

# **Análise de Estabilidade da Estratégia de Encaminhamento QoS-R-LCT**

Marília Curado, Orlando Reis, João Brito, Gonçalo Quadros, Edmundo Monteiro  
marilia@dei.uc.pt, {oreis, jbrito}@student.dei.uc.pt, {quadros, edmundo}@dei.uc.pt

## **Laboratório de Comunicações e Telemática**

CISUC/DEI – Universidade de Coimbra

Pólo II, Pinhal de Marrocos, 3030-290 Coimbra

<http://lct.dei.uc.pt>

## **Resumo**

O encaminhamento com Qualidade de Serviço tem um papel preponderante na concretização de novos serviços para a Internet, tanto no âmbito do modelo dos Serviços Integrados, como no âmbito dos Serviços Diferenciados.

No Laboratório de Comunicações e Telemática (LCT) da Universidade de Coimbra foi desenvolvido um protocolo de encaminhamento com Qualidade de Serviço destinado a sistemas em que a diferenciação de tráfego é realizada de acordo com o paradigma dos Serviços Diferenciados. Este protocolo adiciona características de Qualidade de Serviço ao protocolo de encaminhamento OSPF (*Open Shortest Path First*) contribuindo para o aumento do desempenho sentido pelo tráfego no sistema de comunicação.

A estratégia de encaminhamento desenvolvida efectua o cálculo de caminhos adequados às diferentes classes de tráfego com base em informação relativa ao estado de congestão da rede. O estado das interfaces dos encaminhadores é representado por uma métrica de Qualidade de Serviço, desenvolvida no LCT, composta por dois índices de congestão, um relativo a atraso e outro a perdas.

A instabilidade é uma característica intrinsecamente associada a protocolos de encaminhamento baseados em métricas dinâmicas, em particular a métricas relativas ao estado de congestão da rede. No entanto, a selecção de caminhos com base em informação actualizada do estado da rede é uma necessidade real em sistemas onde se pretenda fornecer Qualidade de Serviço. A estratégia de encaminhamento do LCT possui mecanismos que permitem seleccionar os percursos adequados a cada classe de tráfego, contribuindo para a diferenciação de tráfego e melhoria de desempenho. Estes mecanismos são descritos e avaliados neste artigo, sendo apresentados resultados relativos à sua estabilidade e ao seu impacto no desempenho do tráfego que utiliza o sistema de comunicação.

## **Palavras-chave**

Encaminhamento com Qualidade de Serviço, Serviços Diferenciados, Estabilidade.

## 1. Introdução

A necessidade de Qualidade de Serviço (QoS) nos sistemas de comunicação é um facto incontornável. Neste sentido, tem sido desenvolvido um vasto trabalho de investigação, destacando-se as arquitecturas dos Serviços Integrados e dos Serviços Diferenciados promovidas pela *Internet Engineering Task Force* (IETF) [Braden1994, Blake1998].

Os protocolos de encaminhamento actualmente utilizados na Internet, tanto no interior dos domínios administrativos (intra-domínio) como entre domínios administrativos diferentes (inter-domínio), não possuem características propícias ao fornecimento de QoS às aplicações. Todo o tráfego entre dois pontos é expedido pelo mesmo percurso, mesmo existindo caminhos alternativos mais interessantes para as características específicas de cada fluxo. Normalmente, o percurso seleccionado é o mais curto de acordo com uma métrica definida estaticamente e portanto independente do grau de disponibilidade de recursos. Nestas situações verifica-se a subutilização dos caminhos alternativos e a degradação de desempenho de todo o tráfego devido à congestão do percurso seleccionado.

Os desenvolvimentos mais significativos na área do encaminhamento com QoS têm surgido associados a modelos de serviço onde existe reserva de recursos ou onde é realizado o estabelecimento de ligações extremo-a-extremo [Nahrstedt1998]. No entanto, o encaminhamento com QoS não está contemplado na arquitectura dos Serviços Diferenciados, tornando premente o desenvolvimento de protocolos de encaminhamento adequados a redes onde o tráfego é tratado segundo o paradigma da diferenciação em classes. O protocolo *Quality of Service Routing* do LCT (QoSR-LCT) foi concebido com o objectivo de complementar os mecanismos de diferenciação de tráfego existentes.

Na estratégia de encaminhamento QoSR-LCT são seleccionados os percursos adequados a cada classe de tráfego tendo em consideração informação sobre o estado de congestão da rede. Esta estratégia foi desenvolvida sobre o protocolo de encaminhamento OSPF. A implementação foi realizada na plataforma GateD<sup>1</sup> sobre o sistema operativo FreeBSD [Oliveira2000]. A estratégia de encaminhamento QoSR-LCT foi avaliada no protótipo desenvolvido no LCT, num cenário de testes em ambiente local. Foi avaliado o *overhead* de comunicação e o *overhead* de processamento introduzidos, tendo-se verificado que os valores obtidos eram comportáveis pelo sistema de comunicação [Oliveira2001]. Neste artigo são apresentados os problemas de estabilidade associados ao encaminhamento baseado em métricas de congestão e são descritos e avaliados os mecanismos incluídos na estratégia de encaminhamento QoSR-LCT que permitem ultrapassar esses problemas.

O artigo está organizado do seguinte modo: na Secção 2 é apresentado o problema da estabilidade, sendo referidos alguns trabalhos relacionados; na Secção 3 é descrita a estratégia QoSR-LCT, com particular ênfase nos mecanismos de controlo de estabilidade; na Secção 4 são apresentadas as condições das experiências realizadas. Na Secção 5 são analisados os testes realizados; as conclusões e tópicos a estudar em trabalho futuro são apresentados na Secção 6.

