

# Um Modelo de Encaminhamento Hierárquico Multi-Objectivo em Redes MPLS, com Duas Classes de Serviço

Rita Girão Silva <sup>a,c</sup>

(Tese de Doutoramento realizada sob supervisão de Professor Doutor José Craveirinha <sup>a,c</sup> e Professor Doutor João Clímaco <sup>b,c</sup>)



DEEC-FCTUC



FEUC



INESC-Coimbra

Jornadas do INESC-Coimbra  
Coimbra, Portugal, 25/Jun/09

# Resumo

1. Motivação
2. Modelo de encaminhamento
3. Generalidades sobre a abordagem heurística de resolução
4. Variantes heurísticas e meta-heurísticas
5. Aplicação do modelo e resultados experimentais
6. Conclusões e trabalho futuro

# 1. Motivação

## Encaminhamento em redes MPLS

- Nas redes multi-serviço actuais, há diferentes exigências de Qualidade de Serviço (QoS), com características muito heterogéneas, a considerar nos modelos de encaminhamento.
- Há vantagens potenciais na formulação dos problemas de encaminhamento em redes MPLS como problemas multi-objectivo.
- Em [Craveirinha *et al*,08], discute-se algumas questões de encaminhamento em redes MPLS a um nível conceptual e ao nível de modelos de encaminhamento.
- Um meta-modelo de encaminhamento multi-objectivo hierárquico formulado ao nível da rede é proposto em [Craveirinha *et al*,08].
- Este meta-modelo foi aplicado a redes MPLS com duas classes de serviço, QoS (tráfego de mais alta prioridade) e Best Effort (BE), que constitui o tráfego de mais baixa prioridade.

## 2. Modelo de Encaminhamento

Considera-se um modelo de encaminhamento multi-objectivo hierárquico formulado ao nível da rede:

- Modelo de encaminhamento multi-objectivo hierárquico
  - Primeiro nível: funções objectivo associadas ao tráfego QoS, formuladas ao nível global da rede
  - Segundo nível: métricas de médias de desempenho associadas aos diferentes serviços de tráfego QoS e objectivo ao nível global da rede para o tráfego BE (receita esperada)
- Objectivos de equidade explicitamente considerados em ambos os níveis de optimização
- Formulação multi-objectivo: Em cada nível, os objectivos são potencialmente conflituosos entre si.
- Formulação hierárquica: Ao avaliar cada um dos serviços, tenta-se optimizar as f.o. de 2º nível para esse serviço, estando sempre subjacente a optimização das f.o. de 1º nível, formuladas ao nível global da rede para os fluxos de mais alta prioridade.

## Modelo de encaminhamento

- Considera-se uma representação estocástica dos fluxos de tráfego associados a rotas explícitas, o que permite o cálculo de probabilidades de bloqueio para cada fluxo.
- As interacções entre todos os fluxos de tráfego são consideradas, apesar de se separar os objectivos QoS dos objectivos BE (estão até em níveis diferentes).
- Na rede, considera-se todo o tráfego existente, ao invés do que acontece habitualmente, em que se define redes virtuais para os fluxos QoS e para os fluxos BE.
- Formulação ao nível da rede: as f.o. para um determinado tipo de serviço dependem explicitamente de todos os fluxos na rede.
- Considera-se a possibilidade de encaminhamento alternativo, o que tende a ser vantajoso para as f.o. de 1<sup>o</sup> nível.

