



**Abel Ricardo Correia**

**Planeamento e Dimensionamento de Redes Ópticas  
com Encaminhamento ao Nível da Camada Óptica**



**Abel Ricardo Correia**

**Planeamento e Dimensionamento de Redes Ópticas  
com Encaminhamento ao Nível da Camada Óptica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Armando Nolasco Pinto, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

UA-SD



290229

## **O júri**

Presidente

Vogal

Doutor José Rodrigues Ferreira da Rocha, Professor Catedrático da U. Aveiro

Doutor João José de Oliveira Pires, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica e Computadores do Instituto Superior Técnico da U. Técnica de Lisboa

Vogal

Doutor Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto, Professor Auxiliar da U. Aveiro

Dedico este trabalho à minha esposa Carla pelo incansável apoio. Agradeço também o apoio sempre pronto dos Amigos Claunir Pavan e Rui Morais.

## palavras-chave

Redes ópticas, Dimensionamento, redes em malha, modelar, análise de custos

## resumo

No presente trabalho analisa-se o problema do dimensionamento de redes ópticas de segunda geração. Redes ópticas de segunda geração são redes com capacidade de encaminhamento ao nível da camada óptica.

O dimensionamento de uma rede óptica consiste em especificar a quantidade de recursos necessários para transportar um dado tráfego. A abordagem a este problema é frequentemente realizada através de processamento numérico extensivo, sendo necessário um conhecimento detalhado da topologia de rede para criar o modelo numérico. O tempo requerido para obter a solução numérica cresce exponencialmente com o tamanho e a complexidade da rede.

Nesta dissertação aferimos se uma avaliação preliminar do problema do dimensionamento pode ser obtida através de uma abordagem analítica. Quantificamos ainda o grau de precisão dos resultados obtidos com esta abordagem. De forma a atingir este objectivo começámos por estudar e validar um modelo analítico apresentado na literatura especializada e posteriormente refinámos o modelo de forma a melhorar os resultados obtidos.

O primeiro capítulo da dissertação é dedicado à introdução, neste capítulo apresentamos os conceitos fundamentais no que se refere a redes de transporte. Mostramos também os pressupostos sobre a arquitectura dos sistemas de transmissão e nós considerados nesta dissertação. No capítulo II são apresentados os conceitos fundamentais sobre o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte não considerando capacidade de restauro, a inclusão da capacidade de restauro é considerada no capítulo III. No capítulo IV é apresentado o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte considerando as variáveis anteriormente apresentadas. No capítulo V aplicamos o modelo apresentado a oito redes de referência. Realizamos ainda uma comparação entre os nossos resultados analíticos e os resultados obtidos usando uma ferramenta numérica de dimensionamento. O último capítulo é dedicado às conclusões.

Nesta dissertação comprovamos a possibilidade de tratar o problema do dimensionamento em redes ópticas de forma analítica. Comparando os resultados obtidos, com a abordagem analítica e os alcançados usando uma ferramenta numérica de dimensionamento, verificamos que a abordagem analítica permite obter resultados com um erro na ordem dos 10%. Identificamos como parâmetros críticos do dimensionamento o número médio de saltos,  $\langle h \rangle$ , e o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ . No presente trabalho é apresentada uma aproximação estatística, considerando 2 milhões de redes, para determinar estes dois parâmetros fundamentais.

**keywords**

Optical networks, Dimensioning, mesh networks, modeling, cost analysis

**abstract**

In this dissertation the problem of dimensioning second generation optical networks is analyzed. Second generation optical networks are networks with optical routing capabilities

The dimensioning of an optical network consists in specifying the amount of required resources to carry a given traffic. This problem is often tackled using an extensive numerical treatment. To build a numerical model a complete knowledge of the network is required. Besides that the computational time required to solve the numerical model grows exponentially with network size and complexity.

In this dissertation we evaluate if a preliminary result for the dimensioning problem can be obtained through an analytical approach. We also quantify the accuracy of the results obtained with this approach. In order to achieve this goal we started by studying and validating an analytical model proposed in the literature. After, we improve this model to increase the results accuracy.

The first chapter of this dissertation is dedicated to the introduction, we provide the basic concepts related with transport networks. We show also the assumptions on the architecture of the transmission systems and nodes considered in this work. In Chapter II are presented the fundamental concepts of the cost model and needs of a transport networks not considering restoration capability, the inclusion of the restoration is considered in Chapter III. In Chapter IV is presented the model of costs and needs of a transport network considering the variables previously presented. In Chapter V we apply the model presented to eight networks of reference. We made a comparison between our analytical results and the results obtained using a numerical commercial tool. The last chapter is dedicated to conclusions.

