

Implementação e Desempenho de um Novo Algoritmo de Encaminhamento Multiobjectivo – MODR-2

by

Lúcia Martins

José Craveirinha

Teresa Gomes

João N. Clímaco

INESC - COIMBRA

Research Report ET-N8-4
Setembro 2001

Work supported by FCT, project PRAXIS/P/EEI/13219/1998, *Um estudo sobre encaminhamento dinâmico multi-objectivo e dependente do estado em redes multi-serviço*

Implementação e Desempenho de um Novo Algoritmo de Encaminhamento Multiobjectivo – MODR-2

Lúcia Martins^{1,3}, José Craveirinha^{1,3}, Teresa Gomes^{1,3},
João N. Clímaco^{2,3}

¹ Departamento de Engenharia Electrotécnica,
Pólo II da Universidade de Coimbra,
Pinhal de Marrocos, 3030 COIMBRA, Portugal.
tel:+351 239 79 62 51; fax: +351 239 79 62 47

² Faculdade de Economia,
Universidade de Coimbra,
Av. Dias da Silva 3000 COIMBRA, Portugal.
tel:+351 239 79 05 95

³ INESC-Coimbra, Rua Antero de Quental 199,
3000-033 COIMBRA, Portugal.
tel:+351 239 83 26 89

e-mail: jcrav@dee.uc.pt, lucia@dee.uc.pt, teresa@dee.uc.pt
ch@dee.uc.pt, jclimaco@fe.uc.pt

Resumo

Pretende-se analisar o desempenho do método MODR (Multiple Objective Dynamic Routing method) em redes completamente emalhadas e para várias sobrecargas de tráfego oferecido ponto-a-ponto. As medidas de desempenho global da rede usadas foram a média do tráfego total transportado na rede e um parâmetro de variação dos bloqueios ponto-a-ponto, medidas estas que resultam naturalmente do modelo biobjectivo subjacente ao método de encaminhamento em causa. Estudos analíticos prévios permitiram ainda adequar o método ao seu eficaz funcionamento em redes completamente emalhadas, tendo resultado assim uma nova versão do método – MODR-2.

Palavras Chave: Encaminhamento Dinâmico Multiobjectivo, bloqueio e custos implícitos.

1 Introdução

A avaliação de desempenho do método de encaminhamento MODR (Multiple Objective Dynamic Routing method) em redes completamente emalhasadas foi feita inicialmente com base num estudo analítico em redes dimensionadas para o efeito, tal como adiante se expõe, e ainda na rede descrita em [7]. Nesse estudo o objectivo foi verificar a evolução da média do tráfego total transportado na rede e de uma medida da variação máxima dos bloqueios ponto-a-ponto, quando os caminhos existentes, em regime estacionário, são sucessivamente substituídos pelos determinados pelo MMRA (Modified Multiobjective Routing Algorithm) [2].

As medidas referidas de QoS da rede resultam naturalmente do modelo bi-objectivo subjacente ao MMRA, dado que, neste método de procura de caminhos, a métrica custos implícitos [5] tende a maximizar o tráfego médio total transportado na rede e a métrica bloqueio nos feixes tende a equilibrar os bloqueios ponto-a-ponto não deixando acentuar assimetrias de bloqueio para alguns fluxos na rede face a outros, como adiante se ilustra.

A aplicação directa do método MODR, i.e., a determinação dos “melhores” caminhos alternativos de compromisso de acordo com os critérios utilizados no MMRA para todos os pares origem-destino (O-D) em função de um determinado estado da rede (o qual é caracterizado pelos bloqueios de todos os feixes e pelos respectivos custos implícitos) conduz a a que determinados feixes ou percursos, que à partida eram os “melhores” candidatos de acordo com os critérios MMRA vão ficar, no período de actualização seguinte, “piores”, logo que sejam escolhidos para caminhos de muitos pares O-D. Esta questão, que gera potencial instabilidade e/ou ineficiência na qualidade das soluções escolhidas, em termos do desempenho global da rede, resulta da natureza discreta do problema do encaminhamento e das interdependências entre os custos implícitos, os bloqueios e os caminhos seleccionados. Este comportamento conduz,

tipicamente, a situações em que os caminhos calculados pelo sistema de controlo de encaminhamento fiquem a oscilar entre dois conjuntos, onde, num período de actualização de caminhos vão existir alguns feixes ocupados com muitos caminhos e outros feixes muito pouco ocupados (sendo estes tipicamente os feixes que constituem os caminhos directos dado que estes são fixos), e no período de actualização seguinte troquem entre si os feixes mais ocupados com os menos ocupados. A ilustração deste comportamento é igualmente apresentada neste estudo.

A primeira aproximação utilizada para ultrapassar este problema foi calcular apenas um novo caminho alternativo para um dado par de nós, em cada período de actualização de caminhos, em função do correspondente estado da rede. Em termos de estudo analítico este método deu melhores resultados que a formulação inicial do MODR, como se pode verificar a seguir, embora seja uma solução de aplicação prática questionável num ambiente de encaminhamento dinâmico dado que tem um tempo de convergência relativamente grande e por conseguinte não seria capaz de responder eficazmente a flutuações rápidas no tráfego oferecido à rede.

Finalmente desenvolveu-se uma solução intermédia, traduzida num algoritmo heurístico onde, em que em cada período de actualização dos caminhos apenas os “piores” caminhos alternativos, escolhidos de acordo com certos critérios, vão ser actualizados. Esta nova versão do método será designada de MODR-2.

Este relatório está organizado da seguinte forma. Na secção 2 são descritas as redes que serviram de base ao estudo analítico efectuado e ilustra-se o desempenho do MODR na versão inicial. Na secção 3 é descrito o MODR-2 e é feita a análise do seu desempenho para a rede de teste, bem como a comparação com o desempenho do método RTNR.

2 Análise de Desempenho do MODR

O estudo analítico inicial baseou-se no estudo do comportamento do MODR em regime estacionário, tendo em vista a análise da média do tráfego total transportado na rede quando os

caminhos alternativos determinados pelo processo de dimensionamento da rede, baseado em [1], são sucessivamente substituídos pelos determinados pelo MMRA [3]. O modelo utilizado inicialmente na análise do comportamento do MODR em condições estacionárias quanto ao tráfego oferecido tem um diagrama de cálculo representado na figura 1. Notar que neste modelo inicial a fase de determinação de novos caminhos através do MMRA é executada para todos os pares de nós em cada iteração. Embora esta análise inicial pareça parcial dado que temos na base da escolha dos caminhos um modelo bi-objectivo, o objectivo era sobretudo perceber como a escolha dos caminhos ia evoluindo quando a sequência de cálculos realizados é a descrita na figura 1, sendo o tráfego transportado médio na rede um indicador importante nessa análise.

Foram inicialmente usadas duas redes. Ambas são redes com 6 nós, completamente emalhadas e dimensionadas através do método [1]. Este método permite a determinação de vários caminhos alternativos e das capacidades nos feixes em função de mais do que uma matriz de tráfego oferecido ponto-a-ponto. A intenção que esteve por detrás da utilização deste método não foi a de utilizá-lo explorando todas as suas potencialidades, mas apenas para obter um dimensionamento razoável de uma rede completamente emalhada, em função apenas de uma matriz de tráfego, com vista à sua utilização num ambiente de encaminhamento fixo com apenas um caminho alternativo entre cada par de nós.

A primeira rede (rede A) está descrita na tabela 1. A segunda rede (designada de rede B) usou o tráfego oferecido ponto-a-ponto da rede descrita em [7] embora, como apenas se pretendia um caminho alternativo, a capacidade dos feixes e os caminhos alternativos tivessem sido agora calculados pelo processo de dimensionamento já citado. Posteriormente, foi ainda usada esta rede[7], especificada em termos de tráfego oferecido e capacidades de feixes mas apenas com o primeiro caminho alternativo para cada par de nós, adiante designada como rede de Mitra. Neste estudo analítico do método de encaminhamento MODR apenas se considerou a existência de um caminho alternativo pelo que, nos estudos realizados, nunca foram considerados os 2^{os}

caminhos alternativos definidos em [7].

| Par O-D | Capac. Fxs | Tráf. Oferec. | Nó Intermédio |
|---------|------------|---------------|---------------|
| 1-2 | 36 | 27 | 3 |
| 1-3 | 13 | 6 | 4 |
| 1-4 | 33 | 25 | 5 |
| 1-5 | 27 | 20 | 6 |
| 1-6 | 31 | 20 | 2 |
| 2-3 | 29 | 25 | 4 |
| 2-4 | 17 | 10 | 5 |
| 2-5 | 37 | 30 | 6 |
| 2-6 | 25 | 20 | 1 |
| 3-4 | 17 | 11 | 5 |
| 3-5 | 14 | 8 | 6 |
| 3-6 | 19 | 13 | 1 |
| 4-5 | 13 | 9 | 6 |
| 4-6 | 27 | 20 | 1 |
| 6-6 | 18 | 12 | 1 |

Tabela 1: Rede A

Como se desconhecia à partida se o modelo de cálculo seguido “convergiria” para uma solução, i. e., se se fixaria num conjunto de caminhos não foi implementado nenhum critério de paragem, antes foi realizado um número pré-definido de iterações que depois permitiram analisar, para cada caso testado, a forma como os cálculos iam evoluindo. Esse número de iterações foi ajustado para cada caso.

O cálculo do tráfego transportado ponto-a-ponto foi feito admitindo a simplificação dos valores de bloqueio nos feixes serem estatisticamente independentes (uns dos outros) e dos diferentes caminhos entre o mesmo par origem-destino (O-D) não terem feixes em comum. Então, a probabilidade de bloqueio num caminho $r^i(f)$ (para $i = 1, 2, \dots$) é dado por:

$$L_{r^i(f)} = 1 - \prod_{l_k \in r^i(f)} (1 - B_k) \quad (1)$$

sendo B_k o bloqueio (congestão de chamadas) no feixe l_k .

| Par O-D | Capac. Fxs | Tráf. Oferec. | Nó Intermédio |
|---------|------------|---------------|---------------|
| 1-2 | 41 | 27.47 | 3 |
| 1-3 | 13 | 6.97 | 4 |
| 1-4 | 276 | 257.81 | 5 |
| 1-5 | 33 | 20.47 | 6 |
| 1-6 | 45 | 29.11 | 2 |
| 2-3 | 29 | 25.11 | 4 |
| 2-4 | 112 | 101.61 | 5 |
| 2-5 | 88 | 76.78 | 6 |
| 2-6 | 94 | 82.56 | 1 |
| 3-4 | 18 | 11.92 | 5 |
| 3-5 | 11 | 6.86 | 6 |
| 3-6 | 21 | 13.25 | 1 |
| 4-5 | 87 | 79.42 | 6 |
| 4-6 | 94 | 83.0 | 1 |
| 6-6 | 137 | 127.11 | 1 |

Tabela 2: Rede B

O tráfego transportado total para cada par O-D (e para $i = 1, 2$)

é dado por:

$$\begin{aligned}
 \hat{A}_{pp}(f) &= A_{pp}(f) (1 - L_{r^1}(f)) + A_{pp}(f) L_{r^1}(f) (1 - L_{r^2}(f)) \\
 &= I(f) * h [1 - L_{r^1}(f) L_{r^2}(f)], \quad \text{com } h = 1 \text{ vem,} \\
 &= I(f) [1 - L_{r^1}(f) L_{r^2}(f)]
 \end{aligned} \tag{2}$$

em que $A_{pp}(f) = I(f) * h$ é a média de tráfego (em Erlangs) oferecido pelo fluxo f à rede, $I(f)$ é a intensidade de chegadas e h a duração média das chamadas desse fluxo.

Os resultados deste primeiro estudo analítico estão assinalados, para a rede A, na figura 2 e para a rede B na figura 3, pelos pontos legendados “MODR”. O significado destes pontos é o seguinte: ao fim de algumas iterações, em geral um número inferior a 10, os caminhos alternativos para toda a rede, determinados sucessivamente pelo processo descrito, alternavam entre dois conjuntos possíveis, com um valor de tráfego total transportado diferente para cada

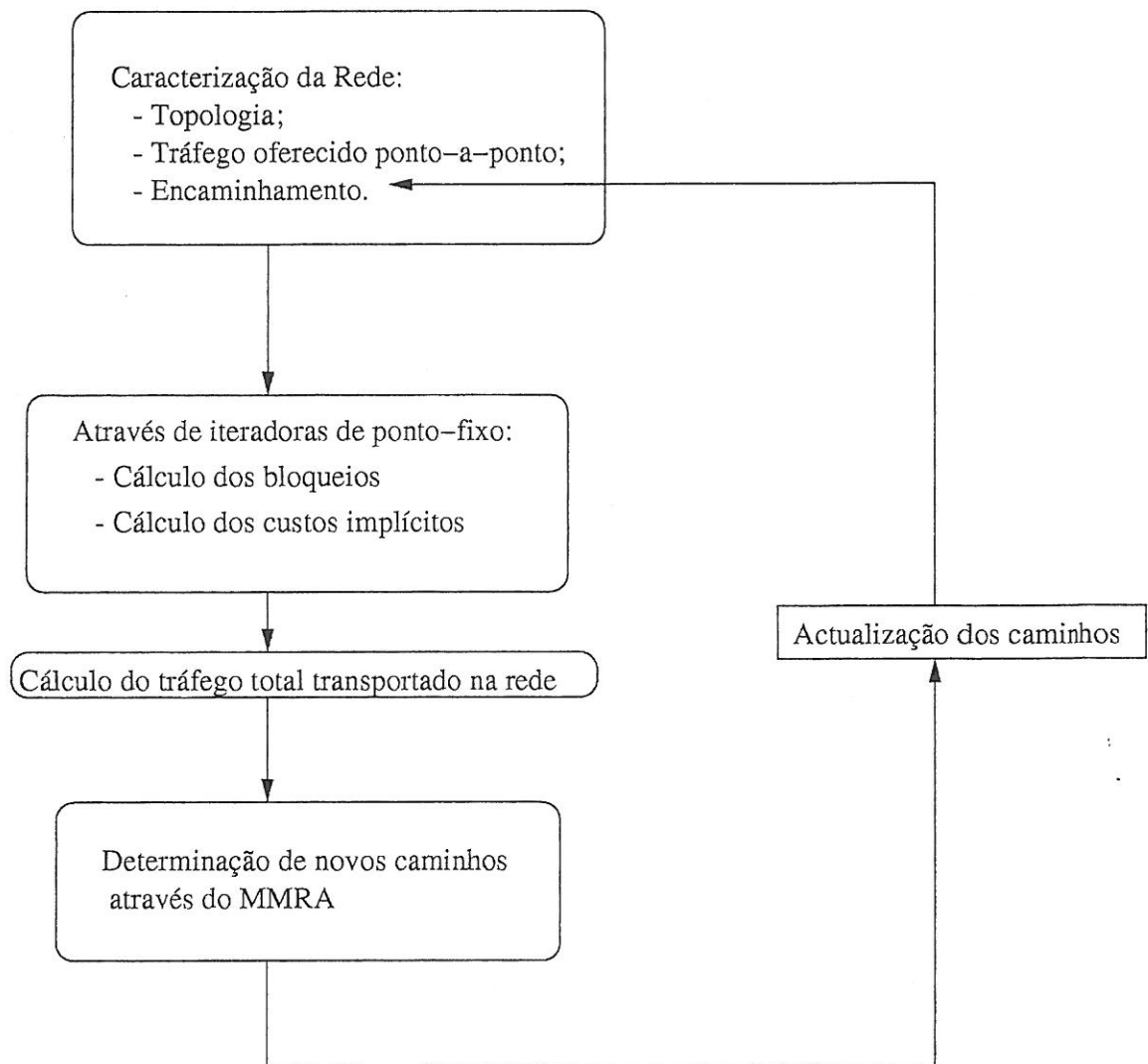


Figura 1: Sistema de teste do MODR

um desses conjuntos, correspondendo cada um deles a um dos pontos do gráfico, para cada factor de sobrecarga (considerou-se uma sobrecarga homogénea sobre a matriz de tráfego). A diferença entre os dois valores de tráfego transportado aumentava com a sobrecarga de tráfego.