## 2. Estabilidade de Protocolos de Encaminhamento com QoS

O encaminhamento com QoS requer que os percursos sejam seleccionados dinamicamente com base em informação sobre o estado da rede. Pretende-se, deste modo, evitar as zonas da rede que estão congestionadas, melhorando o desempenho sentido pelas aplicações. No entanto, a selecção dinâmica de caminhos pode causar instabilidade de encaminhamento e consequentemente degradação de desempenho.

O processo que origina as oscilações de tráfego na rede segue um padrão bem conhecido. Quando ocorre uma modificação na rede, por exemplo com a introdução de um novo fluxo, o estado da rede altera-se desencadeando a emissão de actualizações e o cálculo de novos caminhos. Após esta

---

<sup>1</sup> <http://www.gated.org>

alteração, o tráfego passa a utilizar os caminhos menos congestionados, libertando os que estavam a ser utilizados. Esta mudança no estado da rede origina a emissão de novas actualizações e eventualmente os caminhos anteriores apresentam-se novamente como opções atractivas. Gera-se deste modo uma situação de oscilação de tráfego entre os percursos alternativos disponíveis.

Uma estratégia comum para evitar a instabilidade nas redes onde é realizado encaminhamento dinâmico é a distribuição de métricas quantificadas em alternativa à divulgação de valores instantâneos. A regra de quantificação pode ser tão simples como a média ou então recorrendo a um mecanismo de histerese [Guérin1999]. Neste caso, o estado da rede só é divulgado se variar significativamente relativamente ao estado prévio considerado.

As oscilações de tráfego devidas a instabilidade de encaminhamento devem-se ao facto de largos volumes de tráfego alternarem sucessivamente entre dois (ou mais) caminhos. Se o volume de tráfego total for distribuído por caminhos diferentes, a modificação no estado de um caminho tem repercussões menos intensas na matriz de tráfego da rede. Deste modo, as técnicas de balanceamento de carga contribuem para evitar a instabilidade de encaminhamento, recorrendo a algoritmos que propiciam a utilização de caminhos múltiplos para tráfego com o mesmo destino [Wang1990, Vutukury1999]. O tráfego pode ser distinguido por fluxo ou por classe, dependendo do paradigma de serviço vigente na rede. Uma concretização do método de balanceamento de carga consiste no desvio do tráfego *best-effort* dos percursos utilizados por tráfego com requisitos de QoS [Ma1999].

A estabilidade de um protocolo de encaminhamento dinâmico é fortemente influenciada pela flutuação dos padrões de tráfego existentes na rede. Uma solução para este problema passa pela utilização de uma estratégia de encaminhamento híbrida tirando partido da natureza do tráfego. Nesta abordagem, os fluxos de longa duração são encaminhados dinamicamente e os fluxos de curta duração são enviados por percursos previamente estabelecidos. Deste modo evita-se a oscilação devida aos fluxos de curta duração (de natureza mais impulsiva que os fluxos de longa duração), diminuindo simultaneamente o consumo de recursos de comunicação originado pela divulgação da informação de encaminhamento e o consumo de capacidade de processamento associado ao cálculo de caminhos [Shaikh1999].

O mecanismo de *route-pinning* é uma estratégia comum para introduzir estabilidade em estratégias de encaminhamento com QoS. Com este mecanismo, um fluxo é mantido no percurso seleccionado durante a sua duração, ou por determinado intervalo de tempo especificado na estratégia. Garante-se assim que não ocorrem oscilações e que os compromissos assumidos pela rede são cumpridos.

### **3. Estratégia QoS-R-LCT**

Nesta secção são descritas as características principais da estratégia de encaminhamento QoS-R-LCT e os mecanismos que utiliza para manter a estabilidade da rede.

#### **3.1. Características da estratégia QoS-R-LCT**

A estratégia QoS-R-LCT realiza encaminhamento com QoS em domínios onde o tráfego é diferenciado em classes. A concepção desta estratégia de encaminhamento consistiu na definição das três componentes principais descritas de seguida.

1. Métricas representativa da disponibilidade de recursos na rede;
2. Requisitos do tráfego em termos de parâmetros de QoS;
3. Algoritmo de selecção de percursos, responsável pelo cálculo do caminho adequado a cada tipo de tráfego, de acordo com o estado dinâmico da rede descrito pelas métricas seleccionadas no ponto 1.

Na estratégia QoS-R-LCT o estado da rede é inferido, a partir do estado das interfaces dos encaminhadores, através de uma métrica que reflecte o estado de congestão das interfaces. Esta métrica é composta por dois índices de congestão, um relativo a atraso (*JcA*) e o outro relativo a perdas (*JcP*). Estes índices representam o impacto que o atraso e as perdas, sentidos no encaminhador, têm no

desempenho das aplicações [Quadros2000]. A distribuição dos índices aos encaminhadores da rede é realizada nos *Link State Advertisements* (LSA) do protocolo de encaminhamento OSPF [Moy1998].

Seguindo uma abordagem semelhante à dos Serviços Diferenciados, na estratégia QoS-LCT o tráfego é classificado num conjunto de classes distinguidas entre si pela sensibilidade a atraso e a perdas. Actualmente estão a ser consideradas quatro classes. A diferenciação destas quatro classes de tráfego ocorre em dois níveis. No primeiro nível, a diferenciação é efectuada em cada elemento de rede pelo escalonador e descartador de pacotes igualmente desenvolvidos no LCT. No segundo nível, a diferenciação de tráfego é realizada pela estratégia de encaminhamento QoS-LCT.

O algoritmo de selecção de caminhos utiliza uma função de custo que combina os dois índices de congestão, pesados de acordo com a sensibilidade de cada classe a atraso e a perdas. A combinação dos índices de congestão resulta num valor que representa o estado de congestão da interface tal como é percebido por cada uma das classes. Como os índices são medidas comparáveis<sup>2</sup>, não ocorre perda de informação causada pela agregação de unidades de natureza diferente. De seguida é aplicado o algoritmo de Dijkstra para seleccionar o caminho mais curto para cada classe de tráfego, de acordo com a aplicação da função de custo apropriada.