# Modelo de encaminhamento

## Problema P-M2-S2

### Primeiro nível (QoS – Objectivos de rede)

$\max_{\bar{R}} \{W_Q = \text{receita média total para o tráfego QoS}\}$

$\min_{\bar{R}} \{B_{Mm|Q} = \text{máxima probabilidade média de bloqueio para todos os serviços QoS}\}$  – objectivo de equidade na rede

### Segundo nível

#### (QoS – Objectivos de serviço)

$\min_{\bar{R}} \{B_{ms|Q} = \text{probabilidade média de bloqueio para os fluxos QoS de tipo } s\}, \forall s \in S_Q$

$\min_{\bar{R}} \{B_{Ms|Q} = \text{probabilidade máxima de bloqueio para os fluxos QoS de tipo } s\}, \forall s \in S_Q$  – objectivos de equidade para os serviços QoS

#### (BE – Objectivos de rede)

$\max_{\bar{R}} \{W_B = \text{receita média total para o tráfego BE}\}$

$$\text{com } W_Q = \sum_{s \in S_Q} A_s^c w_s \quad W_B = \sum_{s \in S_B} A_s^c w_s$$

$A_s^c$ : tráfego total transportado para o serviço  $s$

$w_s$ : receita média por cada  $\mu$ -fluxo ('chamada') do tipo  $s$

Todas as f.o. podem ser expressas em termos do tráfego oferecido por todos os fluxos  $f_s$ ,  $A(f_s)$  ( $s \in S_Q \cup S_B$ ) e as probabilidades de bloqueio ponto-a-ponto correspondentes,  $B(f_s)$ . Os valores de  $B(f_s)$  são calculados com base num sistema multidimensional de Erlang, utilizando o conceito de largura de banda efectiva.

$$B_{ms|Q} = \frac{1}{A_s^o} \sum_{f_s \in F_s} A(f_s) B(f_s)$$

$$B_{Ms|Q} = \max_{f_s \in F_s} \{B(f_s)\}$$

$$B_{Mm|Q} = \max_{s \in S_Q} \{B_{ms}\}$$

## Modelo de encaminhamento

- O problema de encaminhamento hierárquico multi-objectivo alternativo aqui considerado é de difícil tratamento, pois:
  - é bastante ‘complexo’ devido às interdependências entre todas as f.o. (expressas no cálculo de  $B(f_s)$ );
  - é NP-completo.
- As f.o. em P-M2-S2 são potencialmente conflituosas. Em particular, no 1<sup>o</sup> nível, a maximização de  $W_Q$  pode levar a uma deterioração de  $B(f_s)$ ,  $s \in S_Q$ , para os fluxos de tráfego de “pequena” intensidade  $A(f_s)$ , o que leva a uma tendência de aumento de  $B_{M_s|Q}$  e, conseqüentemente,  $B_{M_m|Q}$ .

## 3. Generalidades Sobre a Abordagem

### Heurística de Resolução

- As heurísticas desenvolvidas para o problema P-M2-S2 baseiam-se no cálculo de soluções para um problema auxiliar de c.m.c. bi-objectivo. As métricas a minimizar são os custos implícitos marginais e as probabilidades de bloqueio.
- Ao minimizar a probabilidade de bloqueio, tende-se a minimizar as probabilidades máximas de bloqueio ponto-a-ponto  $B(f_s)$ . Ao minimizar os custos implícitos, tende-se a maximizar a receita média total  $W_T$ . Assim, estas duas métricas são potencialmente conflituosas.
- Os custos implícitos marginais associados ao tráfego QoS (BE),  $c_{ku}^{Q(B)}$ , resultantes da aceitação dum chamada do fluxo  $f_u$  no arco  $l_k$  podem ser definidos como o valor médio de perda de receita em todo os fluxos de tráfego na rede que podem usar o arco  $l_k$ , devido à diminuição da capacidade disponível nesse arco. Assim, esta métrica permite medir o efeito de aceitação dum chamada na rede sobre todos os fluxos de tráfego.

## Generalidades sobre a abordagem heurística de resolução

- O problema auxiliar de c.m.c. bi-objectivo tem duas configurações possíveis, consoante se pretende melhorar a receita do tráfego QoS ou do tráfego BE.