Um outro resultado visível neste estudo foi que, para valores de sobrecargas de tráfego mais baixas, esses dois valores entre os quais oscilava o tráfego transportado, tinham tendência para serem inferiores ao tráfego transportado pelos caminhos determinados pelo processo de dimen-

sionamento da rede assinalados pelos pontos com etiqueta "Dimens". Este fenómeno é mais visível na rede A mas na rede B também se verifica para as condições de dimensionamento, i.e. quando não existe sobrecarga alguma. Ao analisar-se os conjunto de caminhos a que correspondia cada uma das soluções encontradas verificava-se que numa das soluções um subconjunto de feixes estava muito carregado com muitos caminhos e os restantes feixes ocupados apenas com os caminhos directos. Na outra solução alternavam os subconjuntos de feixes muito ocupados com os pouco ocupados.

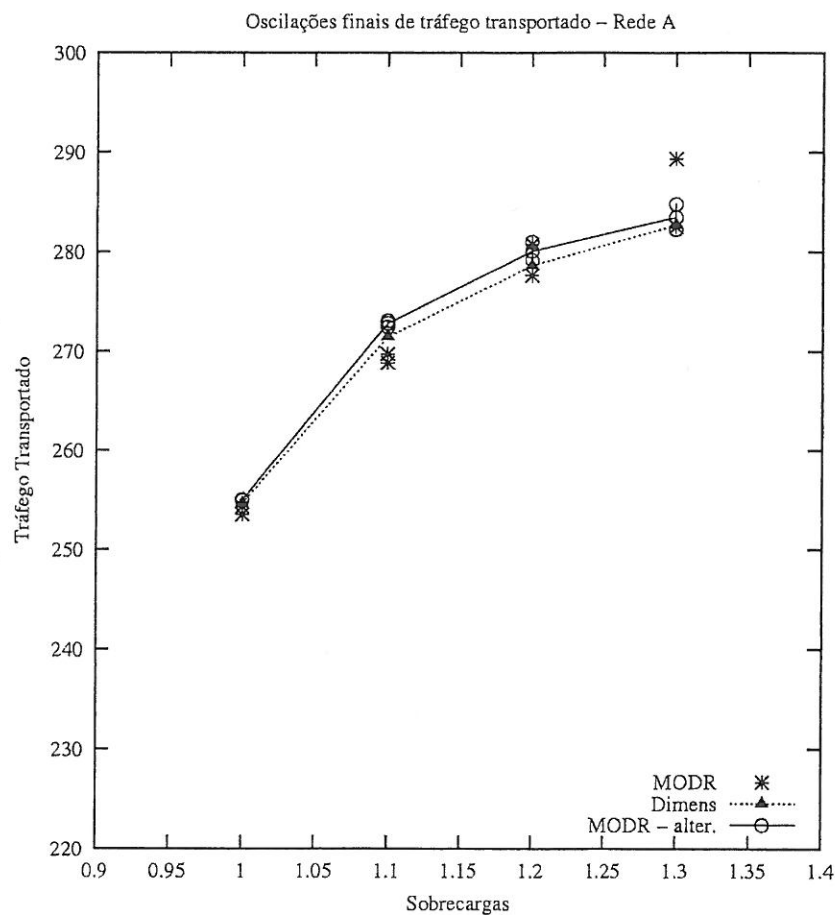


Figura 2: Caminhos MODR

É de referir que a sequência de cálculos em cada iteração, assinalados na figura 1, foi executada

da para todos os pares de nós O-D em função apenas de um determinado estado da rede, o que corresponde, no método MODR, à actualização pelo sistema de controlo de encaminhamento dos caminhos alternativos para todos os pares O-D, em cada intervalo de actualização.

Face aos resultados anteriores fez-se um novo conjunto de experiências considerando uma alteração no modelo de cálculo representado na figura 1, que corresponde a que em cada iteração se determine apenas o novo caminho alternativo para um par de nós. Os resultados correspondentes a esta alteração estão também assinalados nas figuras 2 e 3 com a etiqueta "MODR-alter.". Esta alteração no método MODR corresponde à actualização, pelo sistema de controlo de encaminhamento, apenas de um caminho alternativo para um par de nós num período de actualização dos caminhos.

A análise dos resultados desta alteração foi importante no processo de refinamento do MODR apesar de não ser de aplicação defensável numa situação de funcionamento real dado que o tempo que o MODR demoraria a encontrar os "melhores" caminhos não iria permitir que este reagisse eficazmente a flutuações rápidas no tráfego oferecido.

Verifica-se agora que, para cada valor de sobrecarga testado, os resultados não se fixavam apenas em dois valores de tráfego transportado na rede (daí que os pontos extremos estejam ligados para cada valor de sobrecarga) mesmo num número muito elevado de iterações (por exemplo $10000 * 30$ - por serem 30 pares origem-destino numa rede com 6 nós). Os resultados apresentados para o MODR-alter. reportam-se a $100 * 30$ iterações onde se verificou que após aproximadamente $50 * 30$ iterações os valores de tráfego transportado variavam dentro da mesma gama de valores e por conseguinte foram calculados para as últimas $50 * 30$ iterações os valores do tráfego transportado mínimo, médio e máximo (obtido em pacotes de $1 * 30$ iterações). São os valores médios que estão unidos por segmentos de recta para os diferentes valores de sobrecarga.

Verificou-se então que apesar da média do tráfego transportado ser inferior para sobrecargas

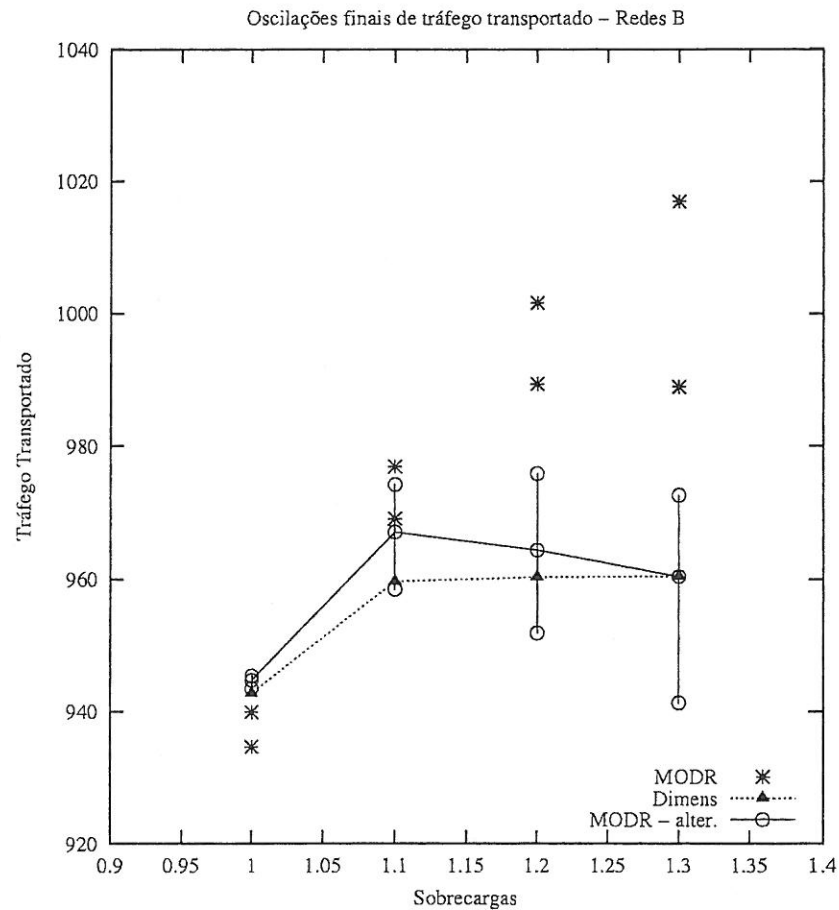


Figura 3: Caminhos MODR

mais elevadas, conseguia-se no entanto melhorar os resultados face aos valores de referência “Dimens” para sobrecargas mais baixas. Este facto foi motivador para a proposta do MODR que se apresenta na secção 3.

É de salientar ainda um aspecto visível na versão original do MODR: os resultados obtidos para valores mais elevados de sobrecarga são francamente melhores, do ponto de vista do tráfego total transportado na rede, do que aqueles que se obtêm com os caminhos alternativos obtidos pelo processo de dimensionamento. Este facto deve-se a que, como existem alguns feixes a servirem apenas os caminhos directos, o que se ganha por evitar o encaminhamento alternativo

através desses feixes para valores elevados de sobrecarga, compensa de alguma forma o facto de se estar a sobrecarregar outros feixes com muitos caminhos. É ainda de referir que para esta gama de valores de sobrecarga, a lógica de selecção dos caminhos para cada par de nós através das regiões de prioridade definidas no MMRA não é eficaz porque praticamente todos os caminhos têm prioridade máxima¹. De notar que as regiões de prioridade foram determinadas para cada rede de acordo com os critérios definidos em [3], embora para a rede B os valores aceitáveis tenham sido determinados para um bloqueio ponto-a-ponto na rede de referência de 0.05, em vez do valor 0.01 utilizado em [3]. Mesmo assim, também para a rede B para valores de sobrecarga de 20% e 30% os caminhos estão em geral fora dos limites aceitáveis das duas métricas e por conseguinte com o mesmo nível de prioridade (i.e. na região de última escolha do espaço das funções objectivo).

2.1 Bloqueios e Custos implícitos

Para caracterizar melhor o efeito do uso de cada uma das métricas do modelo bi-objectivo em que assenta o MMRA, foi ainda realizado outro estudo em que os caminhos alternativos foram determinados com cada uma das métricas em separado: bloqueio nos feixes ou custos implícitos. Este é simplesmente um problema de caminhos mais curtos mono-objectivo. Esta avaliação é tanto mais importante quanto as duas métricas, como já foi referido em [3], não são ortogonais embora aproximadamente para 50% dos pares O-D, para o primeiro e/ou para o segundo caminho constituam objectivos conflituosos.

Os resultados que se seguem foram obtidos de acordo com as últimas alterações do MODR

¹Ex: Os valores Requeridos e Aceitáveis para as 2 métricas de acordo com o processo de estabelecimento das mesmas referido em [6] são respectivamente,

para a rede A:

$$Req_{bloq.} = -2 * \log(1 - 0.051) = 0.0454675; \quad Ac_{bloq.} = -2 * \log(1 - 0.15) = 0.141162$$

$$Req_{custos} = 2 * 0.11 = 0.22; \quad Ac_{custos} = 2 * 0.51 = 1.02$$

para a rede B:

$$Req_{bloq.} = -2 * \log(1 - 0.054867) = 0.049014; \quad Ac_{bloq.} = -2 * \log(1 - 0.161921) = 0.15343$$

$$Req_{custos} = 2 * 0.297584 = 0.595168; \quad Ac_{custos} = 2 * 0.715886 = 1.431772$$

i.e. calculando em cada iteração o caminho alternativo para cada par de nós (ver figuras 4 e 5). De notar que os resultados correspondentes para o MODR original dariam o mesmo tipo de conclusões que o obtido para o modelo bi-objectivo, i.e., no final de algumas iterações (poucas) o processo de cálculo fixar-se-ia tipicamente em dois conjuntos de caminhos alternativos, a que corresponderiam valores também diferentes de tráfego transportado na rede.

À semelhança do modelo bi-objectivo, volta a verificar-se que ao fim de $50 * 30$ iterações os valores já se encontram numa gama suficientemente apertada para utilizar as $50 * 30$ iterações seguintes para determinar o valor máximo, mínimo e médio de tráfego transportado na rede. De notar que foram feitos testes bastante mais longos e os intervalos mantiveram-se dentro da mesma gama aproximadamente². Como se pode verificar nas figuras 4 e 5, os resultados são significativamente melhores, do ponto de vista do tráfego transportado, no caso da função objectivo custo implícito. É de notar que é com os caminhos determinados apenas com esta métrica que se consegue, para cada uma das redes e para cada valor de sobrecarga não só transportar em geral mais tráfego, como também obter um intervalo de oscilação dos valores finais de tráfego transportado bastante mais apertado do que quando a métrica é o bloqueio ou para qualquer combinação das duas métricas³.