### **3.2. Mecanismos de controlo de estabilidade**

A instabilidade é um problema que está fortemente associado ao encaminhamento com QoS. Na estratégia de encaminhamento QoS-LCT é utilizado um conjunto de mecanismos de controlo de estabilidade de modo a garantir a adaptação dos caminhos às alterações de carga e de padrões de tráfego existentes na rede, mas sem induzir oscilações excessivas. Os mecanismos de controlo de estabilidade utilizados são os seguintes:

1. Divulgação de valores dos índices de congestão quantificados e sujeita a um critério relativo;
2. Balanceamento de carga;
3. Classificação das mensagens do protocolo QoS-LCT na classe de tráfego mais prioritária;
4. *Class pinning*.

A divulgação dos valores dos índices de congestão é realizada apenas quando estes variam significativamente relativamente aos valores difundidos anteriormente. Os valores dos índices são sujeitos a um critério relativo, composto por dois limiares. O limiar a aplicar depende do valor do índice ser inferior ou superior a um ponto de transição. Se for inferior ao ponto de transição é aplicado um limiar mais elevado e se estiver acima deste ponto é aplicado um limiar mais baixo. O valor que é submetido ao critério de divulgação representa a média móvel dos índices de congestão, calculada numa janela de tamanho parametrizável [Oliveira2000]. O estudo dos parâmetros que controlam a divulgação da métrica foi realizado de modo a controlar o *overhead* de comunicação e de processamento e a reduzir a instabilidade, introduzidos pela estratégia de encaminhamento com QoS [Oliveira2001].

O balanceamento de carga é concretizado através da selecção, sempre que possível, de percursos diferentes para cada classe de tráfego. Contribui-se assim para um melhor tratamento do tráfego na medida em que é potenciada a utilização de caminhos alternativos, distribuindo o tráfego pela rede e evitando a oscilação de grandes volumes de tráfego. A capacidade de balanceamento de carga está estreitamente relacionada com o nível de carga, padrão de tráfego e também com a topologia da rede.

A congestão existente na rede pode conduzir a situações de instabilidade originadas pela perda das mensagens de encaminhamento. Quando estas mensagens se perdem, os caminhos utilizados ficam desactualizados, contribuindo para a instabilidade e para a degradação de desempenho sentido pelas aplicações [Shaikh2000]. Na estratégia QoS-LCT as mensagens de encaminhamento são classificadas na classe de tráfego mais prioritária, ultrapassando este problema.

---

<sup>2</sup> Os índices medem o impacto que o atraso e as perdas têm no desempenho das aplicações e não valores absolutos de atraso e perdas.

O mecanismo de *class pinning* utilizado na estratégia QoS-LCT baseia-se num compromisso entre o estabelecimento de percursos fixos como acontece nos *Label Switched Paths* (LSP) da tecnologia MPLS (*Multi Protocol Label Switching*, [Rosen2001]) e a mudança imediata de percursos originada por alterações do estado da rede. Quando este mecanismo se encontra activo, um novo percurso só é seleccionado se for significativamente melhor que o anterior. A aferição deste parâmetro é de extrema importância na medida em que se pretende que o sistema mantenha a estabilidade mas continuando a reagir dinamicamente a alterações na rede.

## 4. Descrição das Experiências

As experiências para avaliação da eficácia dos mecanismos de controlo de estabilidade da estratégia QoS-LCT são descritas nesta secção.

### 4.1. Condições de teste

O cenário de testes utilizado na realização das experiências descritas neste artigo encontra-se representado na Figura 1. Os elementos de rede identificados de *router1* a *router5* são encaminhadores com o sistema operativo FreeBSD, com o *kernel* alterado de modo a fazer expedição de pacotes com base no endereço IP do destino e na classe de tráfego indicada no campo *Type-of-Service* (TOS) dos pacotes. Os protótipos do escalonador, descartador e do protocolo QoS-LCT estão instalados e configurados em todos os encaminhadores.

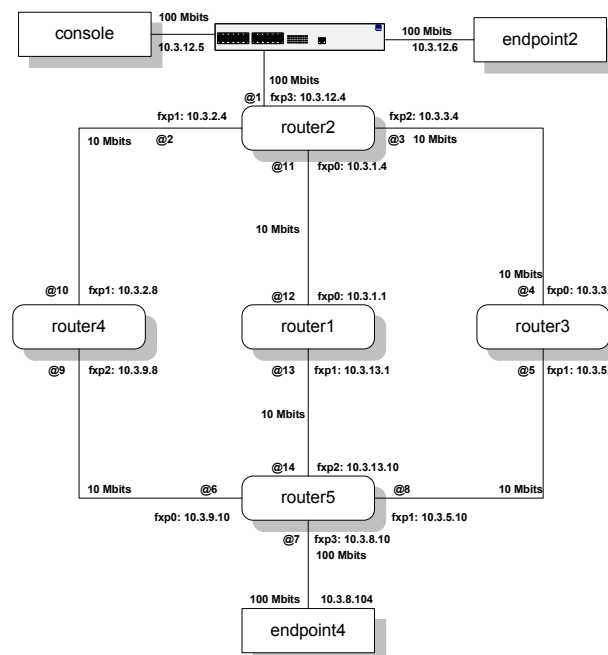


Figura 1. Cenário de testes.

As interfaces que interligam os *endpoints* aos encaminhadores estão configuradas a 100 Mbps. As interfaces entre os encaminhadores estão configuradas a 10 Mbps de modo a introduzir estrangulamento e congestão na rede.

O tráfego foi gerado do *endpoint4* para o *endpoint2* utilizando a aplicação de geração e análise de tráfego Chariot<sup>3</sup>. Foi gerada carga desde 5 a 40 Mbps, composta por tráfego de 2, 3 e 4 classes. As características das classes de tráfego e as combinações consideradas estão patentes nas tabelas 1 e 2.