In this dissertation we prove the possibility of obtaining preliminary results for the dimensioning problem in optical networks using an analytical approach. Comparing the analytical results with the numerical ones, we verify that the analytical approach gives results with an error in the order of 10%. We identify as critical parameters of the dimensioning the average number of hops,  $\langle h \rangle$ , and the coefficient of restoration,  $\langle k \rangle$ . In this work we also present a statistical approach, considering 2 million of networks, to determine these two basic parameters.

# Planeamento e Dimensionamento de Redes Ópticas com Encaminhamento ao Nível da Camada Óptica

## Lista de Notações

|       |  |
|-------|--|
| 10 GE | Gigabit Ethernet.                        |
| ATM   | Asynchronous Transfer Mode.              |
| CD    | Transponder Curta Distância.             |
| DCF   | Dispersion Compensating Fiber.           |
| DEMUX | Desmultiplexer Óptico.                   |
| DVB   | Digital Video Broadcasting.              |
| DXC   | Digital Cross Connect.                   |
| EXC   | Electrical Cross Connect.                |
| FEC   | Forward Error Correction.                |
| FRL   | Frame Relay.                             |
| IP    | Internet Protocol.                       |
| LD    | Transponder Longa Distância.             |
| MUX   | Multiplexer Óptico.                      |
| OCh   | Canal Óptico.                            |
| OLT   | Optical Line Termination.                |
| OTN   | Optical Transport Network.               |
| OXC   | Optical Cross Connect.                   |
| PDH   | Plesiochronous Digital Hierarchy.        |
| POTS  | Plain Old Telephone Service.             |
| RDIS  | Rede Digital com Integração de Serviços. |
| SDH   | Synchronous Digital Hierarchy.           |
| SPR   | Shortest Path Restoration.               |
| STM-N | Synchronous Transport Modules N.         |
| VC    | Virtual Container.                       |
| WDM   | Wavelength Division Multiplexing.        |



## Lista de Símbolos

|                           |   |
|---------------------------|---|
| A                         | Área geográfica coberta pela rede.  |
| $C_{BWM}$                 | Custos de gestão de largura de banda.   |
| $C_{BWMeo}$               | Custo de gestão de largura de banda eléctrico e óptico.                             |
| $C_{EXC}$                 | Custos dos EXCs.  |
| $\langle C_{EXC} \rangle$ | Custo médio dos EXC.  |
| $C_i$                     | Custo individual de cada elemento de rede i.  |
| $c_l$                     | Custo da ligação l.   |
| $\langle c_l \rangle$     | Custo médio das ligações.   |
| $c_n$                     | Custo do nó n.  |
| $\langle c_n \rangle$     | Custo médio dos nós.  |
| $C_{OXC}$                 | Custo de gestão óptica.   |
| $\langle C_{OXC} \rangle$ | Custo médio de gestão óptica.   |
| $C_r^n$                   | Combinações sem repetição.  |
| $C_T$                     | Custo total.  |
| $C_{trans}$               | Custo de transmissão.   |
| D                         | Número de pedidos bidireccionais.   |
| $D_1$                     | Número de pedidos unidireccionais.  |
| $\langle d \rangle$       | Número médio de pedidos.  |
| [d]                       | Matriz de pedidos.  |
| $d_{ij}$                  | Elemento ij da matriz pedidos.  |
| $f_d$                     | Número de saltos que o pedido d tem que atravessar.                                 |
| [g]                       | Matriz de adjacência.   |
| $g_{ij}$                  | Elemento ij da matriz adjacência.   |
| H                         | Diâmetro da rede.   |
| $\langle h \rangle$       | Número médio de saltos por pedido.  |
| [h]                       | Matriz de saltos.   |
| $H_c$                     | Distância do nó central ao nó mais distante.  |
| $h_{ij}$                  | Elemento ij da matriz de saltos.  |
| $h_T$                     | Número total de saltos.   |
| $\langle k \rangle$       | Coeficiente de restauro.  |
| $k_l$                     | Coeficiente de restauro na ligação l.   |
| L                         | Número de ligações.   |
| $L_{ij}$                  | Número total de ligações distintas percorridas pelos diferentes caminhos possíveis. |
| $L_{max}$                 | Número máximo de ligações numa rede.  |
| $L_{min}$                 | Número mínimo ligações numa rede.   |