Como acabou de ser verificado, a métrica custos implícitos isoladamente tende a maximizar o tráfego transportado na rede. É importante clarificar também qual a vantagem do uso da métrica bloqueio de chamadas no MMRA. Para isso foram analisados os bloqueios ponto-a-ponto quando se usa separadamente, como função objectivo, cada umas das métricas. Mostra-se a seguir, nas figuras 6 e 7, um exemplo dos bloqueios ponto-a-ponto calculados para a rede B com 30% de sobrecarga quando se usa separadamente a métrica custos implícitos ou a métrica bloqueio, respectivamente. As ordenadas do gráfico correspondem à indicação dos

²Ver apêndice B

³Foram realizados vários estudos em que o espaço das funções objectivo foi pesquisado em diferentes direcções. Os resultados obtidos em termos de tráfego total foram sempre valores intermédios entre os que se obtêm optimizando separadamente cada uma das métricas.

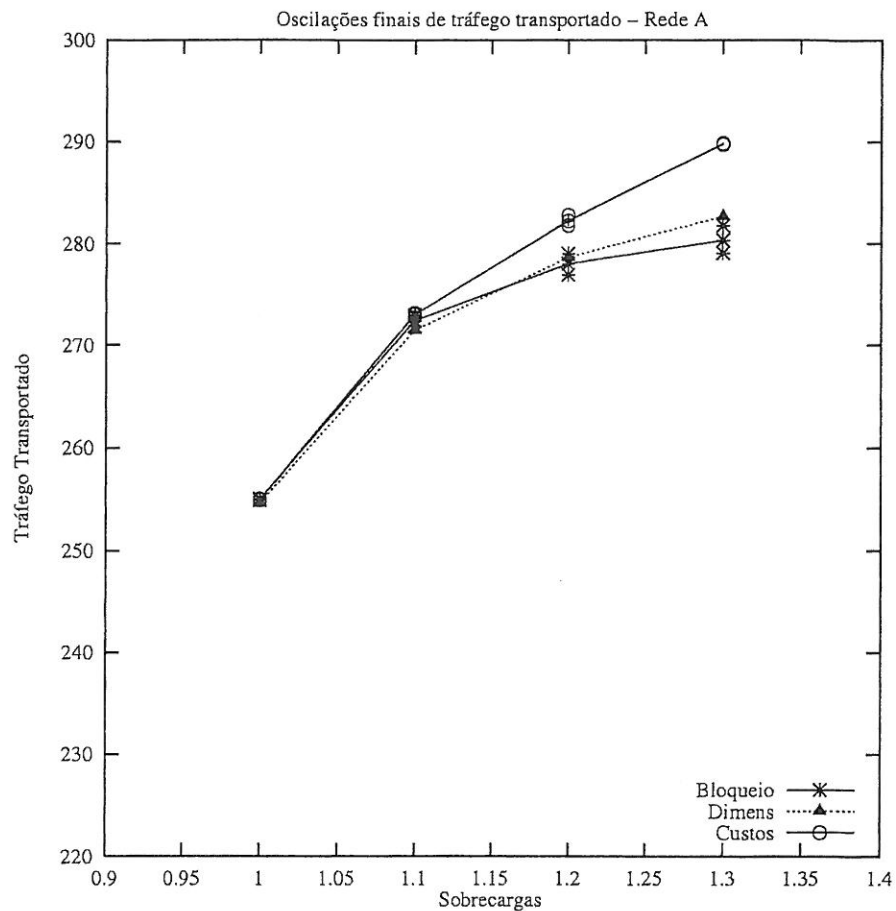


Figura 4: Caminhos de menor bloqueio e caminhos de menores custos (implícitos) calculados para cada par O-D - modelos mono-objectivo (rede A)

valores máximos das gamas de variação de bloqueio definidas no conjunto $\{[0, 0.1],]0.1, 0.2], \dots\}$. Como se pode verificar da observação destas figuras, a métrica bloqueio tende a equilibrar os bloqueios ponto-a-ponto enquanto que a métrica custos “sacrifica” alguns fluxos com bloqueios ponto-a-ponto muito elevados, tipicamente os que oferecem menor tráfego, “beneficiando” em contrapartida os de maior tráfego oferecido.

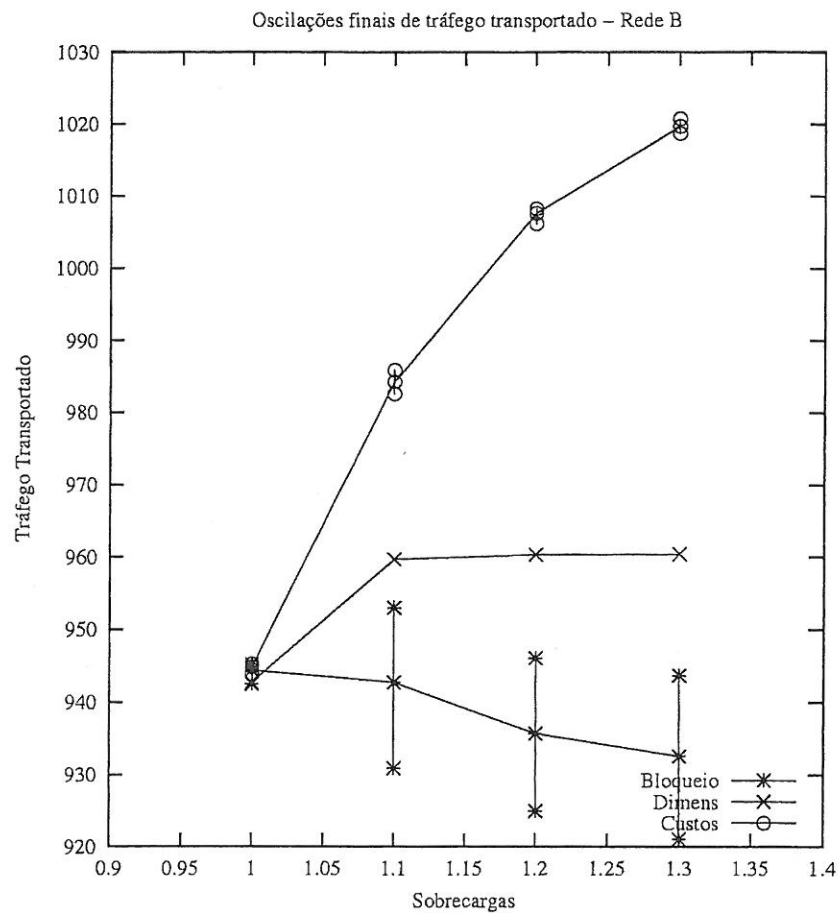


Figura 5: Caminhos de menor bloqueio e caminhos de menores custos (implícitos) calculados para cada par O-D - modelos mono-objectivo (rede B)

2.2 MODR – alterado com selecção dos 1º e 2º caminhos

A questão que se colocou de seguida foi averiguar se os valores de tráfego transportado melhorariam quando, em vez de se procurar através do MODR- alter. só os caminhos alternativos, se calculassem também caminhos de primeira escolha, o que correspondia a alterar também para este efeito, o MMRA. Isto conduziu a que esses caminhos de primeira escolha pudessem ter dois feixes em vez do feixe directo considerado no MMRA original como sendo sempre o caminho de primeira escolha.

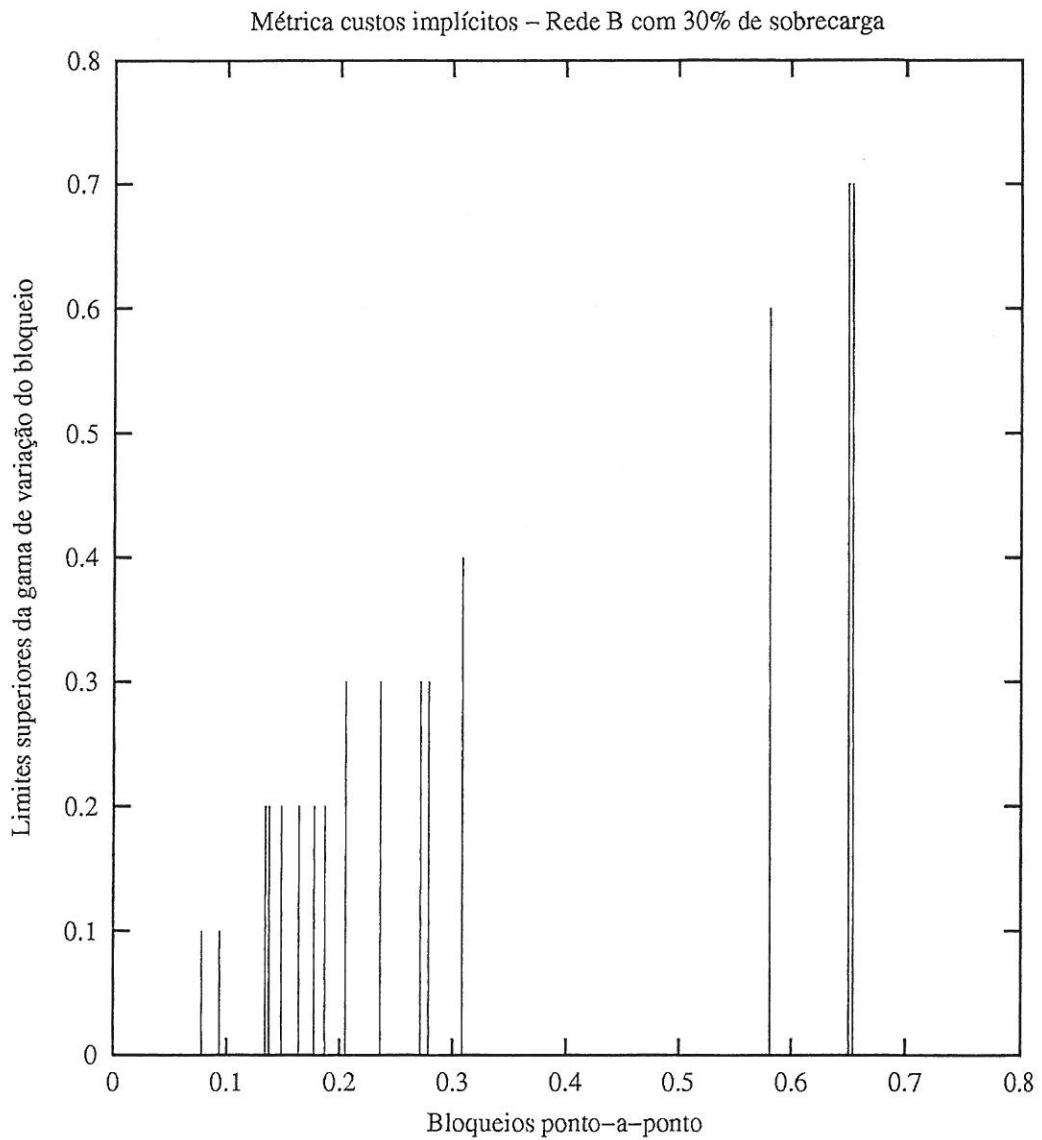


Figura 6: Bloqueios ponto-a-ponto obtidos com a métrica custos implícitos

De notar que foram sendo feitos testes com cada uma das métricas em separado. Os resultados podem ser visualizados nas figuras 8 e 9 para as redes A e B, respectivamente. Os resultados obtidos, embora piores do ponto de vista do tráfego transportado, são do mesmo tipo dos já expostos. Verifica-se no entanto, que na situação de ausência de sobrecarga de

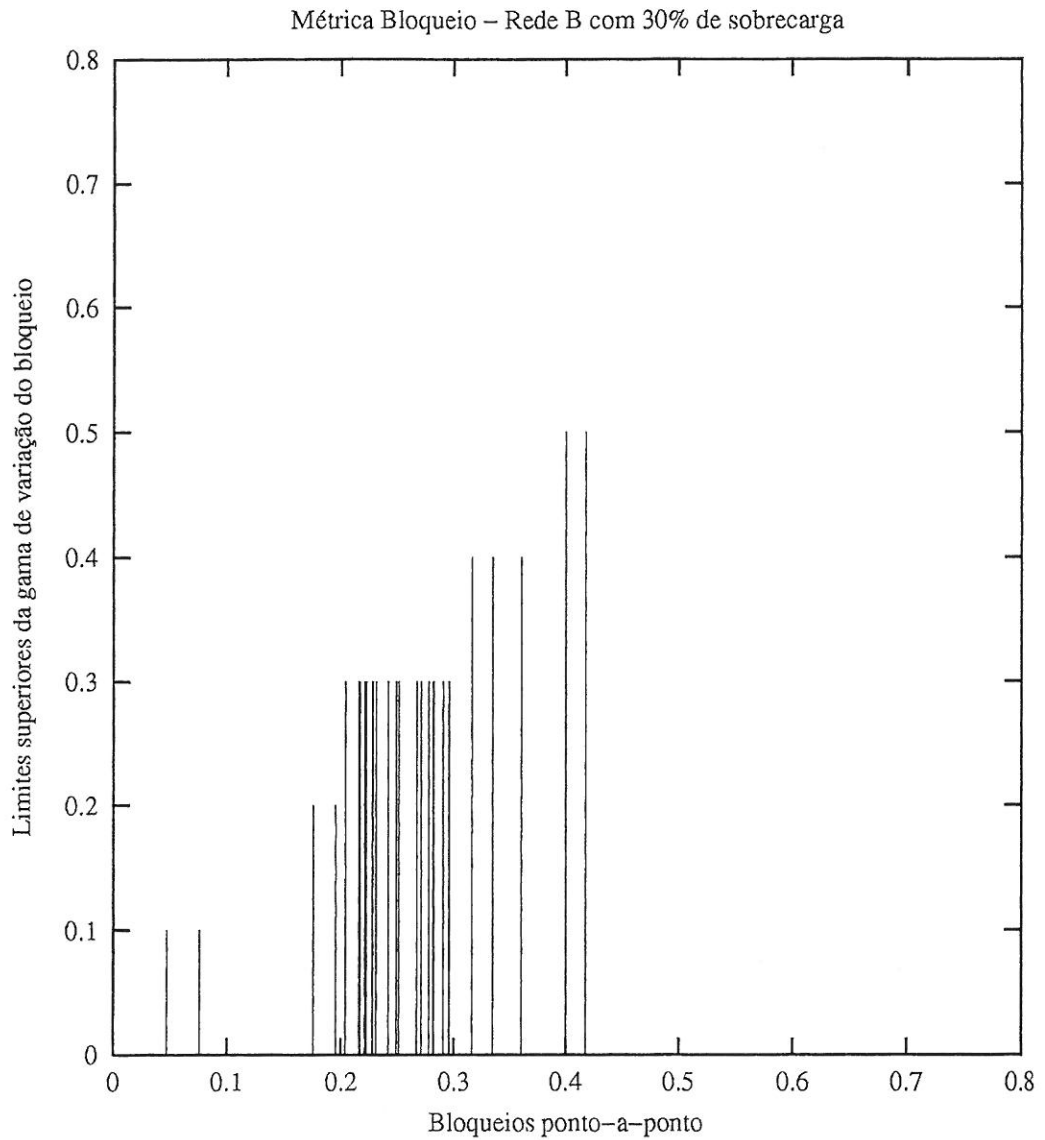


Figura 7: (a) Bloqueios ponto-a-ponto obtidos com a métrica bloqueio

tráfego oferecido, os valores são bastantes piores do que os anteriormente obtidos quando se usava como 1º caminho o feixe directo. Existe no entanto uma razão para se verificarem estes resultados neste caso, que se traduz no aparecimento de custos implícitos negativos com este processo de escolha de caminhos. Este fenómeno aparece para tráfego nominal e está associado