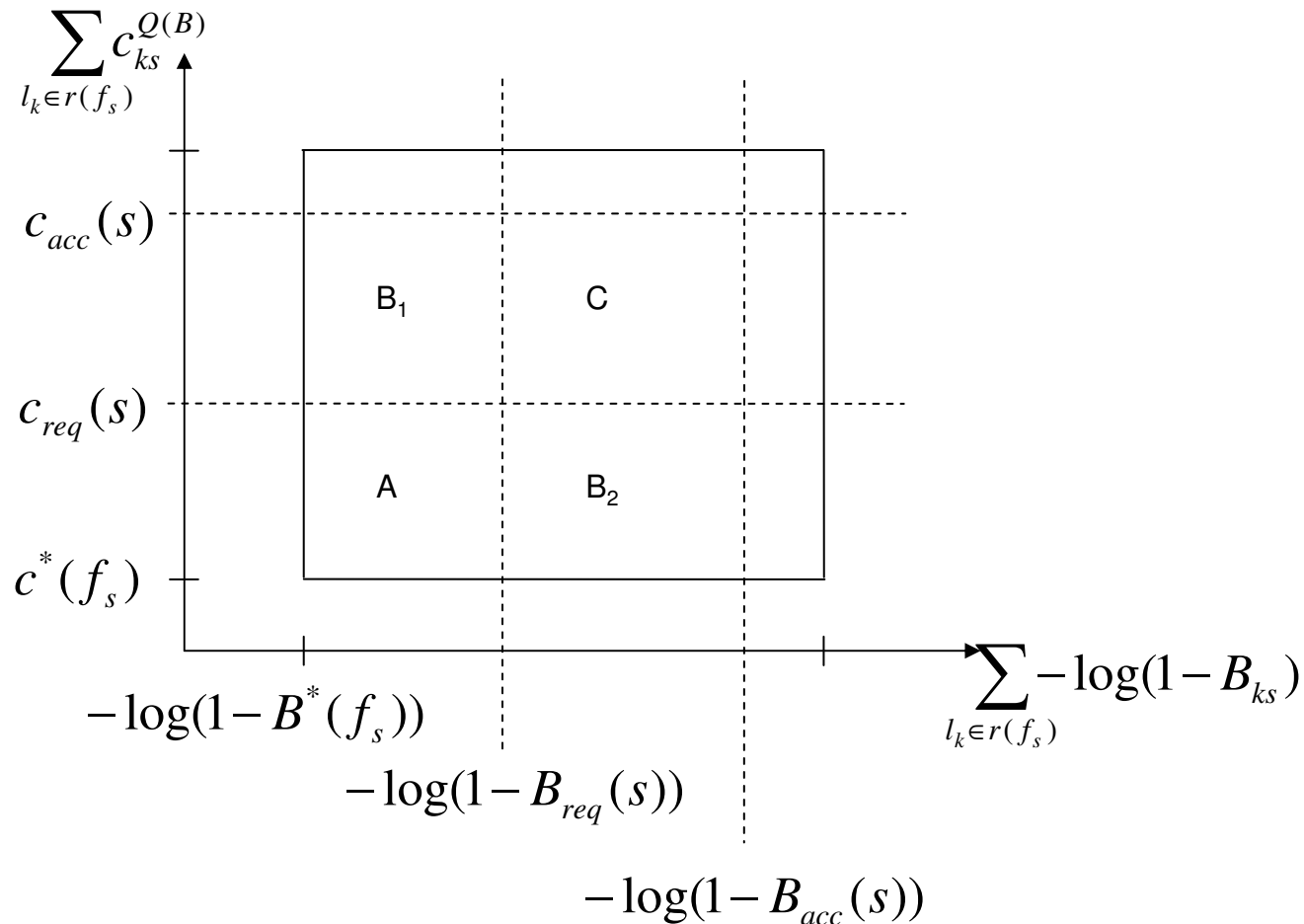
$$\min_{r(f_s) \in \mathcal{D}(f_s)} \left\{ \begin{array}{l} \text{Problema } \mathcal{P}^{(2)} \\ m^n(r(f_s)) = \sum_{l_k \in r(f_s)} m_{ks}^n \end{array} \right\}_{n=1;2}$$

$m_{ks}^1 = c_{ks}^{Q(B)}$ ;  $m_{ks}^2 = -\log(1 - B_{ks})$ ;  $\mathcal{D}(f_s)$  é o conjunto de caminhos admissíveis para cada fluxo  $f_s$ , resultante de restrições de engenharia de tráfego.