<sup>3</sup> <<http://www.netiq.com>>

Classe	Sensibilidade a atraso	Sensibilidade a perdas
1	Baixa	Baixa
2	Alta	Média
3	Alta	Baixa
4	Média	Alta

**Tabela 1.** Classes de tráfego.

Carga total (Mbps)	Débito de cada classe (Mbps)		
	2 Classes	3 Classes	4 Classes
5	2,5	1,6	1,25
10	5	3,3	2,5
15	7,5	5	3,75
20	10	6,6	5
25	12,5	8,3	6,25
30	15	10	7,5
35	17,5	11,6	8,75
40	20	13,3	10

**Tabela 2.** Características do tráfego gerado.

Os parâmetros de configuração do protótipo QoS-LCT que foram mantidos constantes durante a realização das experiências são os seguintes:

1. A dimensão da janela utilizada no cálculo da média móvel através da qual os índices de congestão são quantificados;
2. Os limiares do critério relativo que controla a emissão de mensagens de encaminhamento.

Os valores seleccionados para estes parâmetros foram obtidos por aferição experimental [Oliveira2001] e estão expressos na Tabela 3. Pretendeu-se alcançar um compromisso entre a actualidade da informação sobre o estado da rede e o *overhead* de comunicação e de processamento associados a uma distribuição frequente desta informação. O controlo destas medidas contribui de modo decisivo para a estabilidade do sistema, na medida em que limita a frequência da alteração de caminhos.

<b>Limiares</b>	Limiar 1 = 60%, Limiar 2 = 30%
<b>Ponto de transição</b>	50 (valor do índice de congestão)
<b>Dimensão da janela</b>	30 (valores usados na média móvel)

**Tabela 3.** Parâmetros de configuração mantidos constantes.

O parâmetro responsável pela actuação do mecanismo de *class pinning* foi variado de 10% até 50% com incrementos de 10%, sendo as experiências designadas de *Varição 1* a *Varição 5*. Acima de 50% não foram encontradas vantagens evidentes, perdendo-se a desejável capacidade de adaptação a alterações das condições de tráfego na rede.

#### 4.2. Métodos de avaliação de estabilidade

A estabilidade do protótipo foi avaliada ao nível da dinâmica protocolar e ao nível do desempenho sentido pelo tráfego das diferentes classes. A monitorização da dinâmica protocolar foi realizada em todos os encaminhadores do cenário de teste utilizando a ferramenta OSPF-Monitor incluída no

ambiente GateD. Esta ferramenta foi modificada de modo a permitir obter a informação adicional, relativa aos seguintes parâmetros:

1. Número de mensagens de encaminhamento emitidas (*Router-LSA*);
2. Número de mensagens de encaminhamento recebidas incluindo *Router* e *Network LSA*.
3. Número de vezes que é aplicado o algoritmo de cálculo de caminhos (*Shortest Path First – SPF*);
4. Número de vezes que se verificam alterações de percursos.

O impacto da dinâmica da rede no desempenho do tráfego foi avaliado de acordo com o débito e as perdas de pacotes sentidos em cada classe. Estes valores foram monitorizados pela aplicação Chariot.

## 5. Análise de Resultados

Nesta secção são apresentados e discutidos alguns resultados mais significativos dos testes de avaliação de estabilidade da estratégia QoS-R-LCT. Inicialmente são apresentados os resultados relativos à dinâmica protocolar, sendo posteriormente realizada a apreciação do desempenho do tráfego.

### 5.1. Monitorização da dinâmica protocolar

Os parâmetros de avaliação da dinâmica protocolar foram analisados em todos os testes realizados. Neste artigo discutimos o comportamento da estratégia quando varia o número de classes e o nível de carga.

Nos gráficos da Figura 2 são apresentados alguns resultados demonstrativos da dinâmica da estratégia QoS-R-LCT. Os dados mostrados referem-se ao *router5*, pois a informação relativa a este encaminhador é a mais representativa da actividade da rede. Isto deve-se ao estrangulamento que introduz e ao facto de ser o responsável pela expedição de todo o tráfego.

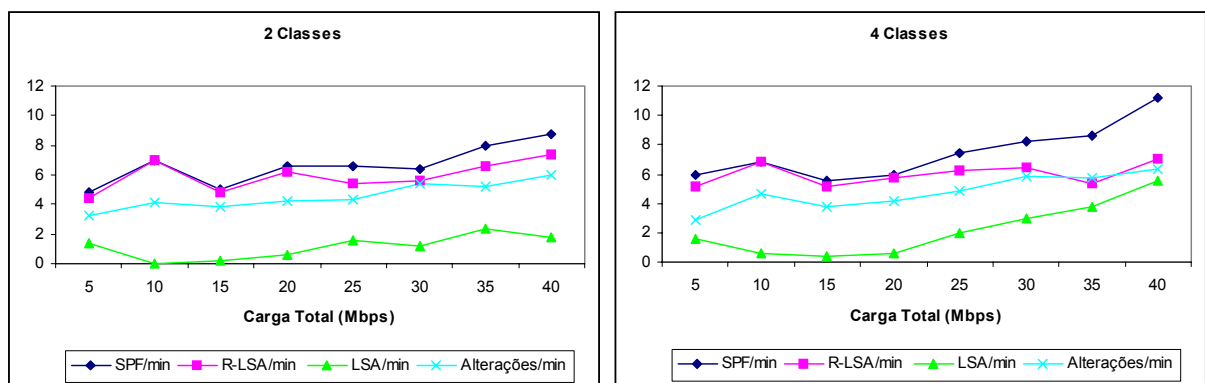


Figura 2. Parâmetros de avaliação da dinâmica protocolar (*router5*).