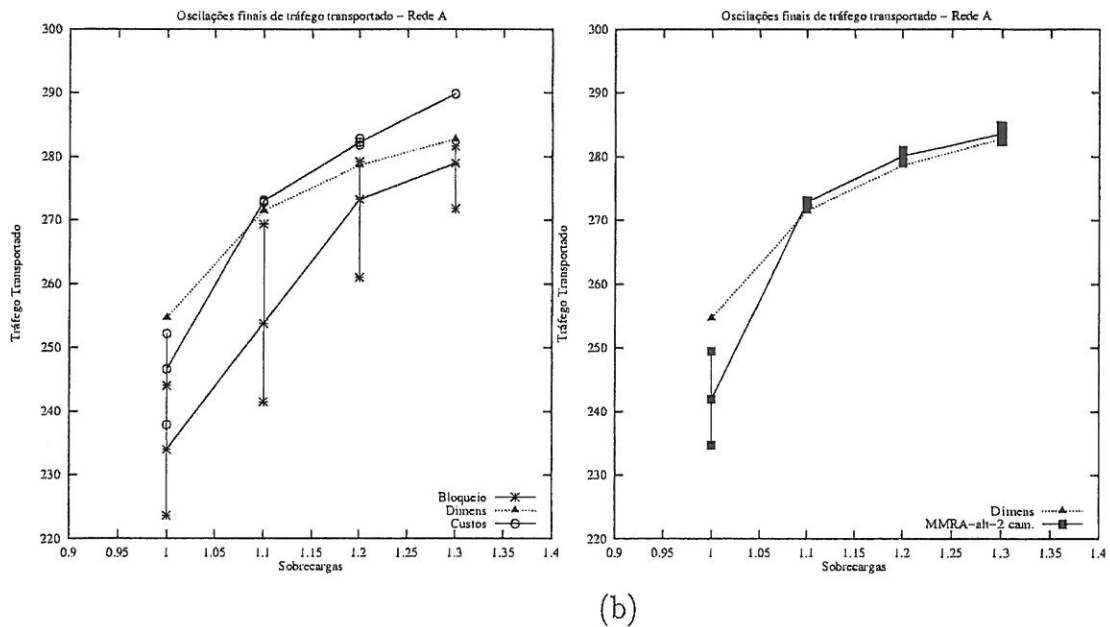


Figura 8: Rede A: (a) 1º e 2º Caminhos de menor bloqueio e de menores custos implícitos (re)calculados para cada par O-D (b) 1º e 2º Caminhos (re)calculados para cada par O-D

ao aparecimento de muitos 1ºs caminhos com dois feixes. Estes valores negativos não aparecem inicialmente mas sim ao fim de algumas iterações. De notar que o algoritmo de selecção dos k -caminhos mais curtos não está preparado para usar coeficientes negativos, e que estes são automaticamente anulados antes de se chamar este algoritmo cujos resultados nestes casos poderão não fazer sentido. No apêndice A dar-se-á um exemplo ilustrativo do aparecimento de custos negativos.

Os custos implícitos negativos aparecem associados a “más” escolhas de caminhos (ocorridas no processo de cálculo iterativo) que conduzem a que exista capacidade excedente nalguns feixes o que favorece o tráfego alternativo nesses feixes em detrimento do tráfego directo o que finalmente faz com que seja transportado menos tráfego na rede do que aquele que se obteria se houvesse menos capacidade nesses feixes. Este tipo de resultados valida a opção feita no MMRA de admitir que, em redes totalmente emalhadas o primeiro caminho é sempre o arco

directo, independentemente de outros efeitos benéficos resultantes do modelo bi-objectivo que não foram aqui avaliados, mas cujos benefícios dificilmente compensariam estas perdas.

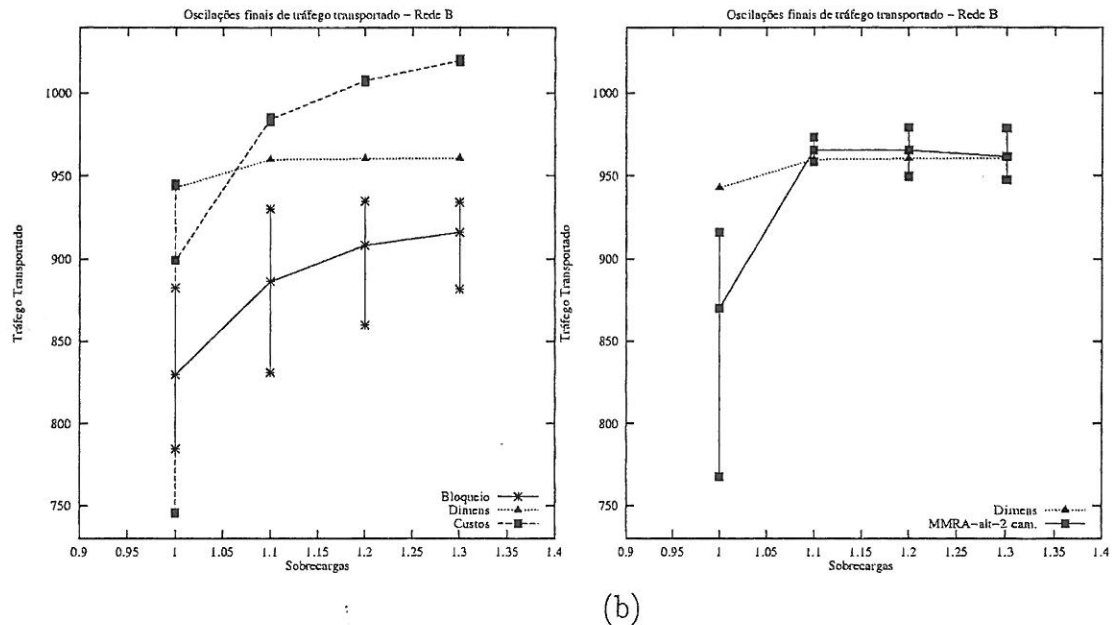


Figura 9: Rede B: (a) 1º e 2º Caminhos de menor bloqueio e de menores custos implícitos (re)calculados para cada par O-D (b) 1º e 2º Caminhos (re)calculados para cada par O-D

Foi ainda feito o estudo analítico com o MODR inicial e o MMRA escolhendo também o primeiro caminho. Os resultados não são porém aqui expostos por serem expectavelmente ineficientes. De facto, tal como anteriormente o método fixava-se em duas soluções caracterizando-se cada uma delas pela existência de alguns feixes com valores muito elevados de bloqueio e custo implícito, resultantes de serem muitos os caminhos que os usam, e outros feixes que não sendo usados por quaisquer caminhos têm bloqueio e custo implícito nulos.

2.3 MMRA com custos simplificados

Foi ainda avaliada a eficácia, do uso de uma expressão simplificada para os custos implícitos, na escolha de caminhos no MMRA. A simplificação considerada reporta-se à expressão da "receita

líquida” $s_{r^i(f)}$ de se encaminhar uma chamada do fluxo f no caminho $r^i(f)$ em que i é o número de ordem por que é escolhido o caminho $r^i(f)$, que passa a ser:

$$s_{r^i(f)} = w(f) - \sum_{l_j \in r^i(f)} c_j \quad i = 1, 2, \dots \quad (3)$$

No caso vertente de $R = i_{max} = 2$; isto corresponde a desprezar a terceira parcela da expressão (46) em [6] que dá $r^1(f)$. Assim sendo, foi feito um estudo analítico em que estes custos foram calculados, tal como anteriormente, através da iteradora de ponto-fixo e em que os novos caminhos foram recalculados através do MODR alterado. A primeira conclusão é de que não houve, em nenhum caso, problemas de convergência, tal como no cálculo dos custos exactos. A segunda conclusão é que, no caso em que os novos caminhos são recalculados em cada iteração para cada par O-D, o processo de escolha dos caminhos conduz a valores de tráfego transportado na rede que são ligeiramente inferiores aos obtidos com os custos exactos tal como se pode ver nas figuras 10 e 11. Quanto ao modelo mono-objectivo em que a única métrica é o custo implícito, conduz a valores de tráfego transportado na rede que são da mesma ordem de grandeza da obtida com os custos exactos, como se pode também ver nas mesmas figuras.

Os valores encontrados no problema mono-objectivo com a métrica custos implícitos simplificados foram um óptimo indicador para a evolução do método MODR porque mostraram que é importante obter uma boa calibração dos pesos da combinação convexa das duas funções objectivo, do modo a dar igual importância a ambas as métricas em termos de direcção de pesquisa. Os caminhos que vão sendo encontrados através do MMRA com custos simplificados e uma correcta calibração dos pesos podem ser tão “bons” quanto os obtidos com os custos exactos, não só do ponto de vista do tráfego transportado na rede como também em termos da análise global do método bi-objectivo como se verá na secção seguinte.

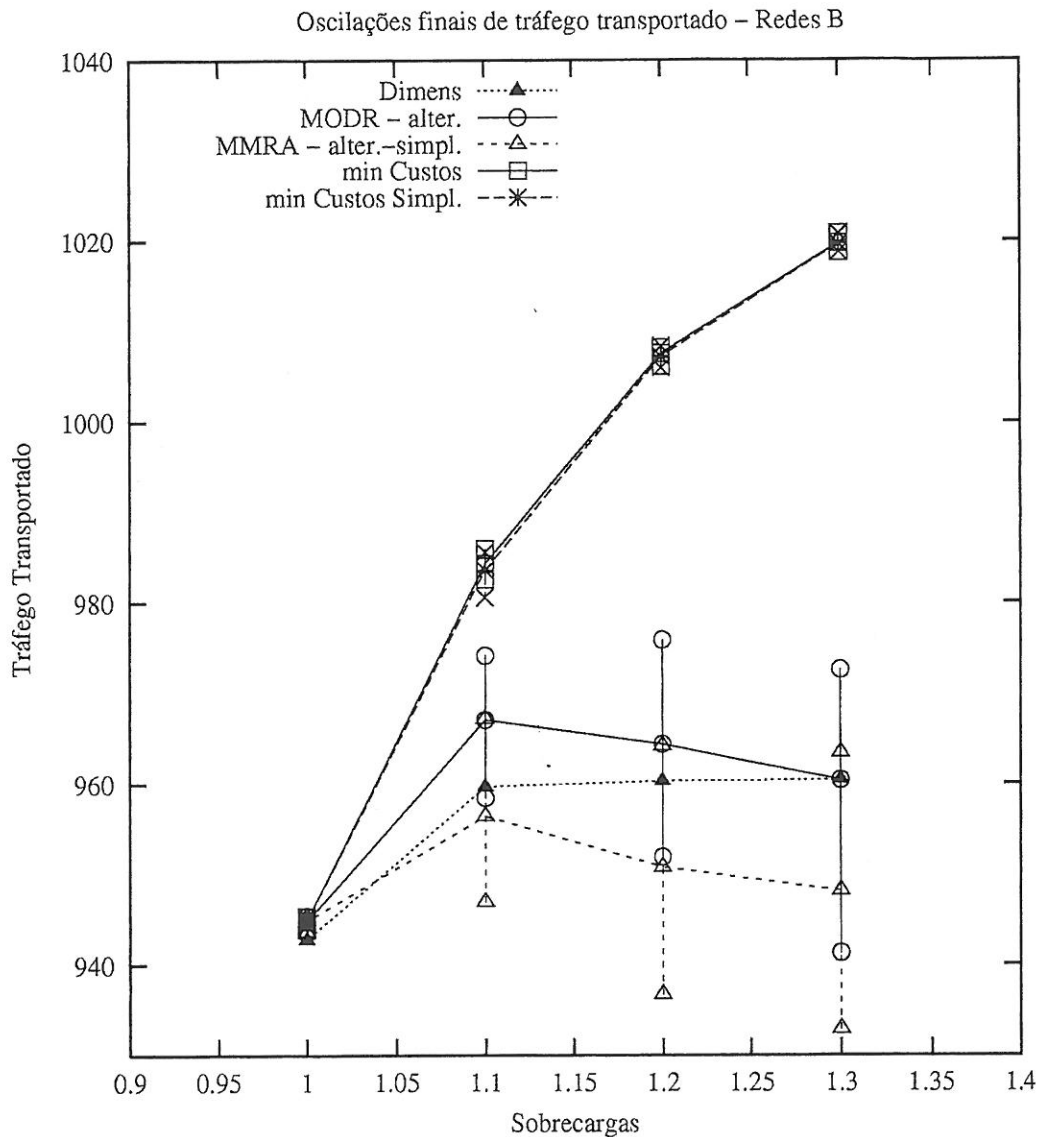


Figura 10: Caminhos MMRA, caminhos MMRA com custos simplificados recalculados para cada par O-D, caminhos que minimizam o custo implícito e o custo implícito simplificado

3 MODR – 2

Depois do estudo apresentado anteriormente foi possível chegar a uma versão final do método MODR, que designámos MODR-2, procurando tirar partido das características do modelo

