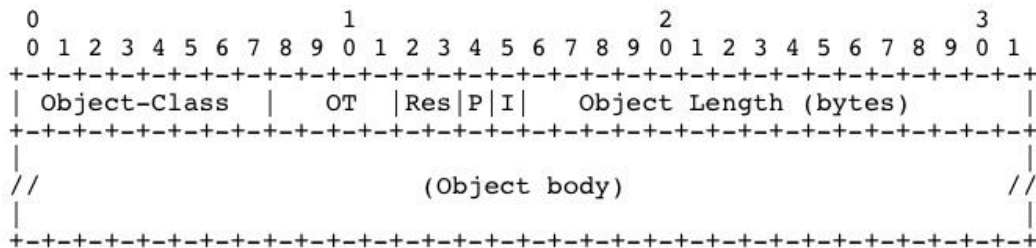
- Objeto **CLOSE**: Classe de objeto 15 e tipo de objeto 1 (mensagens *Close*).

## 5.8 – Formatos de Objetos

Os formatos dos objetos iniciam por um cabeçalho comum a todos os objetos. Esse cabeçalho é seguido por campos específicos para cada objeto. Os objetos podem conter também um ou mais TLVs codificando conjuntos de dados.

### 5.8.1 – Cabeçalho Comum dos objetos PCEP

Os objetos das mensagens PCEP, constituídos por palavras de 32 bits, possuem um cabeçalho comum formatado conforme a Figura 16.



**Figura 16 – Formato comum dos objetos das mensagens PCEP.**

Os campos dessa figura têm os seguintes significados:

- + **Object-Class**, com 8 bits: Identifica a classe do objeto PCEP.
- + **OT** (*Object Type*), com 4 bits: Identifica o tipo do objeto PCEP.
- + **Res** (*Reserved*), com 2 bits: Bits flag de reserva, transmitidos com valor zero e ignorados na recepção.
- + **Flag P** (*Processing Rule*), 1 bit: O flag P permite ao PCC especificar em uma mensagem *PCReq* se o objeto deve ser levado em consideração pelo PCE (P igual a 1) ou é apenas opcional (P igual a 0).
- + **Flag I** (*Ignore*), 1 bit: O flag I permite ao PCE especificar em uma mensagem *PCRep* se um objeto opcional foi ignorado (I igual a 1) ou processado (I igual a 0) durante o cálculo do caminho. O flag I não tem significado quando o flag P na mensagem *PCReq* correspondente se encontrava setado (valor 1).
- + **Comprimento do objeto**, com 16 bits: Especifica o tamanho total do objeto, incluindo o cabeçalho, em múltiplos de 4 bytes. O valor do tamanho máximo do objeto é de 65.528 bytes.
- + **Flag I** (*Ignore*), 1 bit: O flag I permite ao PCE especificar em uma mensagem *PCRep* se um objeto opcional foi processado (I igual a 0) ou não (I igual a 1). O flag I não tem significado quando a correspondente mensagem *PCReq* tinha o flag P com o valor 1.

+ **Object Length**, com 4 bytes: Especifica o tamanho total do objeto incluindo o cabeçalho, medido em bytes, em múltiplos de 4. O tamanho máximo dos objetos PCEP é de 65.528 bytes.

## 5.8.2 – Payloads dos Objetos PCEP

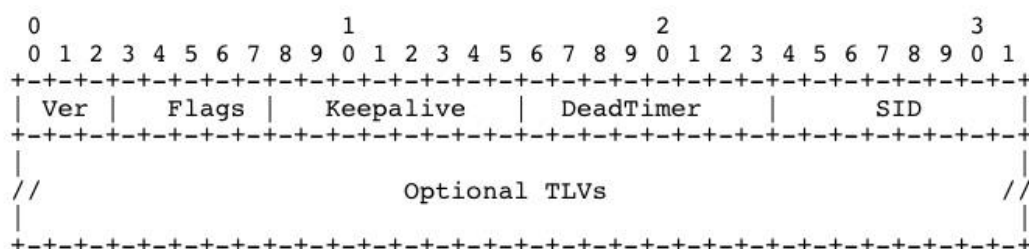
Cada um dos objetos definidos possui o seu payload próprio, concebido de acordo com a função desempenhada pelo objeto na mensagem, ou nas mensagens, que o transporta (m).