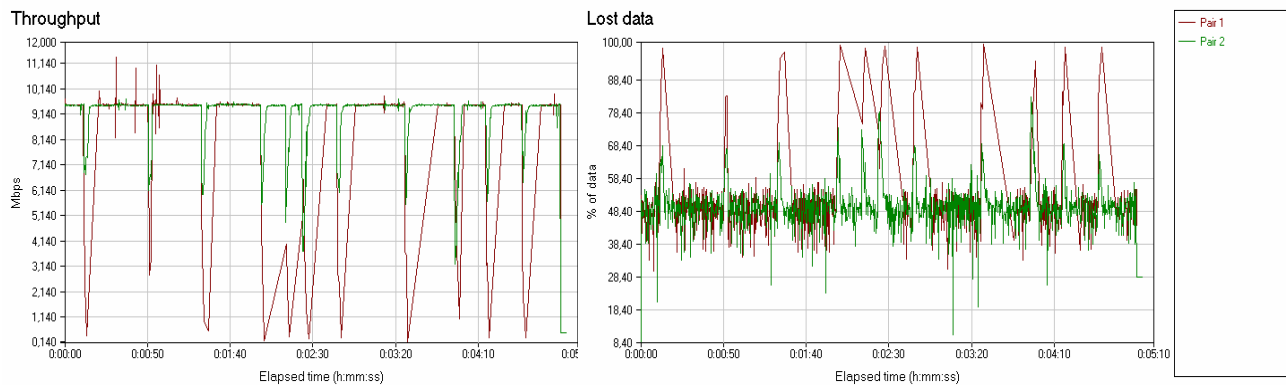
O aumento do número de classes provoca uma subida ligeira nos parâmetros avaliados, sendo esta mais significativa no número de LSAs recebidos e no número de vezes que o algoritmo de cálculo de caminhos é aplicado (SPF). O número de LSAs recebidos aumenta porque são utilizados mais percursos, logo os encaminhadores existentes nesses percursos sofrem mudanças do seu estado e difundem mensagens de encaminhamento com maior frequência. O *router5*, ao receber estas mensagens, aplica o algoritmo de cálculo de caminhos, aumentando deste modo o valor dos SFPs.

O aumento da carga introduzida na rede tem um impacto muito suave na dinâmica protocolar. Este facto mostra claramente a eficácia dos mecanismos de controlo de estabilidade existentes na estratégia QoS-R-LCT. A quantificação da métrica de QoS (índices de congestão) e o critério relativo aplicado ao valor resultante limitam o número de R-LSAs emitidos. O controlo na emissão destas mensagens repercute-se em todos os outros valores. O balanceamento de carga na rede, resultante da utilização de percursos alternativos, permite distribuir as classes pela rede. Deste modo as variações bruscas de

níveis de tráfego são reduzidas e consegue limitar-se o número de vezes que os caminhos são alterados.

## 5.2. Avaliação de desempenho do tráfego

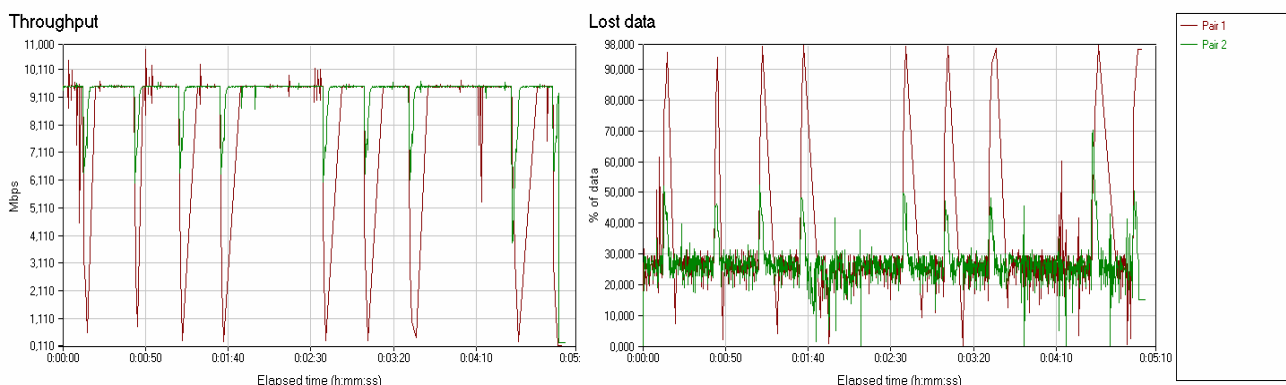
Nos gráficos seguintes são apresentados os resultados relativos a testes com tráfego de duas classes, gerado a um débito de 20 Mbps em cada classe. Na Figura 3 pode ver-se claramente que o tráfego das duas classes é expedido por percursos diferentes, pois é atingido um débito superior a 9 Mbps por cada classe, em interfaces configuradas a 10 Mbps. Outro aspecto que pode ser observado é a diferenciação entre classes, na medida em que a classe 1 (a classe menos prioritária, correspondente ao tráfego *best-effort*) apresenta simultaneamente menor débito, maior taxa de pacotes perdidos e oscilação em maior grau.



**Figura 3.** Testes com duas classes com 20 Mbps cada – variação 3.

A classe 2 (*Pair 2* nos gráficos) ao sofrer perdas consideráveis no percurso que está a utilizar, tenta ocupar o percurso da classe 1 (*Pair 1* nos gráficos) mas, estando este congestionado, volta ao percurso anterior. No sentido de limitar estas oscilações foi aumentado o nível de *class pinning* para 50% (variação 5). Os resultados destes testes encontram-se na Figura 4. Pode observar-se que o comportamento do tráfego é mais estável, sendo que o nível de perdas da classe 2 desceu cerca de 20%. Esta melhoria também é patente no desempenho da classe 1.

Deve salientar-se que, com níveis de congestão mais baixos, a estabilidade foi atingida sem necessidade de activar o mecanismo de *class pinning*, sendo suficiente a capacidade de balanceamento de carga e os mecanismos controladores da difusão das mensagens de encaminhamento.