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $N$                        | Número de nós.   |
| $N_h$                      | Número de nós à distância mínima $h$ do nó central.                          |
| $[o]$                      | Matriz de encaminhamento canais ópticos.                                     |
| $[o^f]$                    | Matriz de encaminhamento com falha na ligação $f$ .                          |
| $o_{ij}$                   | Canais ópticos activos na ligação $i,j$ .                                    |
| $[o^s]$                    | Matriz com capacidade extra para possibilitar restauro em caso de uma falha. |
| $\langle P \rangle$        | Número médio de portos.  |
| $P_1$                      | Portos de entrada unidireccionais.   |
| $\langle P_1 \rangle$      | Número médio de portos de entrada.   |
| $P_2$                      | Portos bidireccionais.   |
| $\langle P_2 \rangle$      | Número médio de portos bidireccionais.                                       |
| $\langle P_{ADD} \rangle$  | Número médio de portos de entrada.   |
| $\langle P_{DROP} \rangle$ | Número médio de portos de saída.   |
| $P_{ij}$                   | Portos de entrada.   |
| $P_{k,ij}$                 | Probabilidade da ligação $k$ ser escolhida.                                  |
| $\langle P^k \rangle$      | Número médio de portos considerando restauro.                                |
| $\langle P_{Line} \rangle$ | Número médio de portos de linha.   |
| $\langle P_{THRU} \rangle$ | Número médio de portos de passagem.  |
| $\langle P_{Term} \rangle$ | Número médio de portos terminal.   |
| $R$                        | Número total de encaminhamentos possíveis.                                   |
| $[r]$                      | Matriz do número de caminhos.  |
| $\langle s \rangle$        | Comprimento médio das ligações.  |
| $S_i$                      | Comprimento do sistema de transmissão.                                       |
| $S_N$                      | Número de simulações.  |
| $T$                        | Tráfego total na rede.   |
| $T_{N,L}$                  | Número de topologias sobreviventes.  |
| $T_{op}$                   | Número Total de Topologias   |
| $V_i$                      | Elementos de rede do tipo $i$ .  |
| $W^0$                      | Número de canais ópticos.  |
| $\langle W^0 \rangle$      | Número médio de canais ópticos por ligação.                                  |
| $W^0_l$                    | Número de canais ópticos na ligação $l$ .                                    |
| $W^0_{ij}$                 | Número de canais ópticos na ligação $ij$ .                                   |
| $W_{l,r}$                  | Número de canais ópticos na ligação $l$ no encaminhamento $r$ .              |
| $[W_r]$                    | Matriz de encaminhamentos.   |
| $W_{rij}$                  | Número de canais na ligação $ij$ , quando utilizado o encaminhamento $r$ .   |
| $W^k$                      | Número de canais ópticos considerando restauro.                              |
| $\langle W^k \rangle$      | Número médio de canais ópticos por ligação.                                  |