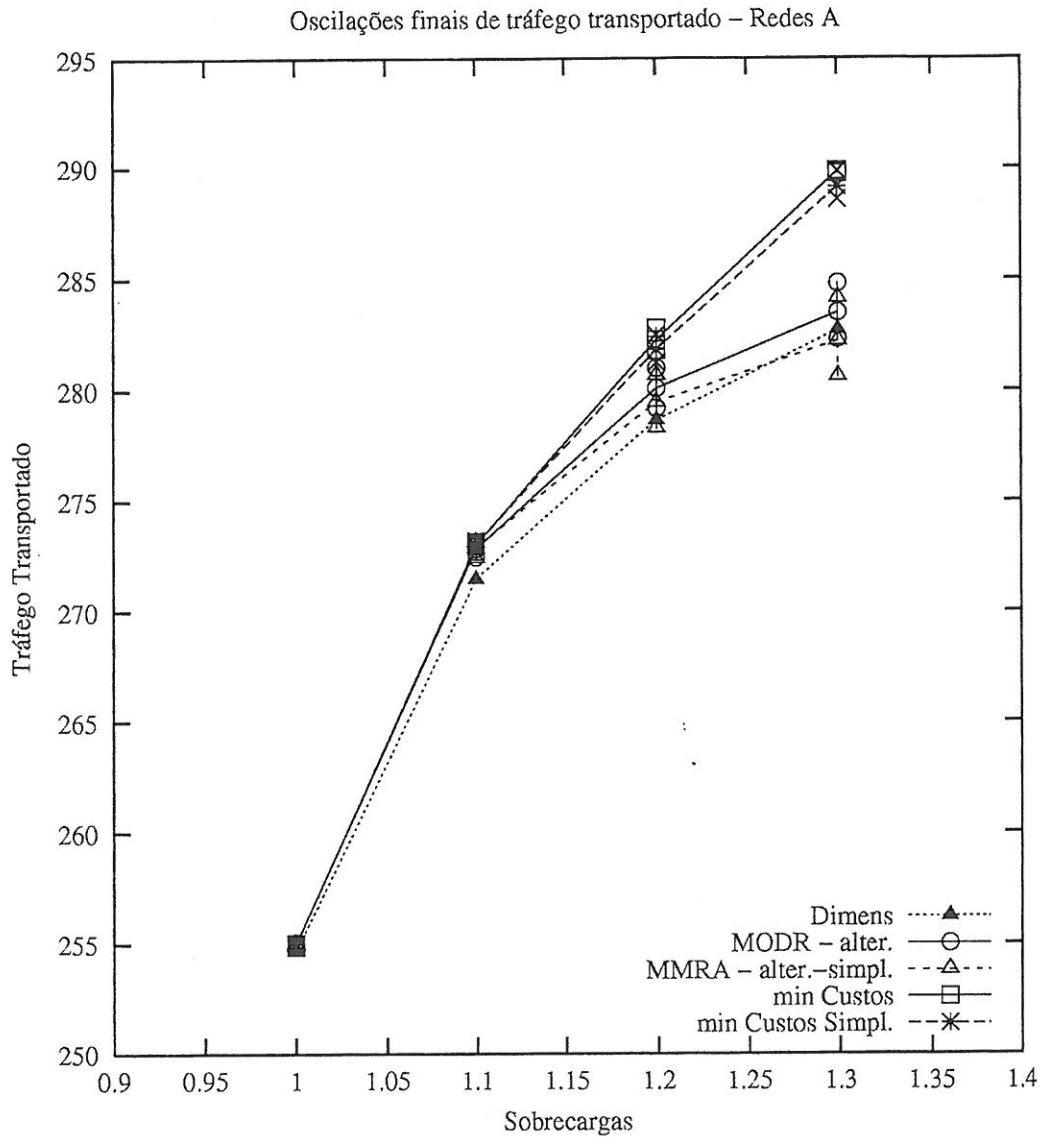


Figura 11: Caminhos MMRA, caminhos MMRA com custos simplificados recalculados para cada par O-D, caminhos que minimizam o custo implícito e o custo implícito simplificado

tendo em vista superar as dificuldades do MODR original e do MODR modificado relativamente ao desempenho global da rede. Assim sendo, a primeira consideração que se fez foi a seguinte: não é vantajoso actualizar pelo MMRA, em cada intervalo de actualização de caminhos (feita pelo sistema de controlo de encaminhamento) todos os caminhos alternativos para todos os

pares O-D como já se justificou anteriormente, nem tão pouco actualizar apenas o caminho alternativo de um par O-D. Então, no processo de melhoramento do método MODR que se seguiu, o objectivo foi procurar qual o conjunto de caminhos alternativos que se deveria actualizar em cada intervalo de modo a tirar partido do MMRA na escolha de caminhos, i.e. de modo a procurar maximizar o tráfego transportado na rede sem simultaneamente deixar que os fluxos que oferecem menos tráfego sejam prejudicados com bloqueios muito elevados. A resposta a esta questão foi parcialmente dada por Kelly em [5] onde se refere que, num ambiente de encaminhamento adaptativo, se deve tentar reencaminhar o tráfego dos caminhos cujo valor de $(1 - L_{r(f)}) s_{r(f)}$ seja mais baixo. Ou seja que tenham um valor baixo para o produto da probabilidade de não bloqueio no caminho pela respectiva receita líquida. Este critério leva então a que os caminhos alternativos que se devem actualizar são os que tiverem menor valor de $(1 - L_{r^2(f)}) s_{r^2(f)}$. A questão, que se revelou mais difícil de responder como a seguir se mostra, foi a de definir quantos caminhos se deviam tentar actualizar. As experiências que se fizeram inicialmente revelaram que o resultado de se actualizar um número fixo de caminhos (depois de se ter tentado obter empiricamente, para cada rede, qual o melhor número a adoptar) mostraram que, por um lado esse número “óptimo” dependia da rede e também da situação de sobrecarga em que esta se encontrava. Essa dependência era tanto mais grave quanto se podia piorar, em cada actualização dos caminhos, os valores, quer de tráfego transportado na rede quer do desvio máximo relativo do bloqueio ponto-a-ponto, relativamente a actualizações anteriores. É de referir que, para avaliar a evolução do bloqueio ponto-a-ponto na rede se definiu uma medida de desvio máximo relativo do bloqueio ponto-a-ponto dada por:

$$Desmaxr_{pp} = \frac{\max(B_{pp} - B_{ppmed})}{B_{ppmed}}, \quad \text{em que}$$

$$B_{ppmed} = \frac{\sum_{pp=1}^{N*(N-1)} B_{pp}}{N * (N - 1)}$$

$$B_{pp} = \frac{(A_{pp}(f) - \hat{A}_{pp}(f))}{A_{pp}(f)}$$

sendo N o número de nós da rede.

Aquela constatação sobre o número de caminhos a alterar conduziu a que se pensasse numa heurística mais elaborada que procurasse garantir que na situação de funcionamento real os caminhos seriam alterados apenas se a isso correspondesse uma melhoria do desempenho da rede, do ponto de vista do tráfego total transportado e/ou do ponto de vista do desvio máximo relativo do bloqueio ponto-a-ponto. Tal algoritmo obriga a que se faça uma avaliação prévia do desempenho da rede com os caminhos alternativos com os quais se pretende actualizar o encaminhamento. A partir do momento em que essa avaliação de desempenho é feita, pode tentar-se variar o número de caminhos com que se vai fazer a avaliação seguinte de desempenho e se este melhorar continua a tentar-se melhorar o desempenho, senão recua-se para os caminhos anteriores e varia-se o número de caminhos que se vão tentar melhorar a seguir. Vejamos então o algoritmo correspondente à determinação dos novos caminhos **a executar em cada período de actualização de caminhos**. Definiram-se duas variáveis, N_{caminhos} e M_{caminhos} , que contêm o número de caminhos que se vão tentar melhorar em ciclos diferentes do algoritmo. N_{caminhos} é usada num ciclo interno onde se procura encontrar a solução correspondente ao bloqueio global mínimo (a que corresponde o tráfego transportado máximo), e M_{caminhos} é usada num ciclo externo onde, para cada solução de bloqueio mínimo que é encontrada no ciclo interno, se vai procurar aquela a que corresponde o mínimo dos desvios máximos relativos de bloqueio ponto-a-ponto. De notar ainda que em qualquer iteração do algoritmo estão guardadas três soluções correspondentes a três conjuntos de caminhos: os caminhos iniciais (correspondentes à última actualização bem sucedida), os caminhos correspondentes à solução de bloqueio mínimo e os caminhos correspondente ao mínimo dos desvios máximos relativos de bloqueio ponto-a-ponto.

Algoritmo 1 de Alteração de Caminhos (MODR-1)

1. Parte-se dos caminhos na rede obtidos na actualização anterior (caminhos iniciais definidos pelo conjunto $C_o^{(n)}$), bem como dos bloqueios nos arcos B_k e respectivos custos implícitos c_k e calcula-se o bloqueio médio na rede *bloqrede* e desvio máximo relativo dos bloqueios ponto-a-ponto $Desbl_{pp}$
2. Considere-se ainda o conjunto de caminhos correspondente ao bloqueio mínimo encontrado para a rede, C_B^* , e C_D^* , o conjunto de caminhos correspondente ao mínimo desvio máximo relativo dos bloqueios ponto-a-ponto encontrado para a rede e faz-se: $C_B^* \leftarrow C_o^{(n)}$ e $C_D^* \leftarrow C_o^{(n)}$
3. $bloqminrede \leftarrow bloqrede$ e $mindesblblq_{pp} \leftarrow Desbl_{pp}$
4. Para $Mcaminhos \leftarrow N * (N - 1)$ até $Mcaminhos = 1$ Faz

(a) $Nciclos \leftarrow 2$

Nota: Esta variável serve para garantir que o ciclo interno em que se procura a solução de bloqueio mínimo é executado 2 vezes. Em geral uma vez é suficiente e só excepcionalmente é que da segunda vez em que é executado se consegue melhorar solução de bloqueio encontrada. Se se continuasse a executar este ciclo interno isso não ia servir de nada porque não se ia conseguir melhorar a solução já encontrada no final do segundo ciclo.

(b) $Ncaminhos \leftarrow Mcaminhos$

(c) Considera a rede com os caminhos $C_o^{(n)}$

Nota: a solução correspondente ao bloqueio mínimo na rede vai depender do número de caminhos que se vão tentar mudar inicialmente e dos caminhos iniciais.

(d) Enquanto $Ncaminhos > 0$ e $Nciclos > 0$ Faz

- i. Procura entre todos os caminhos de segunda escolha os N caminhos com menor $(1 - L_{r^2}(f)) s_{r^2}(f)$
- ii. Para os pares O-D correspondentes a esses caminhos calcula os novos caminhos pelo MMRA; o conjunto de caminhos da rede correspondente é C_B^n
- iii. Calcula os novos $B_k, c_k, bloqrede$ e $Desbl_{pp}$
- iv. Se $bloqrede < bloqminrede$ Faz
 - A. $bloqminrede \leftarrow bloqrede$
 - B. $C_B^* \leftarrow C_B^n$ (guarda melhor solução de bloqueio, ou seja guarda os caminhos alternativos que correspondem ao menor bloqueio encontrado até ao momento na rede)
- v. Senão
 - A. $Ncaminhos \leftarrow Ncaminhos-1$
 - B. Considera a rede com os caminhos C_B^*
- vi. Se $Ncaminhos = 0$ e $Nciclos = 2$ Faz
 - A. $Nciclos \leftarrow Nciclos - 1$
 - B. $Ncaminhos \leftarrow N * (N - 1)$
- vii. Se $Ncaminhos = 0$ e $Nciclos = 1$ Faz
 - A. Se $Desbl_{pp} < mindesbl_{pp}$ Faz
 - $C_D^* \leftarrow C_B^*$ (guarda melhor solução de desvio máximo relativo de bloqueio ponto-a-ponto ou seja guarda os caminhos alternativos correspondentes - que definem o conjunto C_D^*)
 - $mindesbl_{pp} \leftarrow Desbl_{pp}$
 - B. $Mcaminhos \leftarrow Mcaminhos-1$

(fim de (4d))

5. $C_D^{(n+1)} \leftarrow C_D^*$ (conjunto de caminhos seleccionado para a rede nesta iteração)

Mostra-se de seguida (ver figuras 12 e 13) o desempenho conseguido para a rede definida em [7] para vários valores de sobrecarga obtido com o MODR-2 e com o método RTNR. Aqui e no que segue fez-se a comparação do MODR-2 com o método RTNR por ter sido este método o que teve melhores resultados no estudo simulacional do ponto de vista das medidas de desempenho adoptadas, revelando-se globalmente superior ao DAR e ao DCR (ver tese [4]).

Nas figuras referidas comparam-se os valores médios, obtidos por simulação do método RTNR, com os valores obtidos para o MODR-1 em que as várias curvas correspondem a diferentes inicializações dos caminhos. A etiqueta MODR1-M nessas figuras refere-se ao algoritmo 1 de alteração de caminhos em que os caminhos iniciais são os da rede Mitra já referida [7]. As etiquetas MODR1-M' e MODR-M'' referem-se ao algoritmo 1 de alteração de caminhos em que se usou a rede Mitra em termos das capacidades instaladas e do tráfego oferecido mas em que se usaram inicialmente outros conjuntos de caminhos (escolhidos sem qualquer critério especial).

Como se pode verificar, para o caso da métrica desvio máximo relativo dos bloqueios ponto-a-ponto, os valores obtidos pelo MODR-1 são sempre melhores do que os obtidos pelo RTNR para a rede do Mitra, quaisquer que sejam os caminhos iniciais de que se parte. Quanto ao bloqueio médio obtido para a rede, dependendo dos caminhos iniciais, assim, para o caso de sobrecargas mais elevadas, pode ou não conseguir-se menor bloqueio médio na rede. Quanto às sobrecargas mais baixas, obtêm-se normalmente bloqueios ligeiramente acima dos bloqueios obtidos para o RTNR mas são bloqueios, no entanto, muito baixos, onde os resultados de simulação para o RTNR têm maior incerteza estatística. Os valores que deram origem às figuras 12 e 13 podem ser consultados na tabela 3.