- O procedimento para pesquisa e selecção dos caminhos a ser usados pelas chamadas de cada fluxo de tráfego combina uma soma ponderada das duas f.o.  $m_{ks}^1$  e  $m_{ks}^2$  e a definição de regiões de prioridade obtidas a partir de limiares de preferência relacionados com valores aceitáveis e requeridos para cada f.o.
- Note-se que a métrica ponderada é usada apenas para a geração de soluções! A selecção de soluções é feita com base nas regiões de preferência em que as soluções se encontram.
- Define-se um conjunto de procedimentos para auxílio à selecção de soluções.

## Generalidades sobre a abordagem heurística de resolução

$$\min_{r(f_s) \in \mathcal{D}(f_s)} \left\{ \sum_{l_k \in r(f_s)} \left( \epsilon_1^{Q(B)}(s) (-\log(1 - B_{ks})) + \epsilon_2^{Q(B)}(s) c_{ks}^{Q(B)} \right) \right\}$$



## 4. Variantes Heurísticas e Meta-Heurísticas

- Diferentes variantes heurísticas foram implementadas para resolver o problema de encaminhamento hierárquico multi-objectivo:
  - MOR-S2 (*Multi-Objective Routing considering 2 classes of Service*), descrita em [Craveirinha *et al*,07], é uma adaptação dum algoritmo heurístico proposto para resolver um problema mais simples do que P-M2-S2 pois não incluía tráfego de diferentes classes de serviço.
  - HMOR-S2 (*Hierarchical Multi-Objective Routing considering 2 classes of Service*), descrita em [Girão-Silva *et al*,09], usa a mesma abordagem metodológica de MOR-S2, mas contém algumas adaptações específicas ao problema em causa, permitindo obter melhores resultados.
- Em [Girão-Silva *et al*,08], descreve-se a análise de sensibilidade que foi feita à heurística de base HMOR-S2. Verificou-se a HMOR-S2 tratava as f.o. de 1º e 2º nível de forma equilibrada. No entanto, verificou-se também que era possível encontrar soluções com melhores valores para as f.o. de 1º nível, do que os obtidos com a HMOR-S2.

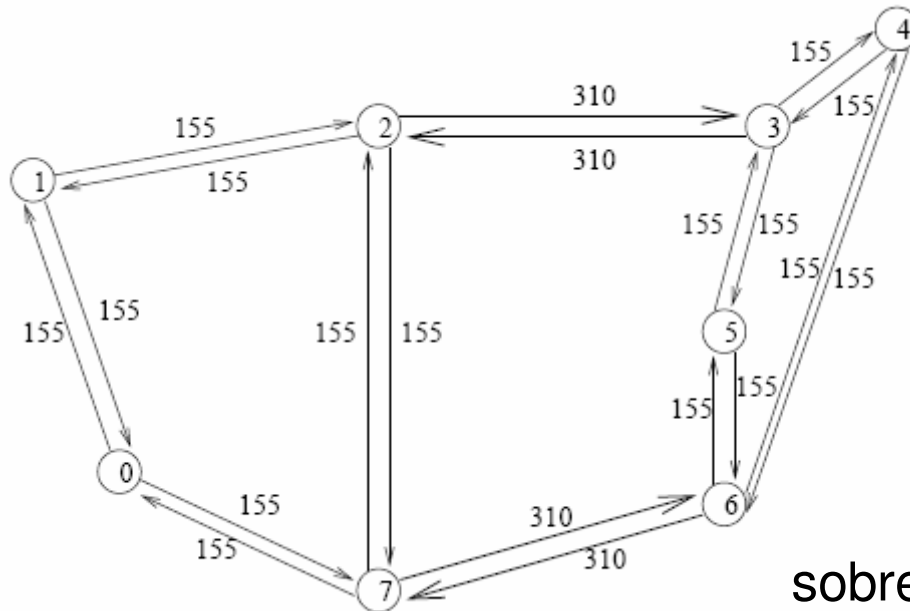
## Variantes heurísticas e meta-heurísticas