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| $W_{ij}^k$                      | Número total canais ópticos na ligação ij.                         |
| $W_l^k$                         | Número total canais ópticos na ligação l.                          |
| $X_{r,d,l}$                     | Elementos do vector ligação.                                       |
| $\tau$                          | Largura de banda por pedido.                                       |
| $\delta$                        | Grau do nó.  |
| $\langle \delta \rangle$        | Grau médio dos nós.  |
| $\langle \delta_{\max} \rangle$ | Grau médio máximo dos nós.   |
| $\langle \delta_{\min} \rangle$ | Grau médio mínimo dos nós.   |
| $\langle \Psi \rangle$          | Número médio de canais ópticos extra.                              |
| $\Psi_l$                        | Número de canais ópticos extra na ligação l.                       |
| $\Psi_{ij}$                     | Número de canais ópticos extra na ligação ij.                      |
| $\gamma_{B-s}$                  | Constante de custo para sistema de transmissão.                    |
| $\gamma_{e0}$                   | Constante de custo base comutador eléctrico.                       |
| $\gamma_{e1}$                   | Constante de custo proporcional ao tráfego do comutador eléctrico. |
| $\gamma_{ep}$                   | Constante de custo do comutador eléctrico.                         |
| $\gamma_{o0}$                   | Constante de custo base comutador óptico.                          |
| $\gamma_{o1}$                   | Constante de custo de crescimento comutador óptico.                |
| $\gamma_{op}$                   | Constante de custo do comutador óptico.                            |
| $\gamma_{t0}$                   | Constante de custo fixos na ligação.                               |
| $\gamma_{t1}$                   | Constante de custo dependentes número de canais ópticos.           |
| $\gamma_{t2}$                   | Constante de custo dependentes da distância.                       |
| $\gamma_{t3}$                   | Constante de custo que crescem com produto distância.              |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1.1 Ligação SDH.   | 2  |
| Fig. 1.2 Rede primeira geração.   | 3  |
| Fig.1.3 Rede segunda geração.   | 4  |
| Fig. 1.4 Arquitectura do sistema de transmissão.  | 5  |
| Fig. 1.5 Arquitectura nó exclusivamente eléctrico.  | 7  |
| Fig. 1.6 Arquitectura do nó eléctrico e óptico.   | 8  |
| Fig. 1.7 a) Protecção b) Restauro.  | 9  |
| Fig. 1.8 Rede Exemplo, nós eléctricos.  | 10 |
| Fig. 1.9 Equipamento terminal WDM e regenerador eléctrico.  | 13 |
| Fig. 1.10 Arquitectura rede exemplo com protecção.  | 15 |
| Fig. 1.11 Rede Exemplo, nós eléctricos e ópticos.   | 16 |
| Fig. 1.12 Arquitectura rede exemplo com restauro.   | 20 |
|   |    |
| Fig. 2.1-a) Grafo de rede; b) Correspondente representação matricial.                                       | 26 |
| Fig. 2.2 Rede 4-regular, com número de nós a tender para infinito.  | 30 |
| Fig. 2.3 Árvore de Moore para uma rede regular com diâmetro 3.  | 33 |
| Fig. 2.4 Rede 3-regular, com H=3 e N=20.  | 34 |
| Fig. 2.5 Árvore de Moore rede 3-regular, com H=3 e N=20.  | 34 |
| Fig. 2.6 Topologias de redes: a) Rede com L mínimo b) Rede com L máximo.                                    | 36 |
| Fig. 2.7 Algoritmo determinar o valor médio de saltos por pedido.   | 38 |
| Fig. 2.8 Histogramas com número médio de saltos para pares<br>a)(15,19);b)(15,33);c)(100,125);d)(100,224).  | 39 |
| Fig. 2.9- a) Média numero de saltos, $\langle h \rangle$ , em redes com $\langle \delta \rangle \sim 2.5$ . | 41 |
| Fig. 2.9-b) Média numero de saltos, $\langle h \rangle$ , em redes com $\langle \delta \rangle \sim 3$ .    | 42 |
| Fig. 2.9-c) Média numero de saltos, $\langle h \rangle$ , em redes com $\langle \delta \rangle \sim 3.5$ .  | 42 |
| Fig. 2.9-d) Média numero de saltos, $\langle h \rangle$ , em redes com $\langle \delta \rangle \sim 4$ .    | 43 |
| Fig. 2.9-e) Média numero de saltos, $\langle h \rangle$ , em redes com $\langle \delta \rangle \sim 4.5$ .  | 43 |
| Fig. 2.10 Erro médio quadrático das aproximações.   | 44 |
| Fig. 2.11 Encaminhamento pedidos, rede exemplo.   | 46 |
| Fig. 2.12 Exemplo cálculo probabilidade.  | 48 |
|   |    |
| Fig. 3.1 Fluxograma do algoritmo para determinar o coeficiente de restauro.                                 | 58 |
| Fig. 3.2 Ilustração do algoritmo para determinar o coeficiente de restauro.                                 | 60 |
| Fig. 3.3 Comportamento da aproximação(3.12) considerando 20000 redes<br>a)N=6;b)N=40;c)N=75;d)N=100.        | 66 |