Falta ainda referir que, na análise de desempenho realizada, se usaram os custos simplificados porque tal como já foi mostrado antes, eles conduzem a uma escolha de caminhos na grande maioria das vezes idêntica àquela que é feita com os custos exactos. No entanto, houve

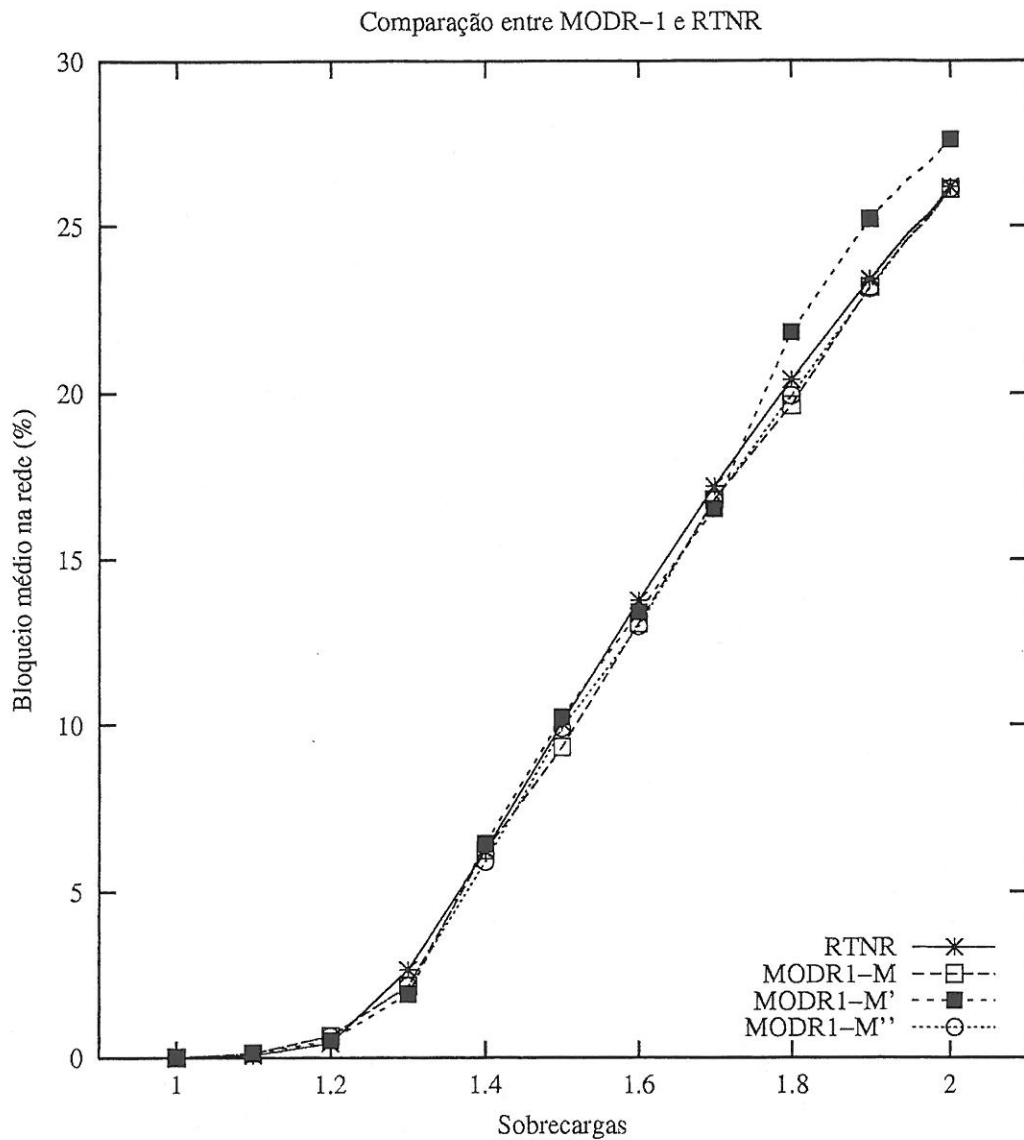


Figura 12: Comparação de valores de bloqueio total na rede entre o MODR-1 e o RTNR

necessidade de se ajustar o peso relativo das duas funções objectivo no MMRA de tal forma que a pesquisa fosse feita tendencialmente a 45° conforme referido a propósito das figuras 10 e 11. Assim, sempre que houve necessidade de se usar o MMRA com novos valores de bloqueios nos arcos e respectivos valores de custos implícitos, fez-se um ajuste dos pesos das duas métricas

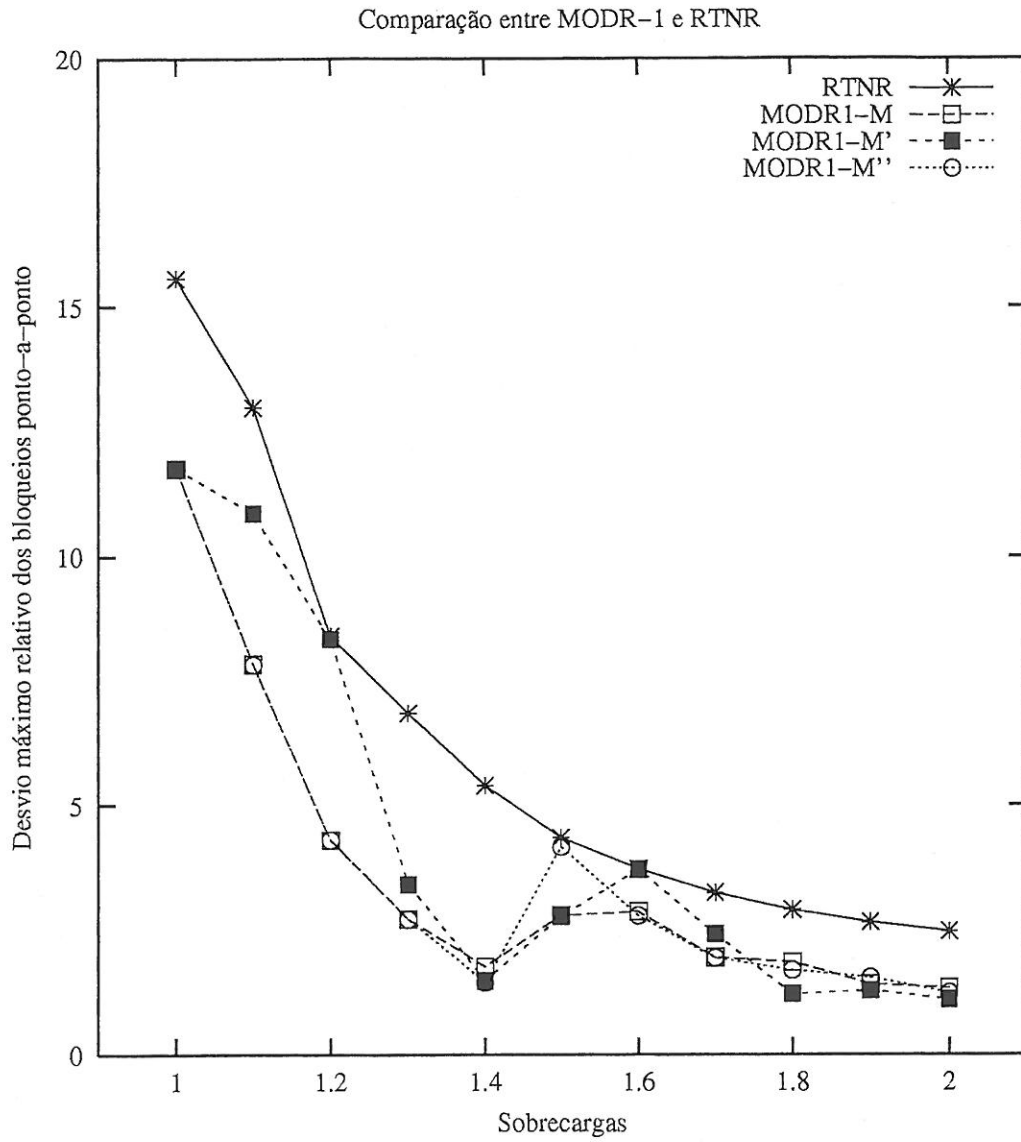


Figura 13: Comparação de desvio máximo relativo de bloqueios ponto-a-ponto na rede entre o MODR-1 e o RTNR

em função do valor médio dos bloqueios nos arcos e dos custos implícitos. Assim,

$$\epsilon_1 = 1 - \epsilon_2 \tag{4}$$

$$\epsilon_2 = \frac{B_{kmed}}{C_{kmed} + B_{kmed}} \tag{5}$$

$$\text{com } B_{kmed} = \frac{1}{|L|} \sum_{l_k \in L} B_k \quad (6)$$

$$\text{e } c_{kmed} = \frac{1}{|L|} \sum_{l_k \in L} c_k \quad (7)$$

resultante de se pretender

$$\epsilon_1 * B_{kmed} = \epsilon_2 * c_{kmed} \quad (8)$$

em que B_{kmed} e c_{kmed} são calculados sempre que se obtêm novos valores de bloqueios e de custos implícitos.

Houve ainda um aspecto importante que foi considerado na análise feita e que tem a ver com resultados menos bons obtidos pelo método MODR alterado para sobrecargas mais elevadas, como se pôde ver nas figuras 2 e 3 e que também, em parte, justifica os melhores valores obtidos, para esses valores de sobrecarga, pelo MODR original. Esse aspecto tem a ver com o limitar de algum encaminhamento alternativo em situações de sobrecarga. Assim sendo utilizou-se um critério para limitar o encaminhamento alternativo que foi o de estabelecer um patamar, ajustado experimentalmente, para o valor da função ponderada associada a cada caminho alternativo no modelo bi-objectivo, a partir do qual esse caminho não seria considerado, i.e. para o par O-D correspondente só haveria, nesse caso, caminho directo. Este critério corresponde à introdução de um mecanismo de protecção de serviço próprio do MODR.

Ainda em relação ao algoritmo anterior é de referir que as decrementações das variáveis $N_{caminhos}$ e $M_{caminhos}$, feitas nos passos 4(d)vA e 4(d)viiB respectivamente, podem ser substituídas por incrementações, desde que as variáveis tenham sido inicializadas para o efeito. Foram feitos testes do algoritmo com esta variante e os resultados foram parecidos com os aqui apresentados, tendo-se optado pelas decrementações, embora sem qualquer motivo especial.

Em função dos resultados obtidos tentou-se ainda melhorar o algoritmo anterior porque, para se conseguir obter soluções muito boas do ponto de vista do equilíbrio dos bloqueios ponto-a-ponto, estava a deixar-se degradar o bloqueio médio na rede. Em vez disso optou-se por

garantir simplesmente que esse desvio máximo relativo não ultrapassasse um determinado limiar conseguindo-se assim, como se vai mostrar de seguida, melhorar as duas medidas de desempenho face ao obtido por outros métodos de encaminhamento dinâmico. Nesta aproximação mudou-se (subjacente ao algoritmo) a natureza do modelo bi-objectivo global da rede: passa a ser mono-objectivo (optimiza bloqueio médio) com a restrição do desvio máximo dos bloqueios ponto-a-ponto, embora a resolução seja feita com base num modelo bi-objectivo para o encaminhamento entre pares de nós.

Uma outra vantagem desta alteração é que vai permitir que a importância relativa das duas medidas de desempenho possa ser ajustada em função das necessidades de gestão da rede na qual o método possa vir a ser utilizado.

Foi feita ainda mais uma alteração (ver item 4(d)iv) que melhorou os resultados obtidos e que consiste em considerar todas as soluções que se vão encontrando dentro do ciclo interno (e que eventualmente não correspondem à solução de bloqueio mínimo que se vai encontrar depois mas que pode ter um valor mais baixo de desvio máximo relativo dos bloqueios ponto-a-ponto) mas que é melhor do que a solução inicial do ponto de vista de bloqueio médio na rede e satisfaz o limiar estabelecido para o desvio máximo relativo do bloqueio ponto-a-ponto. O valor limiar do desvio dos bloqueios ponto-a-ponto é um valor importante a ser definido empiricamente, dependendo dum estudo experimental da rede.

Algoritmo 2 de Alteração de Caminhos (MODR-2)

1. Parte-se dos caminhos na rede obtidos na actualização anterior (caminhos iniciais definidos pelo conjunto $C_o^{(n)}$), bem como dos bloqueios nos arcos B_k e respectivos custos implícitos c_k e calcula-se o bloqueio médio na rede *bloqrede* e desvio máximo relativo dos bloqueios ponto-a-ponto $Desbl_{pp}$
2. Considere-se ainda o conjunto de caminhos correspondente ao bloqueio mínimo encontrado

para a rede, C_B^* , e C_D^* , o conjunto de caminhos correspondente ao mínimo desvio máximo relativo dos bloqueios ponto-a-ponto encontrado para a rede e faz-se: $C_B^* \leftarrow C_o^{(n)}$ e $C_D^* \leftarrow C_o^{(n)}$

3. $bloqminrede \leftarrow bloqrede$ e $bloqmindesblq_{pp} \leftarrow bloqrede$

Nota: O significado da variável $bloqmindesblq_{pp}$ é o de bloqueio mínimo conseguido para o qual o desvio máximo relativo dos bloqueios ponto-a-ponto correspondente é inferior ao limiar definido para a rede.