A título de exemplificação ilustrativa, apresentaremos, a seguir, os formatos dos payloads dos objetos *OPEN*, *METRIC* e *NOTIFICATION*. Os formatos dos demais objetos podem ser vistos pelo leitor interessado no ítem 7 da RFC 5440.

### 5.8.2.1 – Objeto OPEN

O objeto *OPEN*, cuja classe é 1 e cujo tipo é também igual a 1, que DEVE estar presente em cada mensagem *Open* e que PODE constar de mensagens *PCErr*, contém um conjunto de campos que especificam diferentes parâmetros relativos à sessão PCEP sendo estabelecida.

A Figura 17 apresenta o formato do payload do objeto *OPEN*.



**Figura 17 – Formato do payload do objeto OPEN.**

Os campos desse formato possuem os seguintes significados:

- **Ver (Version)**, com 3 bits: A versão do PCEP atual é 1;
- **Flags**, com 5 bits: Nenhum flag foi definido na RFC 5440;
- **Keepalive**, com 8 bits: Representa o período de tempo máximo, em segundos, entre duas mensagens PCEP consecutivas enviadas pelo originador da presente mensagem *Open*. O valor mínimo é de 1 segundo, e o valor recomendado é de 30 segundos;
- **DeadTimer**, com 8 bits: Representa o tempo após a expiração do período durante o qual o par PCEP pode declarar que a sessão com o originador da mensagem *Open* é considerada inativa se nenhuma mensagem PCEP foi recebida. O valor recomendado é de 4 vezes o valor do *Keepalive*.
- **SID (PCEP session ID)**, com 8 bits: Um valor numérico arbitrário que identifica a sessão PCEP corrente. Esse valor deve ser incrementado do valor 1 a cada vez que uma nova sessão PCEP é estabelecida.

- **Opcional TLVs:** TLVs podem ser opcionalmente incluídos no payload do objeto *OPEN* para especificar características do PCC ou do PCE.

### 5.8.2.2 – Objeto METRIC

O objeto opcional *METRIC*, cuja classe é 6 e cujo tipo é 1, pode ser utilizado com diversos propósitos.

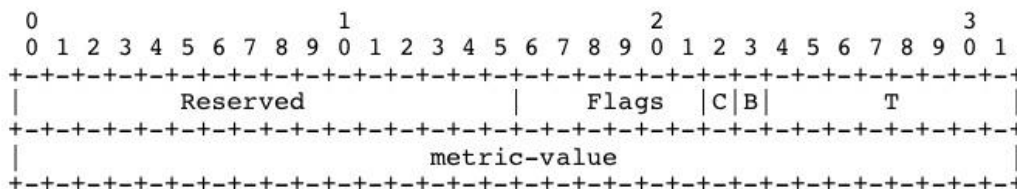
Em mensagens *PCReq*, um PCC pode inserir um ou mais objetos *METRIC* com dois propósitos básicos:

- Para indicar a métrica a ser utilizada no cálculo do caminho. A RFC 5440 considera três métricas, que são a métrica por custos IGP, a métrica TE (ver RFC 3785) e a métrica com base em número de hops;
- Para indicar um limite para o custo do caminho que NÃO PODE excedida para que possa ser considerada aceitável pelo PCC.

Em mensagens *PCRep*, o objeto *METRIC* PODE ser inserido também com dois propósitos:

- Para prover o custo para o caminho calculado;
- Para indicar, juntamente com o objeto *NO-PATH*, que a condicionante relativa a métrica pode não ter sido atendida.

A Figura 18 mostra o formato do payload do objeto *METRIC*.



**Figura 18 – Formato do payload do objeto METRIC.**

O payload do objeto *METRIC* tem o tamanho fixo de 8 bytes.