| Fig. 3.4 Três topologias diferentes com N= 15 e com $\langle \delta \rangle \sim 3.33$ .                    | 66 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 3.5 Partilha de recursos vs. coeficiente de restauro em função de N e com $\langle \delta \rangle \approx 3.5$ .                               | 68  |
| Fig. 3.6 Coeficiente de restauro em função de N e com $\langle \delta \rangle \approx 3.5$ .  | 69  |
| Fig. 3.7 Erro quadrado médio considerando as aproximações (3.14) e (3.20).  | 70  |
| Fig. 3.8 Rede exemplo 3 portos de entrada.  | 71  |
| Fig. 3.9 Portos no comutador.   | 73  |
| Fig. 3.10 Portos no nó.   | 74  |
| Fig. 3.11 Portos no comutador considerando capacidade de restauro.  | 76  |
| Fig. 3.13 Função $f(x)$ em relação à variação do grau do nó.  | 78  |
| <br>  |     |
| Fig. 4.1 Variação de $d(\langle \delta \rangle)$ com o grau do nó .   | 85  |
| Fig. 4.2 Variação custo gestão largura de banda com o tráfego por nó a) N=5 b) N=10<br>c) N=20 d) N=40 e) N=60 f) N=80 g) N=100 h) N=120.           | 96  |
| Fig. 4.3 Variação tráfego por nó para que $C_{exc} = C_{exc+oxc}$ .   | 97  |
| Fig. 4.3 Variação largura de banda por pedido para que $C_{exc} = C_{exc+oxc}$ .  | 97  |
| <br>  |     |
| Fig. 5.1 Média do número de saltos por pedido (diferentes aproximações).  | 103 |
| Fig. 5.2 Coeficiente de restauro.   | 106 |
| Fig. 5.3 Média do número de canais considerando o valor exacto de $\langle h \rangle$ e restauro.   | 108 |
| Fig. 5.4 Média do número de canais considerando o valor exacto de $\langle h \rangle$ e restauro.   | 108 |
| Fig. 5.5 Média do número de canais considerando $\langle k \rangle$ exacto e as aproximações para $\langle h \rangle$ .                             | 110 |
| Fig. 5.6 Média do número de canais considerando $\langle k \rangle$ exacto e as aproximações para $\langle h \rangle$ .                             | 110 |
| Fig. 5.7 Média do número de canais considerando aproximação (3.12) para $\langle k \rangle$ exacto<br>e as aproximações para $\langle h \rangle$ .  | 111 |
| Fig. 5.8 Média do número de canais considerando aproximação (3.12) para $\langle k \rangle$ exacto<br>e as aproximações para $\langle h \rangle$ .  | 111 |
| Fig. 5.9 Média do número de canais considerando aproximação (3.18) para $\langle k \rangle$ exacto<br>e as aproximações para $\langle h \rangle$ .  | 112 |
| Fig. 5.10 Média do número de canais considerando aproximação (3.18) para $\langle k \rangle$ exacto<br>e as aproximações para $\langle h \rangle$ . | 112 |
| Fig. 5.11 Média do número de portos considerando as aproximações para $\langle h \rangle$ .   | 117 |
| Fig. 5.12 Média do número de portos considerando as aproximações para $\langle h \rangle$ , rede Korotky (EUA).                                     | 117 |
| <br>  |     |
| Fig. 5.13 Média de portos considerando capacidade restauro.   | 119 |
| Fig. 5.14 Média de portos considerando capacidade restauro, rede Korotky (EUA).   | 120 |
| Fig. 5.15 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e $\langle k \rangle$ exacto.                               | 123 |
| Fig. 5.16 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e $\langle k \rangle$ exacto,<br>rede Korotky (EUA).        | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 5.17 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e a aproximação (3.12) para $\langle k \rangle$ .                     | 124 |
| Fig. 5.18 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e a aproximação (3.12) para $\langle k \rangle$ , rede Korotky (EUA). | 125 |
| Fig. 5.19 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e a aproximação (3.18) para $\langle k \rangle$ .                     | 125 |
| Fig. 5.20 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e a aproximação (3.18) para $\langle k \rangle$ , rede Korotky (EUA). | 126 |
| Fig. 5.21 Custos de transmissão primeira aproximação.   | 127 |
| Fig. 5.22 Custos de transmissão primeira aproximação, rede Korotky (EUA).   | 128 |
| Fig. 5.23 Custos de transmissão segunda aproximação.  | 130 |
| Fig. 5.24 Custos de transmissão segunda aproximação.  | 130 |
| Fig. 5.25 Custos de transmissão dois modelos.   | 132 |
| Fig. 5.26 Custos de transmissão dois modelos, rede Korotky (EUA).   | 132 |
| Fig. 5.27 Custos de gestão de largura de banda exclusivamente eléctrica – duas aproximações.  | 133 |
| Fig. 5.28 Custos de gestão de largura de banda exclusivamente eléctrica – duas aproximações.  | 134 |
| Fig. 5.29 Custos de gestão de largura de banda eléctrica e óptica – duas aproximações.  | 136 |
| Fig. 5.30 Custos de gestão de largura de banda eléctrica e óptica – duas aproximações.  | 136 |
| Fig. 5.31 Custo total redes referência.   | 138 |
| Fig. 5.32 Custo total redes referência, rede Korotky (EUA).   | 139 |