- Diferentes técnicas foram introduzidas na heurística de base para tentar encontrar essas soluções:
  - HMOR-S2<sub>R</sub> (*HMOR-S2 with a floating Relaxation*) e HMOR-S2<sub>L</sub> (*HMOR-S2 with a floating barrier or Limit*), descritas em [Girão-Silva *et al*,08], em que se impõe uma relaxação ou uma barreira flutuante ao valor de uma das f.o. de 1º nível. Com a relaxação(barreira), permite-se(exige-se) que o valor da f.o. de 1º nível em causa piore(melhore) um certo valor percentual (em função do seu valor corrente).
  - Em [Girão-Silva *et al*,09a], propõe-se duas variantes, HMOR-S2<sub>SA</sub> e HMOR-S2<sub>TS</sub>, em que se introduziu características típicas das meta-heurísticas *Simulated Annealing* e *Tabu Search* na heurística de base.
  - Em [Girão-Silva *et al*,09b], propõe-se a variante HMOR-S2<sub>PAS</sub> (*HMOR-S2 with a Pareto Archived Strategy*) em que se introduziu um arquivo de soluções não-dominadas encontradas ao longo da execução da heurística, mas que devido à extrema exigência da heurística para a aceitação de novas soluções, não foram consideradas como novas soluções do problema.
- Em [Girão-Silva,08], propõe-se a variante HMOR-S2-LS (*HMOR-S2 with Load Sharing*), que não permitiu obter resultados relevantes.

## 5. Aplicação do Modelo

- A heurística base e as suas variantes foram aplicadas a uma rede usada num caso de estudo (ver [Mitra *et al*,01]), em que se considera encaminhamento em redes MPLS para duas classes de serviço.
- Neste caso de estudo, considera-se um modelo de encaminhamento em redes MPLS, formulado como uma optimização lexicográfica, baseada em MCFs (*Multicommodity Flows*). A representação dos fluxos de tráfego é determinística. Faz-se divisão de tráfego (*traffic splitting*) e controlo de acesso para o tráfego BE.
- As f.o. a optimizar são as receitas  $W_Q$  e  $W_B$ . Tenta-se maximizar a receita para os fluxos BE, mantendo o valor óptimo obtido para a receita dos fluxos QoS.
- Inicialmente, numa primeira fase, define-se um modelo determinístico de optimização. Considerando só o tráfego QoS na rede, verifica-se qual será a capacidade residual da rede. Posteriormente, considera-se o tráfego BE, que é oferecido a esta rede residual. Só parte deste tráfego é admitida à rede.
- Numa segunda fase, adapta-se o modelo determinístico a um ambiente estocástico, mantendo invariantes as relações de intensidade de tráfego. Esta adaptação é feita para 3 matrizes de tráfego distintas.
- Com este modelo de referência, obtém-se valores óptimos para a receita dos fluxos QoS, que podem ser considerados limites máximos para os valores de  $W_Q$  obtidos com a heurística.