4. Para $Mcaminhos \leftarrow N * (N - 1)$ até $Mcaminhos = 1$ Faz

(a) $Nciclos \leftarrow 2$

(b) $Ncaminhos \leftarrow Mcaminhos$

(c) Considera a rede com os caminhos $C_o^{(n)}$

(d) Enquanto $Ncaminhos > 0$ e $Nciclos > 0$ Faz

i. Procura entre todos os caminhos de segunda escolha os $Ncaminhos$ com menor

$$(1 - L_{r^2(f)}) s_{r^2(f)}$$

ii. Para os pares O-D correspondentes a esses caminhos calcula os novos caminhos pelo MMRA; o conjunto de caminhos da rede correspondente é C_B^n

iii. Calcula os novos B_k , c_k , $bloqrede$ e $Desbl_{pp}$

iv. Se $bloqrede < bloqmindesblq_{pp}$ e $Desbl_{pp} < limiandesblq_{pp}$ Faz

(o que significa que se está a encontrar uma solução que é melhor do que a solução de partida do ponto de vista do bloqueio ponto-a-ponto e satisfaz um limiar estabelecido para o desvio máximo relativo do bloqueio ponto-a-ponto)

A. $C_D^* \leftarrow C_B^n$ (Guarda melhor solução de desvio máximo relativo de bloqueio ponto-a-ponto ou seja guarda os caminhos alternativos correspondentes)

B. $bloqmindebloq_{pp} \leftarrow bloqrede$

v. Se $bloqrede < bloqminrede$ Faz

A. $bloqminrede \leftarrow bloqrede$

B. $C_B^* \leftarrow C_B^r$ (guarda melhor solução de bloqueio, ou seja guarda os caminhos alternativos que correspondem ao menor bloqueio encontrado até ao momento na rede)

vi. Senão

A. $Ncaminhos \leftarrow Ncaminhos-1$

B. Considera a rede com os caminhos C_B^*

vii. Se $Ncaminhos = 0$ e $Nciclos = 2$ Faz

A. $Nciclos \leftarrow Nciclos - 1$

B. $Ncaminhos \leftarrow N * (N - 1)$

viii. Se $Ncaminhos = 0$ e $Nciclos = 1$ Faz

A. Se $bloqminrede < bloqmindesbloq_{pp}$ e $Desbl_{pp} < limiadesbloq_{pp}$

Faz

$C_D^* \leftarrow C_B^*$ (guarda melhor solução de desvio máximo relativo de bloqueio ponto-a-ponto ou seja guarda os caminhos alternativos correspondentes - que definem o conjunto C_D^*)

$bloqmindesbloq_{pp} = bloqminrede$

B. $Mcaminhos \leftarrow Mcaminhos-1$

(fim de (4d))

5. $C_o^{(n+1)} \leftarrow C_D^*$ (conjunto de caminhos seleccionado para a rede nesta iteração)

Os valores agora encontrados podem ser analisados nas figuras 14 e 15 (e consultados na tabela 3). Como se pode verificar, o que se perdeu nalguns casos em termos do desvio máximo

relativo dos bloqueios ponto-a-ponto compensou o que se ganhou em termos de bloqueio médio da rede, qualquer que sejam agora os caminhos iniciais. De notar que, dada a natureza discreta do problema, alguns dos valores dos desvios até melhoraram face aos anteriores. É de salientar que os limiares usados, obtidos empiricamente, foram os mesmos em sobrecargas idênticas, quaisquer que sejam os caminhos iniciais, embora variando com a sobrecarga. De forma geral verificou-se que o desvio máximo relativo dos bloqueios tende a diminuir com o factor de sobrecarga (ver figura 15 e tabela 4) pelo que o limiar considerado seguiu a mesma tendência.

4 Conclusões

Estudos analíticos do método MODR permitiram fazer uma análise prévia de desempenho global da rede utilizando esse método. Essa análise foi feita com base em medidas de QoS que se mostrou serem adequadas ao modelo biobjectivo que lhe é subjacente. Estes estudos conduziram ao desenvolvimento de uma versão melhorada do método, o MODR-2, que se mostrou bastante eficaz face a outros métodos de referência, relativamente aos quais pode beneficiar não só no tráfego médio transportado na rede, como ainda na melhoria das assimetrias, inerentes a outros métodos, no que diz respeito ao bloqueio ponto-a-ponto, protegendo assim fluxos com menor tráfego oferecido que, nesses métodos, tendem a ser preteridos face a fluxos de maior tráfego dada a sua natureza mono-objectivo. O modelo MODR-2 tem pois fortes potencialidades que poderão ser muito interessantes em redes multiserviço, para as quais, no entanto, há todo um trabalho de desenvolvimento e ajustamento a realizar.

A Custos Implícitos Negativos

De seguida apresenta-se um exemplo de encaminhamento para o qual os custos implícitos calculados são negativos. Este conjunto de caminhos foi encontrado para o tráfego oferecido e para as capacidades nos feixes definidos para a rede B, no caso em que não existia sobrecarga

| | | Carga Nominal | | 60% de Sobrecarga | |
|--------|-------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Método | Caminhos iniciais | Bloqueio médio (Confiança rel.) | Desv. máx. rel. bloq _{pp} | Bloqueio médio (Confiança rel.) | Desv. máx. rel. bloq _{pp} |
| RTNR | - | 0.002%(±49.7%) | 15.57 | 13.758(±0.3%) | 3.72 |
| MODR-1 | M | 0.0067% | 11.76 | 13.071% | 2.86 |
| | M' | 0.0067% | 11.76 | 13.412% | 3.71 |
| | M'' | 0.0067% | 11.76 | 12.974% | 2.78 |
| MODR-2 | M | 0.0068% | 9.78 | 13.071% | 2.86 |
| | M' | 0.0067% | 11.76 | 13.397% | 2.68 |
| | M'' | 0.0068% | 9.79 | 12.937% | 2.83 |
| | | 10% de Sobrecarga | | 70% de Sobrecarga | |
| RTNR | - | 0.062%(±11.8%) | 12.98 | 17.203%(±0.3%) | 3.24 |
| MODR-1 | M | 0.131% | 7.84 | 16.795% | 1.94 |
| | M' | 0.122% | 10.86 | 16.523% | 2.41 |
| | M'' | 0.131% | 7.83 | 16.783% | 1.93 |
| MODR-2 | M | 0.122% | 10.22 | 16.303% | 2.75 |
| | M' | 0.121% | 10.99 | 16.303% | 2.75 |
| | M'' | 0.122% | 10.22 | 16.142% | 2.70 |
| | | 20% de Sobrecarga | | 80% de Sobrecarga | |
| RTNR | - | 0.433%(±8.2%) | 8.41 | 20.395(±0.2%) | 2.90 |
| MODR-1 | M | 0.653% | 4.3 | 19.638% | 1.85 |
| | M' | 0.525% | 8.35 | 21.812% | 1.21 |
| | M'' | 0.653% | 4.3 | 19.923% | 1.69 |
| MODR-2 | M | 0.638% | 4.92 | 19.630% | 1.91 |
| | M' | 0.588% | 7.49 | 19.866% | 1.92 |
| | M'' | 0.638% | 4.92 | 19.630% | 1.91 |
| | | 30% de Sobrecarga | | 90% de Sobrecarga | |
| RTNR | - | 2.652(±4.0%) | 6.85 | 23.397%(±0.2%) | 2.65 |
| MODR-1 | M | 2.165% | 2.71 | 23.172% | 1.41 |
| | M' | 1.929% | 3.41 | 25.212% | 1.28 |
| | M'' | 2.165% | 2.71 | 23.119% | 1.54 |
| MODR-2 | M | 2.095% | 4.54 | 22.949% | 1.77 |
| | M' | 1.884% | 3.71 | 23.006% | 1.85 |
| | M'' | 2.095% | 4.54 | 22.909% | 1.78 |
| | | 40% de Sobrecarga | | 100% de Sobrecarga | |
| RTNR | - | 6.225%(±1.3%) | 5.40 | 26.183%(±0.2%) | 2.47 |
| MODR-1 | M | 6.226% | 1.76 | 26.104% | 1.33 |
| | M' | 6.433% | 1.48 | 27.617% | 1.1 |
| | M'' | 5.894% | 1.44 | 26.126% | 1.23 |
| MODR-2 | M | 5.810% | 1.43 | 26.104% | 1.33 |
| | M' | 5.810% | 1.43 | 26.133% | 1.46 |
| | M'' | 5.767% | 3.94 | 26.120% | 1.35 |
| | | 50% de Sobrecarga | | | |
| RTNR | - | 10.047%(±0.6%) | 4.35 | | |
| MODR-1 | M | 9.320% | 2.79 | | |
| | M' | 10.242% | 2.77 | | |
| | M'' | 9.899% | 4.16 | | |
| MODR-2 | M | 9.320% | 2.79 | | |
| | M' | 9.320% | 2.79 | | |
| | M'' | 9.367% | 3.97 | | |

Tabela 3: Bloqueios médios na rede para o MODR e bloqueios médios obtidos por simulação para o RTNR com um grau de confiança de 95% – Rede Mitra

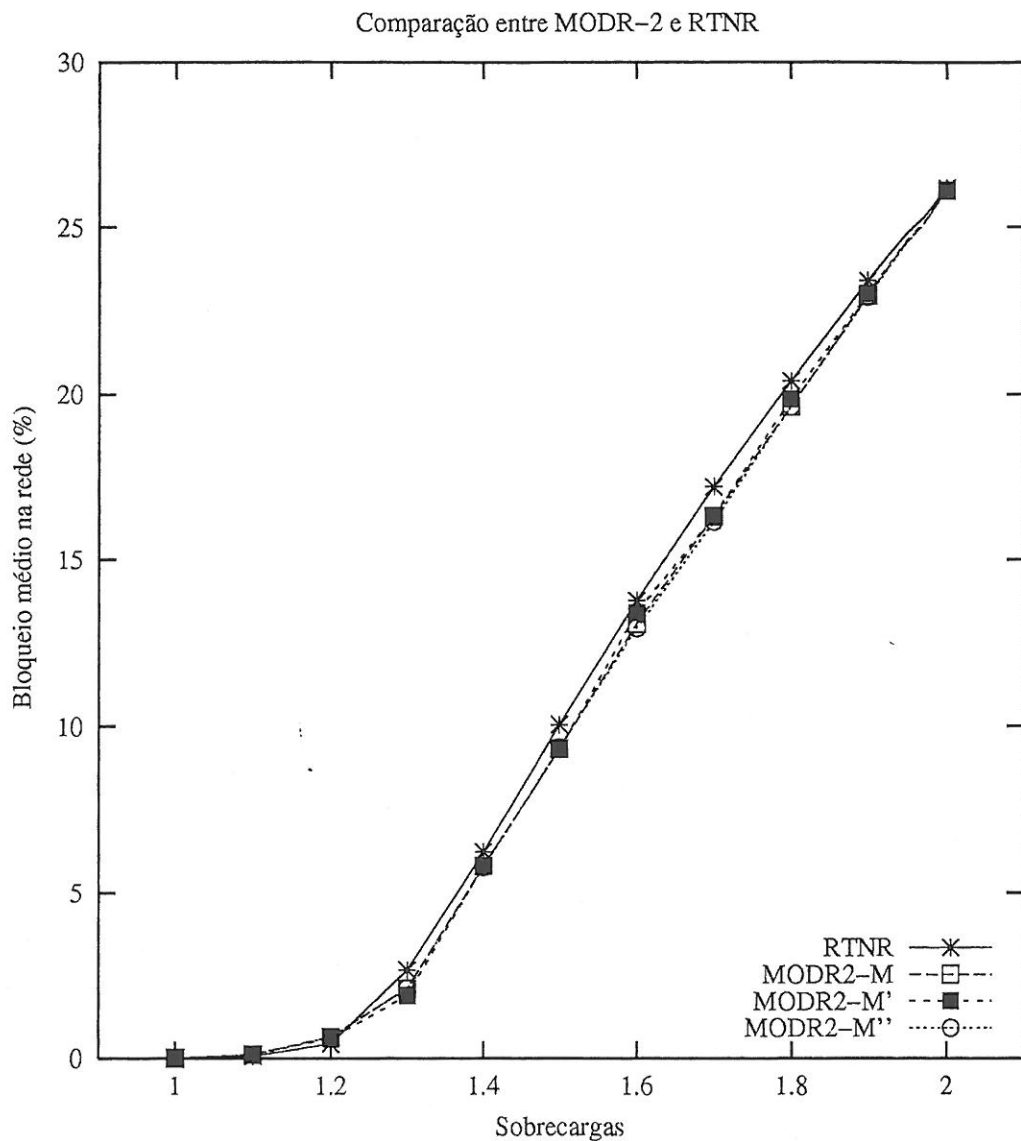


Figura 14: Comparação de valores de bloqueio total na rede entre o MODR-2 e o RTNR

de tráfego na rede e em que em cada iteração se procuram os novos caminhos para toda a rede. Os 1ºs caminhos podiam ser de um ou dois feixes. Estes caminhos são encontrados depois de 4 iterações e estão descritos na tabela 5.