## Lista de Tabelas

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1.1 Resultado do OPNET relativo ao custo total da rede exemplo.  | 11  |
| Tabela 1.2 Resultado do OPNET relativo ao custo das ligações.   | 11  |
| Tabela 1.3 Resultado do OPNET relativo ao custo dos nós.  | 14  |
| Tabela 1.4 Resultado do OPNET relativo ao custo total da rede exemplo.  | 16  |
| Tabela 1.5 Resultado do OPNET relativo ao custo das ligações.   | 18  |
| Tabela 1.6 Resultado do OPNET relativo aos custos associados ao EXC.  | 19  |
| Tabela 1.7 Resultado do OPNET relativo aos custos associados ao OXC.  | 20  |
| <br>  |     |
| Tabela 2.1 Resumo das variáveis apresentadas no Capítulo II   | 52  |
| <br>  |     |
| Tabela 3.1 Pedidos que podem atravessar a ligação (1-2).  | 63  |
| Tabela 3.2 Partilha de recursos, $\langle\Phi\rangle$ .   | 64  |
| Tabela 3.3 Variáveis das topologias apresentadas na figura 3.4 .  | 68  |
| Tabela 3.4 Resumo das variáveis apresentadas no Capítulo III  | 80  |
| <br>  |     |
| Tabela 4.1 Média do comprimento dos OLS considerando as redes referência.   | 83  |
| Tabela 4.2 Média do comprimento dos OLS considerando área efectiva.   | 84  |
| Tabela 4.3 Tráfego para $C_{EXC}=C_{OXC}+C_{EXC}$ .   | 96  |
| Tabela 4.4 Resumo das variáveis apresentadas no Capítulo IV   | 98  |
| <br>  |     |
| Tabela 5.1 Parâmetros iniciais das oito redes referência.   | 101 |
| Tabela 5.2 Tráfego total das oito redes referência.   | 101 |
| Tabela 5.3 Média grau nó das oito redes referência.   | 102 |
| Tabela 5.4 Média do número de saltos por pedido (diferentes aproximações).  | 103 |
| Tabela 5.5 Erro das aproximações para a média do número de saltos por pedido.                                       | 104 |
| Tabela 5.6 Erro médio das aproximações para a média do número de saltos por pedido.                                 | 104 |
| Tabela 5.7 Erro médio das aproximações para a média do n.º saltos por pedido não considerando a rede Korotky (EUA). | 104 |
| Tabela 5.8 Média do número de canais ópticos por ligação s/ capacidade de restauro.                                 | 105 |
| Tabela 5.9 Erro das aproximações para o valor médio de canais ópticos.  | 105 |
| Tabela 5.10 Erro médio das aproximações para o valor médio de canais ópticos.                                       | 105 |
| Tabela 5.11 Coeficiente de restauro.  | 106 |
| Tabela 5.12 Média do número de canais ópticos por ligação considerando coeficiente de restauro exacto.              | 107 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 5.13 Média do número de canais ópticos por ligação considerando aproximação (3.12) para o coeficiente de restauro.  | 107 |
| Tabela 5.14 Média do número de canais ópticos por ligação considerando aproximação (3.18) para o coeficiente de restauro.  | 108 |
| Tabela 5.15 Erro associado ao número de canais considerando capacidade de restauro, utilizando o valor exacto de $\langle h \rangle$ e as duas aproximações para $\langle k \rangle$ . | 109 |
| Tabela 5.16 Erro associado ao número de canais considerando $\langle k \rangle$ exacto e as aproximações para $\langle h \rangle$ .  | 113 |
| Tabela 5.17 Erro médio para o número de canais considerando $\langle k \rangle$ exacto e as aproximações para $\langle h \rangle$ .  | 113 |
| Tabela 5.18 Erro associado ao número de canais considerando a aproximação (3.12) para $\langle k \rangle$ e as aproximações para $\langle h \rangle$ .                                 | 113 |
| Tabela 5.19 Erro médio para o número de canais considerando aproximação (3.12) para $\langle k \rangle$ e as aproximações para $\langle h \rangle$ .                                   | 113 |
| Tabela 5.20 Erro associado ao número de canais considerando a aproximação (3.18) para $\langle k \rangle$ e as aproximações para $\langle h \rangle$ .                                 | 114 |
| Tabela 5.21 Erro médio para o número de canais considerando a aproximação (3.18) para $\langle k \rangle$ e as aproximações para $\langle h \rangle$ .                                 | 114 |
| Tabela 5.22 Média do tráfego numa ligação.   | 115 |
| Tabela 5.23 Erro médio tráfego por ligação considerando as diferentes aproximações para $\langle h \rangle$ .  | 115 |
| Tabela 5.24 Média do número de portos, portos “add”, portos “drop”, portos de passagem.  | 115 |
| Tabela 5.25 Média do número portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ .   | 116 |
| Tabela 5.26 Erro associado ao número de portos considerando as diferentes aproximações para $\langle h \rangle$ .  | 116 |
| Tabela 5.27 Erro médio do número de portos considerando as diferentes aproximações para $\langle h \rangle$ .  | 116 |
| Tabela 5.28 Média do número de portos, portos de linha, portos de terminal.  | 118 |
| Tabela 5.29 Média dos portos linha considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ .   | 118 |
| Tabela 5.30 Erro associado à média dos portos linha considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ .  | 118 |
| Tabela 5.31 Erro médio associado à média dos portos de linha considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ .   | 119 |
| Tabela 5.32 Média de portos, portos de linha, portos de terminal considerando capacidade restauro.   | 119 |
| Tabela 5.33 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e $\langle k \rangle$ exacto.  | 121 |
| Tabela 5.34 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e aproximação (3.12) para $\langle k \rangle$ .  | 121 |
| Tabela 5.35 Média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e aproximação  |     |