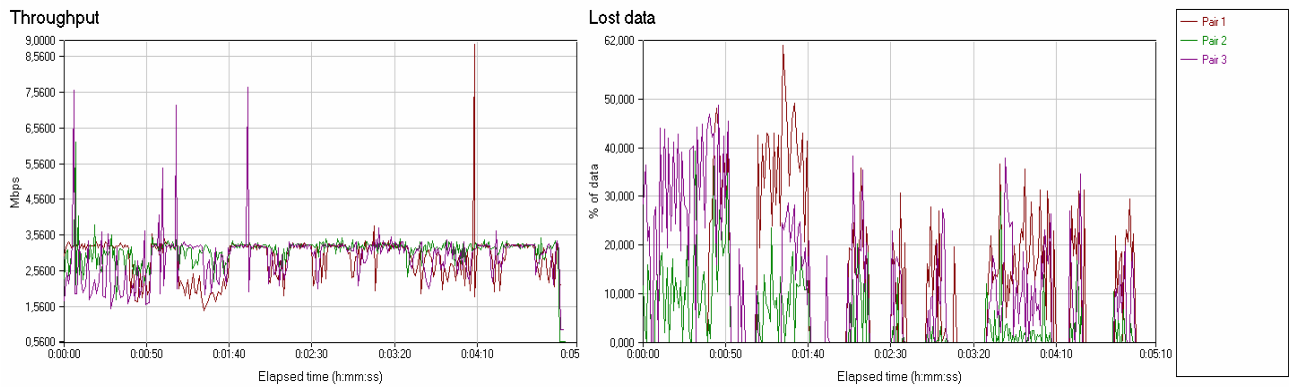
**Figura 4.** Testes com duas classes com 20 Mbps cada – variação 5.

Seguidamente são apresentados e analisados alguns testes representativos do comportamento do sistema, quando é gerado tráfego de três classes, a 3,3 Mbps em cada classe.

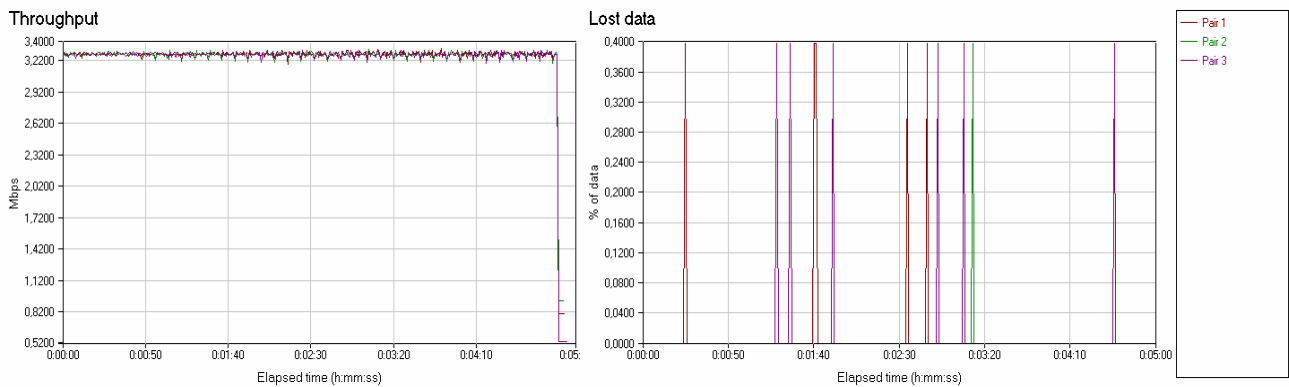
Na Figura 5 pode ver-se que o débito das três classes sofre algumas oscilações, existindo perdas significativas associadas a mudanças de caminhos. No entanto, a diferenciação de tráfego é realizada



correctamente, pois a classe com maior sensibilidade a perdas (classe 2) sofre sempre menos perdas que as outras classes. As oscilações deixam de ocorrer nos gráficos da Figura 6, quando o nível de *class pinning* é passado para 50%.