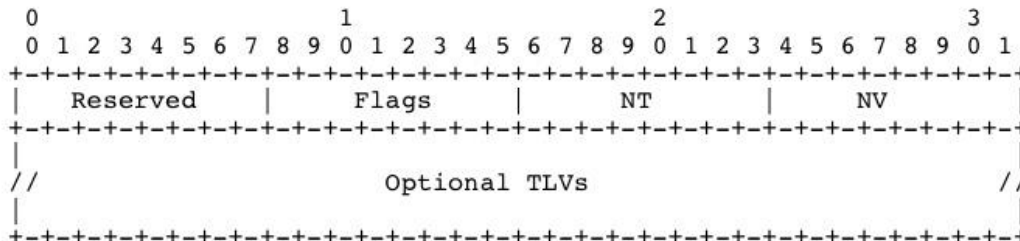
Os campos da figura possuem os seguintes significados:

- **Reserved**, com 16 bits: Esse campo deve ser zerado e ignorado na recepção;
- **Flags**, com 8 bits: Foram definidos dois flags com 1 bit, que são o flag C (*Computed Metric*) e o flag B (*Bound*);
- **T (Type)**, com 8 bits: Esse campo especifica o tipo de métrica, sendo T=1 (Métrica IGP), T=2 (métrica TE) e T=3 (contagem de hops);
- **Metric-Value**, com 32 bits: Especifica o valor da métrica utilizada.

### 5.8.2.3 – Objeto NOTIFICATION

O objeto *NOTIFICATION*, cuja classe é 12 e cujo tipo é 1, que é transportado exclusivamente em mensagens *PCNtf*, pode ser utilizado em mensagens enviadas do PCC para o PCE ou enviadas do PCE para o PCC para notificar a ocorrência de um evento.

A Figura 19 exibe o formato do payload do objeto *NOTIFICATION*.



**Figura 19 – Formato do payload do objeto Notification.**

Os campos dessa figura possuem os seguintes significados:

- **Reserved**, com 8 bits;
- **Flags**, com 8 bits: Nenhum flag foi definido na RFC 5440. Os valores devem ser zerados e ignorados na recepção;
- **NT** (*Notification Type*), com 8 bits: Especifica a classe de notificação;
- **NV** (*Notification Value*), com 8 bits: Provê informações adicionais relacionadas à natureza da notificação.

O payload do objeto *NOTIFICATION* pode transportar também TLVs opcionais.

### 5.9 – Atualizações da RFC 5440

A RFC 5440 foi atualizada pela emissão da RFC 7896 (*Update to the Include Route Object (IRO) Specification in the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP)*), RFC 8253 (*PCEPS: Usage of TLS to Provide a Secure Transport for the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP)*) e RFC 8356 (*Experimental Codepoint Allocation for the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP)*).

A RFC 7896 define uma representação padronizada dos elementos de rede a serem incluídos pelo objeto IRO em mensagens do PCEP, para garantir a interoperabilidade entre os pares PCEP.

A RFC 8253 descreve o mecanismo PCEPS, que consiste no uso de Transport Layer Security (TLS) para o provimento de um transporte seguro para o PCEP, em complemento à segurança provida pelo TCP que suporta o PCEP.

As implementações do PCEPS DEVERIAM seguir as práticas e recomendações para utilização de TLS definidas na RFC 7525 (*Recommendations for Secure Usage of Transport Layer Security (TLS) and Datagram Transport Layer Security (DTLS)*).

Finalmente, a RFC 8356 atualiza a RFC 5440 pela alteração de políticas aplicáveis para os registros relativos a mensagens, objetos e TLVs do PCEP, em caráter experimental.

## **6 – REQUISITOS PARA PCEP INTER-AREA E PCEP INTER-AS**

O plano de controle do MPLS-TE e, por extensão, também o GMPLS, foram concebidos para controlar redes contidas em uma Área IGP. Um roteador em uma Área IGP tem pleno conhecimento de sua própria área, mas possui conhecimento limitado de outras áreas, e, em consequência, de outros ASs.

Verificou-se, todavia, a necessidade de estabelecimento de TE LSPs inter-área e de LSPs inter-AS. O grande desafio para o atendimento dessa necessidade encontra-se no cálculo de caminhos dessas redes.

Para vencer esse desafio, o IETF emitiu a RFC 4927 (*Path Computation Element Communication Protocol (PCECP) Specific Requirements for Inter-Area MPLS and GMPLS Traffic Engineering*) e a RFC 5376 (*Inter-AS Requirements for the Path Computation Element Communication Protocol (PCECP)*), para TE LSPs inter-área e TE LSPs inter-AS, respectivamente.

Em ambos os casos, os requisitos definidos têm como referência a RFC 4657, citada previamente neste tutorial. Ambas as soluções definidas são aplicações da arquitetura baseada em PCE para cálculo de caminhos definida na RFC 4655.