O feixe para o qual os custos são negativos é o que interliga o nó 1 com o nó 4. Neste feixe

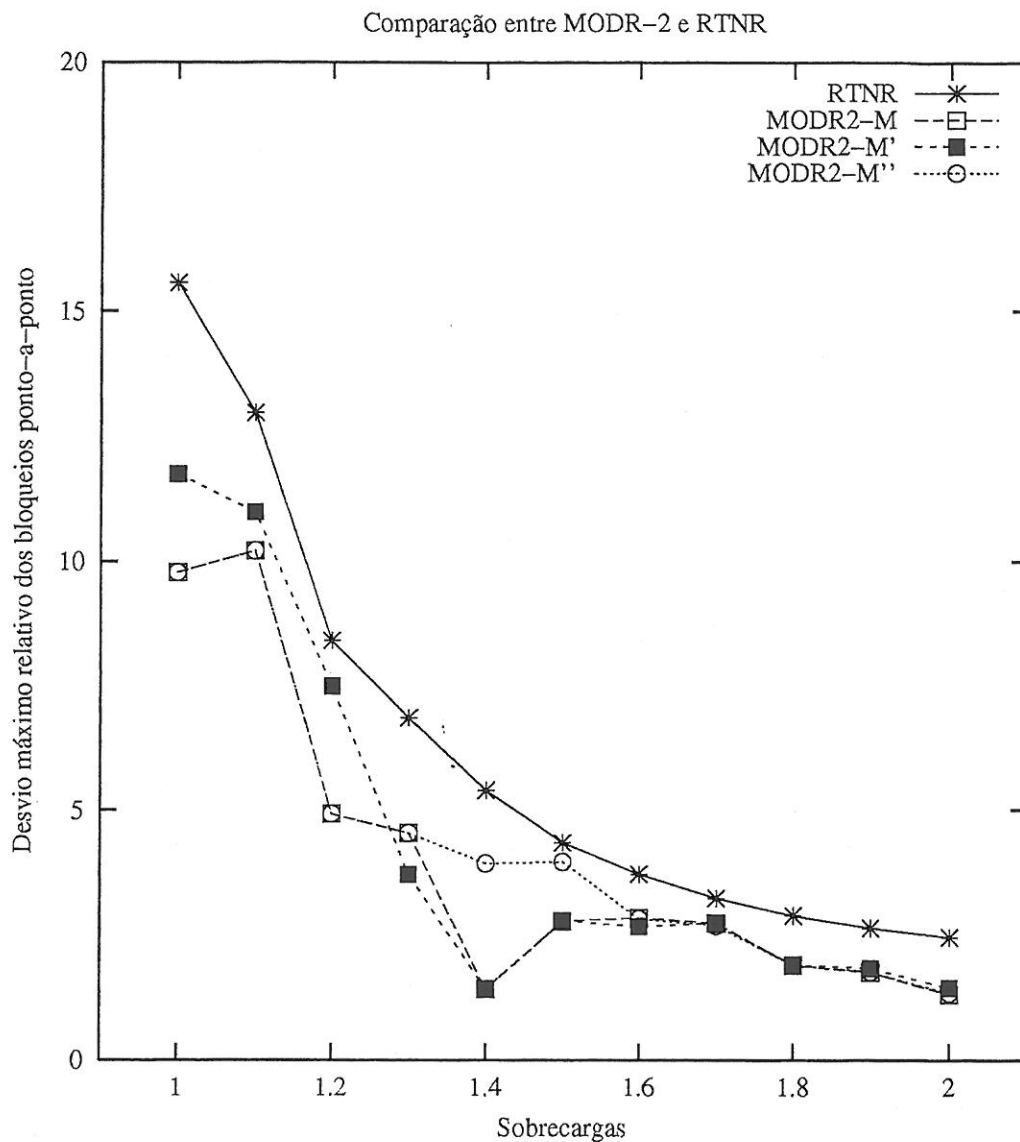


Figura 15: Comparação de desvio máximo relativo de bloqueios ponto-a-ponto na rede entre o MODR-2 e o RTNR

só passam os 1ºs caminhos $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ e $2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ cujos 2ºs caminhos são respectivamente $1 \rightarrow 2$ e $2 \rightarrow 1$. Então de acordo com as expressões (9)

$$s_{r^2(f)} = w(f) - \sum_{l_j \in r^2(f)} c_j$$

| Sobrecarga | Limite (<i>Desvio bloq_{pp}</i>) |
|------------|--|
| 0% | 12 |
| 10% | 11 |
| 20% | 8 |
| 30% | 6 |
| 40% | 5 |
| 50% | 4 |
| 60% | 3 |
| 70% | 3 |
| 80% | 2 |
| 90% | 2 |
| 100% | 2 |

Tabela 4: Limites obtidos experimentalmente para os desvios de bloqueio ponto-a-ponto

| Par O - D | Nó intermédio para o 1º caminho | Nó intermédio para o 2º caminho |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1-2 | 4 | - |
| 1-3 | 2 | 6 |
| 1-4 | 5 | 6 |
| 1-5 | - | 6 |
| 1-6 | - | 5 |
| 2-3 | - | 4 |
| 2-4 | - | 6 |
| 2-5 | 4 | 1 |
| 2-6 | 4 | 1 |
| 3-4 | 2 | 6 |
| 3-5 | 6 | 2 |
| 3-6 | - | 2 |
| 4-5 | - | 6 |
| 4-6 | - | 5 |
| 5-6 | 1 | 4 |

Tabela 5: Rede B - 1ºs e 2ºs Caminhos

$$s_{r^1(f)} = w(f) - \sum_{l_j \in r^1(f)} c_j - (1 - L_{r^2(f)}) s_{r^2(f)} \quad (9)$$

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|----------|---------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | | 0.128746 | 0 | 1.34862e-233 | 0.846632 | 0.769003 |
| 2 | | | 0.32768 | 0.431868 | 2.08918e-138 | 1.4728e-44 |
| 3 | | | | 1.6555e-06 | 0 | 0.200397 |
| 4 | | | | | 0.659325 | 0.71656 |
| 5 | | | | | | 6.37008e-26 |
| 6 | | | | | | |

Tabela 6: Matriz de Bloqueios nos Feixes

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|----------|----------|---------------|--------------|-------------|
| 1 | | 0.380022 | 0 | -7.02582e-232 | 0.545495 | 0.574746 |
| 2 | | | 0.631005 | 0.65991 | 6.71264e-137 | 3.82282e-43 |
| 3 | | | | 7.50247e-06 | 0 | 0.478615 |
| 4 | | | | | 0.678736 | 0.680904 |
| 5 | | | | | | 1.88912e-24 |
| 6 | | | | | | |

Tabela 7: Matriz de Custos Implícitos

vem:

$$\begin{aligned}
 s_{r^2}(f_{2,1}) = s_{r^2}(f_{1,2}) &= 1 - c_{2,1} = 1 - 0.380022 \\
 s_{r^1}(f_{2,1}) + c_{4,1} = s_{r^1}(f_{1,2}) + c_{1,4} &= 1 - c_{4,2} - (1 - B_{2,1})s_{r^2}(f_{1,2}) \\
 &= 1 - 0.65991 - (1 - 0.128746)(1 - 0.380022) = -0.2\dots
 \end{aligned}$$

que, depois de substituído em (10) resulta para $c_{1,4}$ um valor negativo⁴ (de notar que não existe, neste caso, a segunda parcela de (10)).

$$c_k = \eta_k(1 - B_k)^{-1} \left[\sum_{f:l_k \in r^1(f)} \lambda_{r^1(f)} (s_{r^1(f)} + c_k) + \sum_{f:l_k \in r^2(f)} \lambda_{r^2(f)} (s_{r^2(f)} + c_k) \right] \quad (10)$$

Nos estudos efectuados, os custos negativos só apareceram quando os 1^{os} caminhos podiam ter dois feixes. De uma forma muito simples, os custos implícitos negativos aparecem associados

⁴ $\eta_k = [E(\rho_k, C_k - 1) - E(\rho_k, C_k)]$

a feixes pertencentes a 1ºs caminhos com dois feixes cujos segundos caminhos, normalmente os feixes directos, têm uma probabilidade de bloqueio mais baixa (a que corresponde geralmente custos implícitos também mais baixos). Verificou-se que mesmo que estes 1ºs caminhos tenham sido seleccionados por terem menor bloqueio do que o feixe directo, logo após a sua selecção, o bloqueio provocado pelo seu uso pode logo aumentar para valores superiores aos do feixe directo constituinte do 2º caminho dando origem assim a estes custos negativos. As matrizes de bloqueio nos feixes e de custos implícitos que deram origem à selecção dos caminhos anteriores são, respectivamente, as tabelas 9 e 10 e resultam do encaminhamento descrito na tabela 8.

| Par O - D | Nó intermédio para o 1º caminho | Nó intermédio para o 2º caminho |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1-2 | - | 3 |
| 1-3 | 4 | - |
| 1-4 | - | 3 |
| 1-5 | 3 | 2 |
| 1-6 | 2 | 3 |
| 2-3 | 6 | 1 |
| 2-4 | 1 | 3 |
| 2-5 | - | 6 |
| 2-6 | - | 5 |
| 3-4 | - | 1 |
| 3-5 | - | 6 |
| 3-6 | - | 5 |
| 4-5 | 3 | 2 |
| 4-6 | 3 | 2 |
| 5-6 | 3 | 2 |

Tabela 8: Rede B - 1ºs e 2ºs Caminhos

De acordo com estas tabelas os caminhos $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ e $2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ têm de bloqueio e custos respectivamente os valores 0.0790369 e 0.74381 e os 2ºs caminhos $1 \rightarrow 2$ e $2 \rightarrow 1$ têm respectivamente 0.715917 e 0.354343, donde o 1º caminho foi seleccionado por ter bloqueio mais baixo (e por pertencer a uma região de prioridade mais baixa).

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|----------|-------------|-------------|----------|------------|
| 1 | 0.715917 | 0.772948 | 0.0790369 | 0 | 0 |
| 2 | | 9.77241e-05 | 2.21156e-12 | 0.657934 | 0.653844 |
| 3 | | | 0.869918 | 0.833187 | 0.686712 |
| 4 | | | | 0 | 0 |
| 5 | | | | | 4.1768e-34 |
| 6 | | | | | |

Tabela 9: Matriz de Bloqueios nos Feixes

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|----------|-------------|-------------|----------|-------------|
| 1 | 0.354343 | 0.669677 | 0.74381 | 0 | 0 |
| 2 | | 0.000401714 | 2.20452e-11 | 0.83228 | 0.823335 |
| 3 | | | 0.771401 | 0.569755 | 0.504566 |
| 4 | | | | 0 | 0 |
| 5 | | | | | 8.03418e-33 |
| 6 | | | | | |

Tabela 10: Matriz de Custos Implícitos

Nos casos em que podiam ser seleccionados 1^os caminhos com 2 feixes, só quando se usa como métrica única o bloqueio e se determinam os caminhos para toda a rede numa só iteração é que, para qualquer das redes usadas, os custos nunca foram (nos estudos efectuados) negativos ⁵(embora isto já não se verificou quando se determinam, em cada iteração, os caminhos apenas para um par de nós). Verificou-se também que, para valores de sobrecarga superiores, os 1^os caminhos com dois feixes tendem a desaparecer, o que conduz ao desaparecimento também de custos negativos.

⁵Embora se esteja a usar apenas o bloqueio como métrica única, os custos continuam a ser calculados

B Exemplo de Resultados para uma Sequência Longa de Cálculos

Foram realizadas sequências longas de cálculos em que o número de iterações foram significativamente superiores aos considerados nos exemplos anteriores para o caso do MODR alterado. A seguir mostra-se os resultados obtidos quando foram realizadas 10000*30 e 100*30 iterações. Os valores referem-se apenas às últimas 50*30 iterações em cada caso. Como se pode verificar

| 100 * 30 iter./0% sobrec | MODR – Alterado | Custos | Bloqueios |
|-----------------------------|-----------------|---------|-----------|
| méd. | 944.741 | 944.88 | 944.431 |
| máx. | 945.382 | 945.291 | 945.243 |
| min. | 943.482 | 943.896 | 942.541 |
| 100 * 30 iter./30% sobrec | | | |
| méd. | 960.428 | 1019.68 | 932.559 |
| máx. | 972.606 | 1020.75 | 943.718 |
| min. | 941.275 | 1018.71 | 921.06 |
| 10000 * 30 iter./0% sobrec | | | |
| méd. | 944.824 | 944.855 | 944.333 |
| máx. | 945.261 | 945.338 | 954.341 |
| min. | 944.19 | 944.169 | 942.8 |
| 10000 * 30 iter./30% sobrec | | | |
| méd. | 962.417 | 1019.72 | 933.686 |
| máx. | 978.333 | 1020.75 | 949.776 |
| min. | 945.666 | 1018.71 | 922.912 |

Tabela 11: Tráfego transportado ao fim de 1000*30 e 100*30 iterações – Rede B

na tabela 11, os valores encontrados para o tráfego transportado na rede ao fim de 10000 iterações não divergem significativamente dos encontrados ao fim de 100 iterações, tal como já foi referido antes. No entanto os custos conduzem a uma maior convergência dos resultados do que o bloqueio ou a combinação das duas métricas, como seria de esperar.

Na tabela 12 vê-se que os custos simplificados, quando considerados isoladamente ao fim de 10000 iterações, conduzem a valores de tráfego transportado que são idênticos aos obtidos com

| 100 * 30 iter./0% sobrec | MODR – Alt. Cust. Simpl. | Custos Simplificados |
|-----------------------------|--------------------------|----------------------|
| méd. | 944.839 | 944.835 |
| máx. | 945.29 | 945.237 |
| min. | 943.586 | 944.266 |
| 100 * 30 iter./30% sobrec | | |
| méd. | 948.113 | 1019.62 |
| máx. | 963.439 | 1020.75 |
| min. | 932.88 | 1018.71 |
| 10000 * 30 iter./0% sobrec | | |
| méd. | 944.836 | 944.87 |
| máx. | 945.392 | 945.281 |
| min. | 943.434 | 944.213 |
| 10000 * 30 iter./30% sobrec | | |
| méd. | 948.671 | 1019.66 |
| máx. | 966.499 | 1020.75 |
| min. | 933.629 | 1018.71 |

Tabela 12: Tráfego transportado ao fim de 1000*30 e 100*30 iterações – Rede B com custos simplificados

os custos correctos. Quando combinados com o bloqueio no MMRA, ao fim de 10000 iterações, os valores, embora aos inferiores aos obtidos com os custos correctos, são, no entanto, muito próximos dos obtidos ao fim de 100 iterações (também com os custos simplificados).

Referências

- [1] G. R. Ash, R. H. Cardwell, and R. P. Murray. Design and optimization of networks with dynamic routing. *Bell Syst. Tech. J.*, 60(8):1787–1820, October 1981.
- [2] José Craveirinha, Lúcia Martins, Teresa Gomes, C.H. Antunes, and J. Clímaco. Formulation of a multiple objective dynamic routing method using implied costs - architecture and algorithms. Technical Report ET-N8-3, INESC-Coimbra, February 2001.
- [3] José Craveirinha, Lúcia Martins, Teresa Gomes, C.H. Antunes, and J. Clímaco. A new

- multiple objective dynamic routing method using implied costs. *Telecommunications and Information Technology*, (Número especial dedicado à conferência Decision Support for Telecommunications and Information Society), 2001.
- [4] Luísa Maria Garcia Jorge. Um estudo simulacional de redes inter-centrais com encaminhamento dinâmico incluído redes com integração de serviços. Master's thesis, Universidade de Coimbra, 2001.
- [5] F. P. Kelly. Routing in circuit-switched networks: Optimization, shadow prices and decentralization. *Adv. Appl. Prob.*, (20):112–144, 1988.
- [6] Lúcia Martins, José Craveirinha, Teresa Gomes, C.H. Antunes, and J. Clímaco. Formulação de um método multi-objectivo de encaminhamento dinâmico do tipo PSDR. Technical Report ET-N8-2, INESC-Coimbra, January 2001.
- [7] Debasis Mitra and Judith B. Seery. Comparative evaluation of randomized and dynamic routing strategies for circuit-switched networks. *IEEE Transactions on Communications*, 39(1):102–116, January 1991.