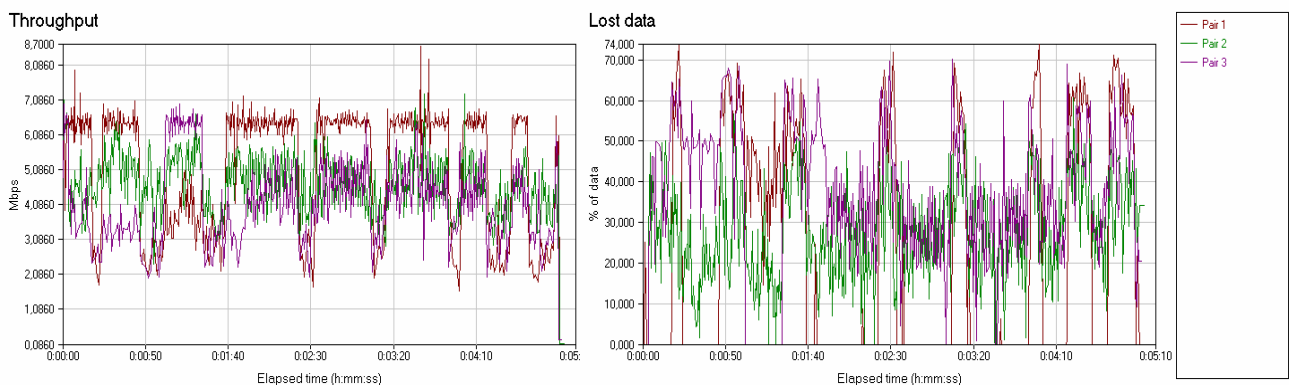


**Figura 5.** Testes com três classes com 3,3 Mbps cada – variação 1.



**Figura 6.** Testes com três classes com 3,3 Mbps cada – variação 5.

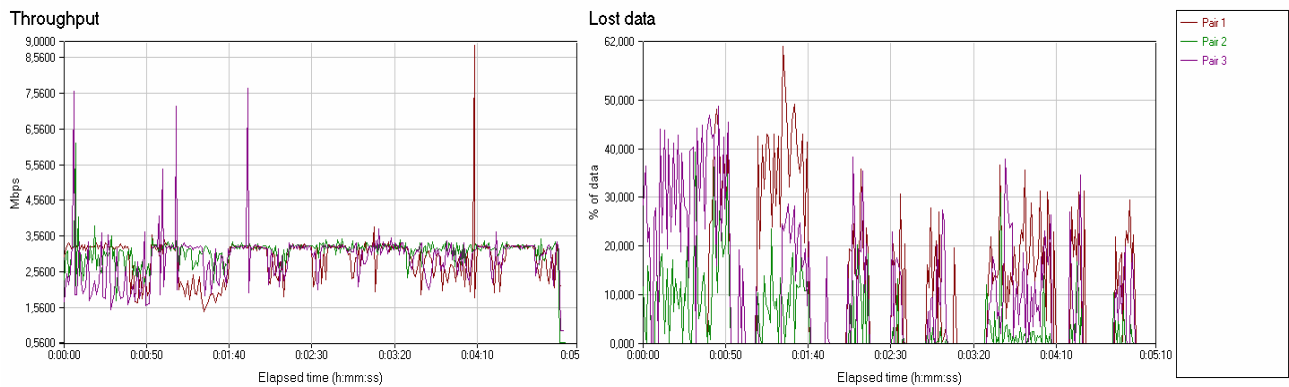
Nos gráficos seguintes estão representados os resultados obtidos quando é gerado tráfego de três classes a um débito de 6,6 Mbps em cada classe. A degradação de desempenho causada pela instabilidade encontra-se patente na Figura 7.



**Figura 7.** Testes com três classes com 6,6 Mbps cada – variação 1.

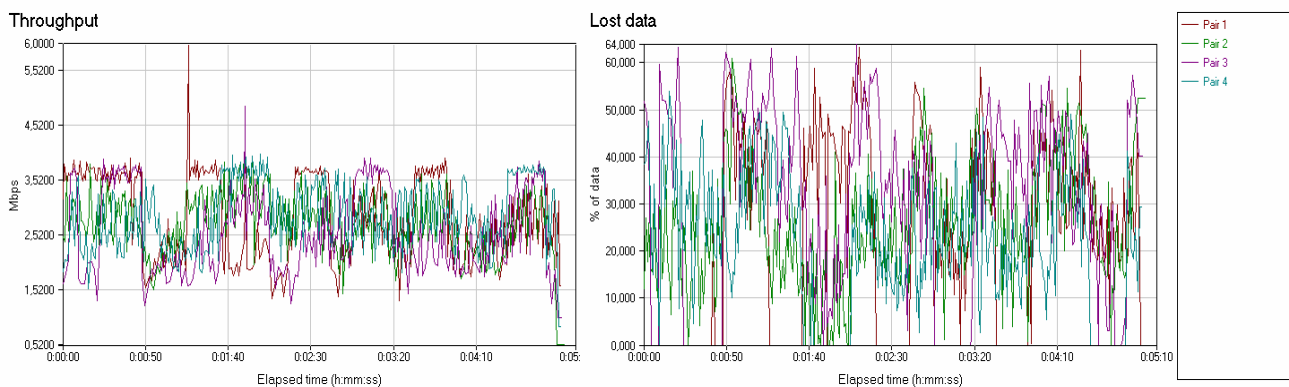
Pode verificar-se que a utilização do mecanismo de *class pinning* com um limiar de 50% leva à estabilização do sistema (Figura 8). No entanto, a situação de estabilidade atingida não é ótima pois são utilizados apenas dois dos três caminhos alternativos existentes. A classe menos prioritária utiliza um percurso enquanto as classes 2 e 3 partilham outro percurso. Este padrão de separação de tráfego é responsável pelo facto da classe menos prioritária manter um débito mais elevado que as outras

classes. A estabilidade é, deste modo, conseguida à custa da não exploração de novos percursos. Apesar deste comportamento pouco interessante, a diferenciação no percurso partilhado pelas classes 2 e 3 é feita correctamente pois a classe 2, sendo a classe com maior sensibilidade a perdas, apresenta menos perdas do que a classe 3.



**Figura 8.** Testes com três classes com 6,6 Mbps cada – variação 5.

Os resultados obtidos quando é gerado tráfego de quatro classes com um débito de 3,75 Mbps encontram-se expressos nas figuras seguintes. O protótipo estabiliza quando é utilizado um limiar de 50% no mecanismo de *class pinning*. Neste caso, as perdas de pacotes são praticamente inexistentes.



**Figura 9.** Testes com quatro classes com 3,75 Mbps cada – variação 3.



**Figura 10.** Testes com quatro classes com 3,75 Mbps cada – variação 5.

Nas experiências realizadas com quatro classes de tráfego, quando são gerados níveis de carga mais elevados, observou-se que o sistema leva mais tempo a estabilizar. Para cargas superiores a 7,5 Mbps, em cada classe, não é atingida a estabilidade do sistema. Esta situação deve-se ao facto de três das classes serem suficientes para ocupar os três percursos disponíveis com níveis já próximos do ponto de saturação das interfaces, ficando uma das classes permanentemente a “rodar” pelos três percursos, causando sempre saturação e degradação dos índices no percurso em que se encontra (o que a leva a mudar para um novo percurso). Situações deste tipo não podem, naturalmente, ser resolvidas ao nível do encaminhamento, sendo necessários mecanismos de controlo de admissão para prevenir a sua ocorrência [Lourenço2000].