### **6.1 – RFC 4927**

Um TE LSP inter-área é um TE LSP que transita através de pelo menos duas áreas IGP. A RFC 4927 relaciona um conjunto detalhado de requisitos para suporte de cálculo de caminhos para TE LSPs inter-área com base em extensões específicas do protocolo PCEP, em complemento à RFC 4657.

Observamos que as RFC 4927 e RFC 5376 utilizam a sigla PCECP para o protocolo designado como PCEP nas RFCs 4655 e RFC 5440.

A RFC 4105 (*Requirements for Inter-Area MPLS Traffic Engineering*) relaciona um conjunto de motivações e de requisitos para o estabelecimento de TE-LSPs através das fronteiras entre áreas IGP. A RFC 4927, por sua vez, destina-se especificamente a definir extensões do protocolo PCEP para o cálculo de caminhos inter-áreas IGP.

Observamos que o cálculo de caminhos inter-áreas IGP com base em PCE pode requerer um mecanismo específico para a descoberta de PCE (*PCE discovery*) através de áreas IGP, cujos requisitos encontram-se detalhados na RFC 4674 (*Requirements for Path Computation Element (PCE) Discovery*).

#### **6.1.1 – Abordagens para Cálculo de Caminhos Inter- Áreas IGP**

Existe atualmente em uso um método para cálculo de caminhos para TE LSPs inter-áreas que se baseia em cálculo de caminhos por domínio, solução essa definida na RFC 5152 (*A Per-Domain Path Computation Method for Computing Inter-Domain Traffic Engineering (TE) Label Switched Path (LSP)*). Esse método, baseado em roteamento em

*loose hops* com expansão do ERO em cada ABR, permite o estabelecimento de TE LSPs entre domínios, mas apresenta limitações em sua aplicação.

A arquitetura para cálculo de caminhos com base em PCE (RFC 4655) mostra-se adequada para o cálculo de TE LSPs inter-áreas.

O uso dessa arquitetura possibilita evitar-se as limitações impostas pela visibilidade topológica limitada, em decorrência da introdução de entidades para cálculo de caminhos com visibilidade topológica mais ampla, ou, alternativamente, por permitir cooperação entre entidades para cálculo de caminhos situadas em cada uma das áreas IGP envolvidas.

Existem duas abordagens principais para o cálculo de caminhos inter-áreas otimizados:

- Cálculo em um único PCE;
- Cálculo em múltiplos PCEs com comunicação entre os PCEs.

Na primeira abordagem, o caminho inter-áreas é calculado por um único PCE que possui visibilidade topológica em todas as áreas IGP e pode assim calcular por si só um TE LSP fim a fim otimizado.

Na segunda abordagem, o cálculo do caminho é distribuído em múltiplos PCEs, cada um deles possuindo visibilidade topológica de partes da rede. Cada um dos PCEs calcula um segmento em seu domínio de visibilidade e colabora com os demais para chegar a um caminho fim a fim otimizado. Essa colaboração ocorre por meio da extensão do PCECP com esse propósito.

## 6.2 – RFC 5376

Os TE LSPs podem ser estabelecidos em um Sistema Autônomo (AS) ou pode cruzar as fronteiras entre ASes. A RFC 5376 estende os requisitos para o protocolo PCEP (PCECP) especificados na RFC 4657 para cobrir o uso do PCEP em suporte ao MPLS-TE (e ao GMPLS por extensão) em âmbito Inter-AS.

A RFC 4216 (*MPLS Inter- Autonomous System (AS) Traffic Engineering (TE) Requirements*) define os cenários que motivam a implementação do MPLS-TE em âmbito inter ASes. Essa RFC especifica também os requisitos para o MPLS-TE inter-AS, tanto quando os ASes se encontram sob a administração de um único Provedor de Serviço (SP) quanto quando se encontram sob a administração de diferentes SPs.

A RFC 5152, já citada neste tutorial, define mecanismos para o cálculo de caminhos entre domínios em um método por domínio (*per-domain*), com as limitações também aqui já citadas.

Por fim, a RFC 5376 provê um conjunto de requisitos para o uso do PCEP para o cálculo de caminhos destinados a TE LSPs entre ASes.