## Aplicação do modelo



Rede de teste, com informação sobre as capacidades dos arcos [Mbps]

Service	Class	$d'_s$ [kbps]	$d_s$ [channels]	$w_s$	$h_s$ [s]	$D_s$ [arcs]	$m_s$
0 - video	QoS	640	40	40	600	3	0.1
1 - Premium data	QoS	384	24	24	300	4	0.25
2 - voice	QoS	16	1	1	60	3	0.4
3 - data	BE	384	24	24	300	7	0.25

Características dos serviços na rede de teste

## Resultados experimentais

- Estudo analítico: Considerou-se dois tipos de testes:
  - testes (i), em que a solução inicial é a solução tipicamente utilizada nos algoritmos convencionais de Internet: apenas caminhos de primeira escolha, c.m.c.;
  - testes (f), em que a solução inicial é a solução obtida após a execução da heurística base. Estes testes só foram realizados para algumas das variantes e têm por objectivo verificar até que ponto essas variantes conseguem melhorar a solução final obtida com a HMOR-S2.
- Estudo simulacional: Considerou-se uma plataforma de simulação estocástica por acontecimentos discretos. É possível avaliar os resultados num ambiente estocástico mais próximo das condições reais de funcionamento numa rede.
  - Método de encaminhamento estático: o plano de encaminhamento em cada simulação não muda ao longo da simulação. É o plano de encaminhamento obtido após os testes (i) ou (f) para cada variante.
  - Método de encaminhamento dinâmico periódico e dependente do estado. A informação recolhida por avaliação periódica do estado da rede é usada para uma escolha periódica dos caminhos na rede.
  - Resultados de simulação: valor médio  $\pm$  semi-intervalo de confiança a 95%

# Alguns resultados experimentais

## Estudo analítico

Func. Obj. 1º nível	Solução inicial	Solução final									
		MOR-S2	HMOR-S2 (Base)	HMOR-S2 <sub>L-ΔW</sub> - Teste(i)		HMOR-S2 <sub>SA</sub>		HMOR-S2 <sub>TS</sub>		HMOR-S2 <sub>PAS</sub>	
				ΔW = 0.5%	ΔW = 0.3%	Teste(i)	Teste(f)	Teste(i)	Teste(f)	Teste(i)	Teste(f)
$\alpha = 0.0$											
$W_Q$	54803.69	64330.56	64731.51	64805.18	64667.80	64517.97	64795.66	64619.61	64915.35	64848.17	64905.26
$B_{Mm Q}$	0.413	0.135	0.0898	0.0831	0.0937	0.107	0.0843	0.116	0.0731	0.0803	0.0752
$\alpha = 0.5$											
$W_Q$	51785.21	60097.78	60569.09	60118.00	60659.66	60569.09	60724.32	60162.90	60751.77	60694.00	60727.32
$B_{Mm Q}$	0.413	0.0962	0.0424	0.0954	0.0343	0.0424	0.0289	0.0805	0.0258	0.0311	0.0271
$\alpha = 1.0$											
$W_Q$	49010.41	55978.80	56100.60	56229.80	56240.59	56100.60	56100.60	56191.34	56109.97	56106.78	56106.88
$B_{Mm Q}$	0.405	0.0582	0.0263	0.0123	0.0158	0.0263	0.0263	0.0179	0.0252	0.0257	0.0257

Valores das f.o. de 1º nível para as soluções iniciais e finais da heurística HMOR-S2 e algumas variantes

- As soluções finais obtidas têm valores de f.o. de 1º nível melhores do que os obtidos com o plano de encaminhamento típico das redes Internet (solução inicial), para todos os valores de  $\alpha$ .
- Considerando a heurística HMOR-S2 como base, verifica-se que muitas das variantes permitem melhorar os valores das f.o. de 1º nível.
- Comparando os resultados da heurística base com os obtidos em [Mitra *et al*,01], verifica-se que as receitas  $W_Q$  representam cerca de 99.5% dos valores óptimos.
- A utilização das variantes numa segunda fase da execução, isto é, após a execução da heurística base numa primeira fase (versão (f)), permite a melhoria de resultados para as f.o. de 1º nível, para todos os valores de  $\alpha$ . Refira-se no entanto que a melhoria é muito ligeira para  $\alpha=1.0$ .