## 6. Conclusões e Trabalho Futuro

Este artigo enquadra-se no trabalho que tem vindo a ser desenvolvido, no LCT, em torno da problemática do encaminhamento com QoS. Foi desenvolvida uma estratégia que suporta a diferenciação de tráfego de acordo com o paradigma de classes em que os percursos adequados a cada classe de tráfego são calculados com base numa métrica de QoS que reflecte o estado da rede em termos de atraso e perdas. Os mecanismos propostos foram implementados como extensões ao protocolo de encaminhamento OSPF.

Em trabalhos anteriores foi estudado o impacto da estratégia em termos de consumo de recursos de comunicação e de capacidade de processamento dos encaminhadores. Foram também afinados alguns parâmetros de configuração, nomeadamente o tamanho e os valores utilizados na janela, no cálculo da média móvel dos índices e os limiares de decisão para distribuição dos anúncios que descrevem o estado da rede.

Este artigo foi focado na avaliação da estabilidade da estratégia de encaminhamento QoS-LCT sendo considerada a dinâmica protocolar e o comportamento do tráfego suportado.

Relativamente à dinâmica protocolar, verificou-se que o número de classes activas e o aumento da carga na rede têm um impacto muito suave nos valores dos parâmetros observados. Em termos de comportamento do tráfego suportado verificou-se que o mecanismo de *class pinning* é eficiente na estabilização do tráfego em condições de carga baixa e média, mesmo com 4 classes presentes, garantindo diferenciação de tráfego e balanceamento de carga entre percursos alternativos. Em condições de carga elevada e com 4 classes activas concluiu-se pela insuficiência da estratégia proposta e pela necessidade de a complementar com mecanismos de controlo de admissão, para responder a situações de forte competição pelos recursos de comunicação.

Em trabalho futuro será realizado o estudo do comportamento do protótipo com padrões de tráfego mais variados e em cenários experimentais de área alargada. Os resultados obtidos com a experimentação do protótipo serão também complementados com resultados obtidos através de experiências de simulação, já em curso. Este novo conjunto de experiências permitirá avaliar a escalabilidade da estratégia proposta e a sua adequação a cenários reais, integrada com os restantes mecanismos de QoS para redes IP em desenvolvimento no LCT.

## Agradecimentos

Trabalho parcialmente financiado pelo programa de investigação POSI do Ministério da Ciência e Tecnologia (Projectos QoSII e IPQoS e bolsa de doutoramento BD/13723/97).

## Referências

[Blake1998] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies Nortel, W. Weiss, “An Architecture for Differentiated Services”, Internet Engineering Task Force, Request for Comments 2475, December 1998.

- [Braden1994] R. Braden, D. Clark, S. Shenker, “Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview”, Request For Comments 1633, Internet Engineering Task Force, Network Working Group, June 1994.
- [Guérin1999] R. Guérin, S. Kamat, A. Orda, T. Przygienda, D. Williams, QoS Routing Mechanisms and OSPF Extensions, Internet Engineering Task Force, RFC 2676, August 1999.
- [Lourenço2000] D. Lourenço, M. Oliveira, G. Quadros, E. Monteiro, “Definição do Mecanismo de Controlo de Admissão para o Modelo de Serviço do LCT-UC”, Actas da 3ª Conferência sobre Redes de Computadores – Tecnologias e Aplicações, CRC’2000, FCCN, Universidade de Aveiro, Viseu, Portugal, 16-17 de Novembro, 2000.
- [Ma1999] Q. Ma, P. Steenkiste, “Supporting Dynamic Inter-Class Resource Sharing: A Multi-Class QoS Routing Algorithm”, Proceedings of IEEE INFOCOM’99, March 1999.
- [Moy1998] J. Moy, “OSPF Version 2”, Internet Engineering Task Force, Network Working Group, Request For Comments 2328, April 1998.
- [Nahrstedt1998] S. Chen, K. Nahrstedt, “An Overview of Quality-of-Service Routing for the Next Generation High-Speed Networks: Problems and Solutions”, IEEE Network Magazine, Special Issue on Transmission and Distribution of Digital Video, 1998.
- [Oliveira2000] M. Oliveira, J. Brito, B. Melo, G. Quadros, E. Monteiro, “Quality of Service Routing in the Differentiated Services Framework”, Proceedings of SPIE’s International Symposium on Voice, Video, and Data Communications (Internet III: Quality of Service and Future Directions), Boston, Massachusetts, USA, November 5-8, 2000.
- [Oliveira2001] M. Oliveira, J. Brito, B. Melo, G. Quadros, E. Monteiro, “Evaluation of a Quality of Service Routing Strategy for the Differentiated Services Framework”, Proceedings of the 2001 International Conference on Internet Computing (IC’2001), Monte Carlo Resort, Las Vegas, Nevada, USA, June 25-28, 2001.
- [Quadros2000] G. Quadros, A. Alves, E. Monteiro, F. Boavida, “An Approach to Support Traffic Classes in IP Networks”, Proceedings of QoFIS’2000 – The First International Workshop on Quality of future Internet Services, Berlin, Germany, September 25-26, 2000.
- [Rosen2001] E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon “Multiprotocol Label Switching Architecture”, Internet Engineering Task Force, Request for Comments 3031, January 2001.
- [Shaikh1999] A. Shaikh, J. Rexford, K. Shin, “Load-Sensitive Routing of Long-Lived IP Flows”, Proceedings of ACM SIGCOMM’99.
- [Shaikh2000] A. Shaikh , A. Varma , Lampros Kalampoukas , Rohit Dube, “Routing stability in congested networks” ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Proceedings of the conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication August 2000.
- [Vutukury1999] S. Vutukury, J.J. Garcia-Luna-Aceves, “A Simple Approximation to Minimum-Delay Routing”, SIGCOMM’99.
- [Wang1990] Z. Wang, J. Crowcroft, “Shortest Path First with Emergency Exits”, Proceedings of ACM SIGCOMM’90, Philadelphia, USA, Sept. 1990.