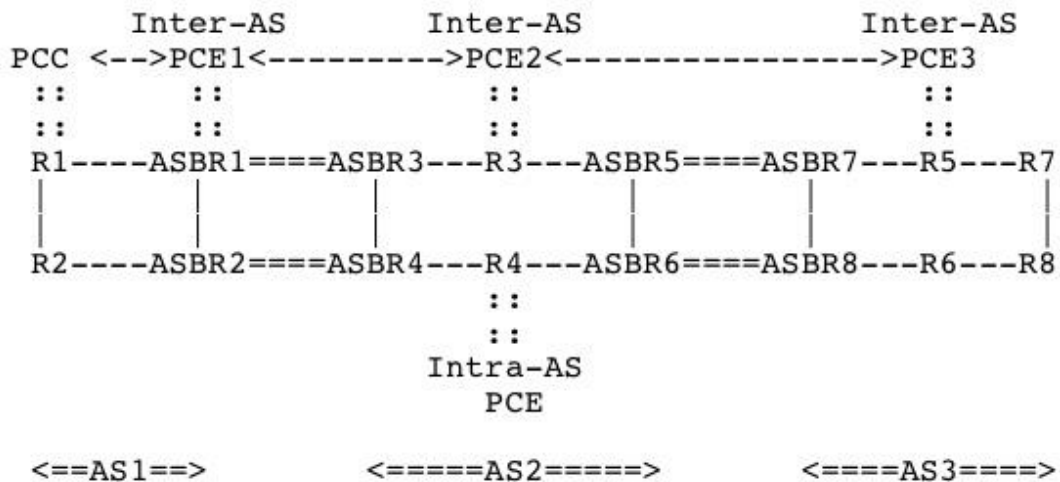
No modelo de referência estabelecido na RFC 5376, consideram-se dois tipos de PCE:



- PCEs inter-ASes;
- PCEs intra - AS.

Um PCC pode contatar um PCE inter-ASes para requisitar o cálculo de um caminho inter-ASes. Esse PCE pode, por si só, suprir o caminho solicitado, ou pode solicitar os serviços de outros PCEs, que podem ser PCEs intra-AS ou PCEs inter-Ases.

Para ilustrar a aplicação do parágrafo anterior, vamos considerar o exemplo da Figura 20.



**Figura 20 – Exemplo de uso de PCEs intra-AS e de PCEs inter- ASes.**

Para o entendimento dessa figura, vamos acompanhar um cenário ilustrativo da interação entre seus componentes.

Suponhamos que R1, situado no AS1, deseja estabelecer um TE LSP (MPLS-TE ou GMPLS) para R7, no AS3 (vamos designar esse LSP como LSP1).

R1 determina, utilizando mecanismos apropriados definidos com esse propósito, que R7 é um destino inter- áreas e que ele (R1) necessita então acessar o seu PCE inter-área (PCE1).

R1, como um PCC, envia uma mensagem *PCReq* para PCE1. PCE1 determina que R7 é alcançável via AS2 e que PCE2 é o PCE onde solicitar o cálculo de caminho através de AS2.

PCE1 envia então uma mensagem *PCReq* para PCE2. PCE2, como um PCE inter-AS, por sua vez, envia uma mensagem *PCReq* para o PCE intra-área R4 solicitando o cálculo de um segmento de caminho no interior de AS2.

R4 pode retornar, por exemplo, uma mensagem *PCRep* para PCE2 indicando ASBR3 como o ponto de entrada para AS2 a partir de AS1, e ASBR7 como ponto de saída para AS3.

PCE2 envia então uma mensagem *PCReq* para PCE3, solicitando o cálculo do segmento de caminho através de AS3, começando no ASBR7 e terminando em R7. PCE3 retorna então uma mensagem *PCRep* para PCE2, com o segmento de caminho ASBR7-R7.

PCE2 retorna, por sua vez, uma mensagem *PCRep* para PCE1, indicando o caminho ASBR3- ASBR5-ASBR7-R7. O PCE1 retorna então uma mensagem *PCRep* para o PCC R1 indicando o caminho ASBR1-ASBR3-ASBR5-ASBR7-R7.