|  |     |
|--|-----|
| (3.18) para $\langle k \rangle$ .  | 121 |
| Tabela 5.36 Erro associado a média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e $\langle k \rangle$ exacto.                   | 122 |
| Tabela 5.37 Erro associado a média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e aproximação (3.12) para $\langle k \rangle$ . | 122 |
| Tabela 5.38 Erro associado a média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e aproximação (3.18) para $\langle k \rangle$ . | 122 |
| Tabela 5.39 Erro médio da média do número de portos considerando as aproximações de $\langle h \rangle$ e as aproximações para $\langle k \rangle$ .       | 123 |
| Tabela 5.40 Custos de transmissão primeira aproximação, OPNET, $\langle s \rangle$ exacto e $\langle s \rangle$ aproximado.                                | 127 |
| Tabela 5.41 Erro custos de transmissão primeira aproximação.   | 128 |
| Tabela 5.42 Erro médio custos de transmissão primeira aproximação.   | 129 |
| Tabela 5.43 Custos de transmissão segunda aproximação.   | 129 |
| Tabela 5.44 Erro associado aos custos de transmissão segunda aproximação.  | 131 |
| Tabela 5.45 Erro médio dos custos de transmissão segunda aproximação.  | 131 |
| Tabela 5.46 Custos de gestão largura de banda exclusivamente eléctrica.  | 133 |
| Tabela 5.47 Custos de gestão largura de banda eléctrica óptica, $\langle h \rangle$ e $\langle k \rangle$ exactos.   | 135 |
| Tabela 5.48 Custos de gestão largura de banda eléctrica óptica, $\langle h \rangle$ e $\langle k \rangle$ exactos.   | 135 |
| Tabela 5.49 Erro associado aos custos de gestão largura de banda eléctrica óptica.   | 137 |
| Tabela 5.50 Erro médio dos custos de gestão largura de banda eléctrica óptica.   | 137 |
| Tabela 5.51 Custo total redes referência.  | 138 |
| Tabela 5.52 Erro Custo total redes referência.   | 139 |
| Tabela 5.53 Erro médio custo total redes referência.   | 139 |