# Alguns resultados experimentais

## Estudo simulacional

	F.O. 1º nível	$\alpha = 0.0$		$\alpha = 0.5$		$\alpha = 1.0$	
		Modelo estático	Modelo dinâmico	Modelo estático	Modelo dinâmico	Modelo estático	Modelo dinâmico
HMOR-S2 (Base)	$W_Q$	64642.53±64.17	64728.91±70.22	60491.22±50.79	60637.17±60.26	56027.72±46.92	56027.98±62.17
	$B_{Mm Q}$	0.0887±0.00336	0.0796±0.00347	0.0460±0.00163	0.0328±0.00162	0.0281±0.00126	0.0282±0.00187
HMOR-S2 <sub>L</sub> $\Delta W = 0.5\%$	$W_Q$	64697.18±55.99	64697.18±55.99	60031.57±43.87	60398.09±209.82	56193.05±52.91	56193.05±52.91
	$B_{Mm Q}$	0.0840±0.00247	0.0840±0.00247	0.0979±0.00143	0.0488±0.00129	0.0144±0.000915	0.0144±0.000915
HMOR-S2 <sub>L</sub> $\Delta W = 0.3\%$	$W_Q$	64563.55±60.49	64563.55±60.49	60579.06±57.01	60579.06±57.01	56231.31±55.75	56231.31±55.75
	$B_{Mm Q}$	0.0928±0.00314	0.0928±0.00314	0.0384±0.00127	0.0384±0.00127	0.0162±0.000661	0.0162±0.000661
HMOR-S2 <sub>SA</sub> Teste(f)	$W_Q$	64704.03±72.85		60655.12±60.57		56027.72±46.92	
	$B_{Mm Q}$	0.0830±0.00389		0.0320±0.00162		0.0281±0.00126	
HMOR-S2 <sub>TS</sub> Teste(f)	$W_Q$	64781.55±67.82		60655.33±57.72		56038.54±47.33	
	$B_{Mm Q}$	0.0749±0.00316		0.0308±0.00104		0.0269±0.00126	
HMOR-S2 <sub>PAS</sub> Teste(i)	$W_Q$	64733.71±63.18		60606.56±57.00		56035.09±47.22	
	$B_{Mm Q}$	0.0811±0.00299		0.0356±0.00145		0.0276±0.000989	
HMOR-S2 <sub>PAS</sub> Teste(f)	$W_Q$	64774.12±68.28		60638.91±59.39		56035.92±47.35	
	$B_{Mm Q}$	0.0773±0.00356		0.0318±0.00127		0.0277±0.000986	

Valores médios e intervalos de confiança a 95% para as f.o. de 1º nível para a HMOR-S2 e algumas variantes

- Na maioria das situações, os resultados analíticos estão fora do intervalo de confiança a 95%, quer para o modelo estático quer para o modelo dinâmico. No entanto, os resultados são muito próximos.
- Os resultados analíticos tendem a ser melhores que os resultados simulacionais correspondentes.

## Alguns resultados experimentais

### Estudo simulacional

- Para a heurística base, os intervalos de confiança a 95% obtidos com o modelo dinâmico incluem ou são melhores que o valor analítico correspondente para  $\alpha=0.0; 0.5$ . Nestas situações de carga mais elevada, o modelo dinâmico é capaz de obter resultados que ultrapassam os resultados antecipados pelo modelo analítico.
- As diferenças entre os resultados analíticos e os resultados simulacionais devem-se essencialmente a imprecisões intrínsecas à resolução analítico-numérica, em particular no que se refere a simplificações do modelo de tráfego (que tendem a sub-estimar as probabilidades de bloqueio na rede) e da propagação do erro associado.
- O modelo de simulação por acontecimentos discretos confirma a validade dos resultados analíticos, já que as discrepâncias obtidas nos resultados numéricos não afectam os valores relativos das f.o.
  - Refira-se que ao longo do procedimento de optimização do encaminhamento o que é importante é comparar diferentes soluções de encaminhamento com o mesmo modelo de tráfego, e não obter valores muito precisos para as f.o.
- Os resultados médios obtidos com o modelo dinâmico são melhores ou iguais aos resultados médios obtidos com o modelo estático.