## 7– CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vimos neste tutorial que o cálculo de caminhos no MPLS-TE e no GMPLS representa uma importante etapa no processo de estabelecimento de TE LSPs, e que o IETF optou pelo modelo baseado em PCE definido na RFC 4655 para essa etapa.

O cálculo do melhor caminho para um TE LSP tem como fundamento o batimento das demandas do usuário e de políticas contra as informações dos links da rede conduzidas pelo roteamento e armazenadas na TED do PE que se constitui no head end LSR desse TE LSP.

Definido o melhor caminho, inicia-se a sinalização para a constituição (PCE1) do TE LSP. R1 determina, usando mecanismos apropriados, que R7 é um destino inter-AS e que ele (R1) necessita contatar o seu PCE inter-AS (

Conforme a RFC 4655, o cálculo do melhor caminho realiza-se no PCE, ou nos PCEs, de acordo com a configuração adotada, como visto anteriormente. O Usuário é representado pela entidade PCC.

Para a necessária comunicação padronizada nos dois sentidos entre o PCC e o PCE foi definido, na RFC 5440 o protocolo PCEP, também referido como PCECP.

O IETF especificou diversos requisitos para o PCEP, não só para TE LSPs intra-área (RFC 4657), como também, por extensão, para TE LSPs inter-área (RFC 4927), bem como para TE-LSPs intra-AS e TE LSPs inter- AS (RFC 5376).

## 8– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### 8.1 – 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.

## **8.2 – Padrões do IETF (RFCs)**

RFC 3812 – *Multiprotocol Label Switching (MPLS) Traffic Engineering (TE) Management Information Base (MIB)*

RFC 4105 – *Requirements for Inter-Area MPLS Traffic Engineering*

RFC 4216 – *MPLS Inter – Autonomous System (AS) Traffic Engineering (TE) Requirements*

RFC 4655 – *A Path Computation Element (PCE) – Based Architecture*

RFC4657–*Path Computation Element (PCE) Communication Protocol Generic Requirements*

RFC 4674 – *Requirements for Path Computation Element (PCE) Discovery*

RFC4927–*Path Computation Element Communication Protocol (PCEP) Specific Requirements for Inter-Area MPLS and GMPLS Traffic Engineering*

RFC 5088 – *OSPF Protocol Extensions for Path Computation Element (PCE) Discovery*

RFC 5089 – *IS-IS Protocol Extensions for Path Computation Element (PCE) Discovery*

RFC 5152 – *A Per-Domain Path Computation Method for Establishing Inter-Domain Traffic Engineering (TE) Label Switched Paths (LSPs)*

RFC 5376 – *Inter-AS Requirements for the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP)*

RFC 5440 – *Path Computation Element (PCE) Communication Protocol (PCEP)*

RFC 7525 – *Recommendations for Secure Use of Transport Layer Security (TLS) and Datagram Transport Layer Security (DTLS)*

RFC7896–*Update to the Include Route Object (IRO) Specification in the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP)*

RFC 8253 – *PCEPS: Usage of TLS to Provide a Secure Transport for the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP)*

RFC 8356 – *Experimental Codepoint Allocation for the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP)*

## **9 – TESTE SEU ENTENDIMENTO**

9.1 – Quando se utiliza múltiplos PCEs,

- a) é obrigatório o uso de comunicação entre esses PCEs.
- b) é opcional o uso de comunicação entre esses PCEs.
- c) só é possível o uso de dois PCEs.
- d) não se aplicam as respostas acima.

9.2 – Mensagens *PCReq*

- a) são mensagens PCEP enviadas pelo PCE confirmando a realização do cálculo do caminho.
- b) são mensagens PCEP para o envio de notificações.
- c) são mensagens PCEP utilizadas para inicializar e manter uma sessão PCEP.
- d) são mensagens PCEP enviadas pelo PCC requisitando um cálculo de caminho.

9.3 – Quando um PCC deseja informar atributos do TE LSP a ser calculado, esse PCC deve

- a) utilizar o objeto LSPA na mensagem *PCReq*.
- b) utilizar o objeto SVEC na mensagem *PCReq*.

- c) utilizar uma mensagem *PCNtf*.
- d) utilizar uma mensagem *Open*.

**RESPOSTAS NA PÁGINA SEGUINTE**

**RESPOSTAS:**

**9.1 – b)**

**9.2 – d)**

**9.3 – a)**