## 6. Conclusões e Trabalho Futuro

- Apresentou-se um modelo de encaminhamento hierárquico bi-nível multi-objectivo em redes MPLS, com duas classes de serviço (com diferente prioridade) e diferentes tipos de serviço em cada classe.
- Propôs-se diferentes heurísticas e meta-heurísticas para resolução do problema de encaminhamento associado. Consegiu obter-se “boas” soluções de compromisso para este problema, quando comparadas com as soluções do modelo usado como *benchmarking*.
- Obteve-se resultados analíticos e também resultados simulacionais, considerando uma plataforma de simulação estocástica por acontecimentos discretos, que permite um ambiente estocástico mais próximo das condições reais de funcionamento numa rede.
- Os resultados simulacionais foram em linha com o esperado.
- A principal limitação destas abordagens de resolução é o custo computacional, que é elevado. Assim, este método de encaminhamento está restrito a redes com número limitado de nós do tipo metro-core.
- Trabalho futuro:
  - Aplicação de divisão de tráfego;
  - Exploração doutras técnicas meta-heurísticas, em particular, algoritmos genéticos;
  - Aplicação das heurísticas e variantes a outras redes.

## Referências

- [Craveirinha *et al*,07] J. Craveirinha, R. Girão-Silva, J. Clímaco, L. Martins. A hierarchical multiobjective routing model for MPLS networks with two service classes – Analysis and resolution approach. Research Report 5/2007, INESC-Coimbra, Oct. 2007. (A shorter version will be published at the Post-Conference Proceedings of the *23rd IFIP TC7 Conference on System Modelling and Optimization* (Cracow, Poland, Jul. 23-27, 2007), Springer, 2009.)
- [Craveirinha *et al*,08] J. Craveirinha, R. Girão-Silva, J. Clímaco. A meta-model for multiobjective routing in MPLS networks. *Central European Journal of Operations Research*, 16(1):79-105, Mar. 2008.
- [Girão-Silva *et al*,08] R. Girão-Silva, J. Craveirinha, J. Clímaco. Hierarchical multiobjective routing in MPLS networks with two service classes – Heuristic resolution and sensitivity analysis. Research Report 8/2008, INESC-Coimbra, Jul. 2008.
- [Girão-Silva,08] R. Girão-Silva. Um modelo de encaminhamento hierárquico multi-objectivo em redes MPLS, com duas classes de serviço. Tese PhD, FCTUC, Coimbra, Dec. 2008.
- [Girão-Silva *et al*,09] R. Girão-Silva, J. Craveirinha, J. Clímaco. Hierarchical multiobjective routing in MPLS networks with two service classes – A heuristic solution. *International Transactions in Operational Research*, 16(3):275-305, May 2009.
- [Girão-Silva *et al*,09a] R. Girão-Silva, J. Craveirinha, J. Clímaco. Hierarchical multiobjective routing in MPLS networks with two service classes – A meta-heuristic solution. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 3, 2009.
- [Girão-Silva *et al*,09b] R. Girão-Silva, J. Craveirinha, J. Clímaco. Hierarchical multiobjective routing in MPLS networks with two service classes – Report on a Pareto Archived Strategy. Research Report (Draft version), INESC-Coimbra, 2009. (A shorter version will be presented at the *8th International Conference on Decision Support for Telecommunications and Information Society (DSTIS 2009)*, Coimbra, Portugal, Sep. 4-7, 2009.)
- [Mitra *et al*,01] D. Mitra, K. G. Ramakrishnan. Techniques for traffic engineering of multiservice, multipriority networks. *Bell Labs Technical Journal*, 6(1):139-151, Jan. 2001.