## Índice

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Capítulo 1 | Introdução  | 1   |
| 1.1        | Redes de transporte   | 2   |
| 1.2        | Arquitectura das ligações e dos nós   | 4   |
| 1.3        | Sobrevivência   | 8   |
| 1.4        | Custos  | 9   |
| 1.5        | Organização do trabalho   | 21  |
| 1.6        | Principais resultados   | 22  |
| 1.7        | Lista de artigos submetidos   | 23  |
| 1.8        | Referências Bibliográficas  | 23  |
| Capítulo 2 | Modelo - Variáveis da rede sem capacidade restauro  | 24  |
| 2.1        | Modelo para rápida identificação de custos e necessidades                                 | 24  |
| 2.2        | Número total de pedidos, largura de banda por pedido e grau médio dos nós                 | 27  |
| 2.3        | Número médio de saltos por pedido   | 29  |
| 2.3.1      | Aproximação baseada numa rede regular com grau 4  | 30  |
| 2.3.2      | Aproximação estatística considerando 14 redes   | 32  |
| 2.3.3      | Aproximação usando o majorante de Moore   | 32  |
| 2.3.4      | Aproximação estatística considerando 2 milhões de redes                                   | 36  |
| 2.3.5      | Aplicação das diferentes aproximações à rede exemplo                                      | 40  |
| 2.3.6      | Validação das aproximações apresentadas   | 41  |
| 2.4        | Número médio de canais ópticos por ligação  | 45  |
| 2.4.1      | Número médio de canais ópticos por ligação, conhecendo-se $N$ , $L$ e $\langle h \rangle$ | 45  |
| 2.4.2      | Número médio de pedidos por ligação, conhecendo-se $p_{k,j}$                              | 47  |
| 2.5        | Número de pedidos numa ligação  | 48  |
| 2.6        | Resumo  | 51  |
| 2.7        | Referências Bibliográficas  | 53  |
| Capítulo 3 | Modelo - Variáveis da rede com capacidade restauro  | 54  |
| 3.1        | Capacidade extra e coeficiente de restauro  | 54  |
| 3.1.1      | Aproximação obtida por Korotky [2]  | 57  |
| 3.1.2      | Aproximação estatística considerando mais de 20 mil topologias de rede                    | 57  |
| 3.2        | Número de portos  | 71  |
| 3.2.1      | Portos entrada  | 71  |
| 3.2.2      | Portos bidireccionais   | 72  |
| 3.2.3      | Portos de entrada, saída e passagem   | 73  |
| 3.2.4      | Portos de tributário e de linha.  | 74  |
| 3.2.5      | Portos de linha e terminal considerando restauro  | 75  |
| 3.2.6      | Aproximação para $\langle P^k \rangle$  | 77  |
| 3.2.7      | Nova aproximação para $\langle W^k \rangle$   | 78  |
| 3.3        | Resumo  | 79  |
| 3.4        | Referências   | 80  |
| Capítulo 4 | Custos da Rede  | 81  |
| 4.1        | Custos de transmissão   | 82  |
| 4.1.1      | Primeira aproximação  | 82  |
| 4.1.2      | Segunda aproximação, modelo mais refinada   | 86  |
| 4.2        | Custos de gestão da largura de banda  | 88  |
| 4.2.1      | Custos de gestão da largura de banda eléctrica  | 89  |
| 4.2.2      | Custos de gestão da largura de banda eléctrica e óptica                                   | 91  |
| 4.3        | Comparação dos custos - solução eléctrica ou solução eléctrico e óptica                   | 94  |
| 4.4        | Resumo  | 98  |
| 4.5        | Referências   | 99  |
| Capítulo 5 | Aplicação do Modelo – Redes Referência  | 100 |
| 5.1        | Cálculo das variáveis em 8 redes de referência  | 101 |
| 5.2        | Cálculo dos custos em 8 redes de referência   | 126 |
| 5.2.1      | Custos de transmissão   | 126 |
| 5.2.2      | Custos de gestão de largura de banda  | 133 |
| 5.2.3      | Custo total   | 138 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| 5.3        | Conclusões  | 140 |
| 5.4        | Referências   | 142 |
| Capítulo 6 | Conclusões  | 143 |
| Anexos     |   |     |
| A1         | Expressão para cálculo de $\langle h \rangle$ , evitando a aproximação (2.22) | 146 |
| A2         | Cálculo de $\langle h \rangle$ considerando diferentes topologias             | 147 |
| A3         | Redes de referência   | 179 |

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais sobre redes de transporte. Mostramos também os pressupostos, sobre a arquitectura do sistema de transmissão e nós, considerados nesta dissertação. A secção 1.1 é dedicada às redes de transporte, nomeadamente à sua evolução assim como às tecnologias de suporte. Na secção 1.2 é apresentada a arquitectura dos sistemas de transmissão e dos sistemas de gestão de largura de banda considerados. A secção 1.3 é dedicada à sobrevivência em redes de transporte. Apresentamos duas técnicas para garantir sobrevivência, isto é, protecção dedicada e restauro. Na secção 1.4 são identificados os parâmetros de custo de cada arquitectura para isso é apresentado o dimensionamento de uma rede exemplo com quatro nós e cinco ligações. Na secção 1.5 é apresentada a organização deste trabalho. Na secção 1.6 são descritos os principais resultados obtidos.

O artigo de S. Korotky [1] serviu de base a muito do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação. Por isso é de todo oportuno deixar desde logo aqui a referência.

## 1.1 Redes de transporte

### 1.1.1 Evolução das redes de transporte

A evolução das redes de telecomunicações é fruto da coordenação de três factores primordiais: a evolução da tecnologia, o desenvolvimento de novos serviços e o crescimento do tráfego.

Na última década assistiu-se ao crescimento exponencial do tráfego de dados. Actualmente, com a convergência da voz, dos dados e do vídeo, é necessário uma maior largura de banda e uma maior flexibilidade das redes para acomodar mais e diferentes tipos de tráfego.

Até agora, a tecnologia óptica era utilizada apenas para transmissão, sendo as funções de gestão de largura de banda realizadas a nível eléctrico. Este tipo de redes é designado por redes ópticas de primeira geração [2]. Na figura 1.1 é apresentada a estrutura genérica deste tipo de redes, baseadas na hierarquia SDH (SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*).

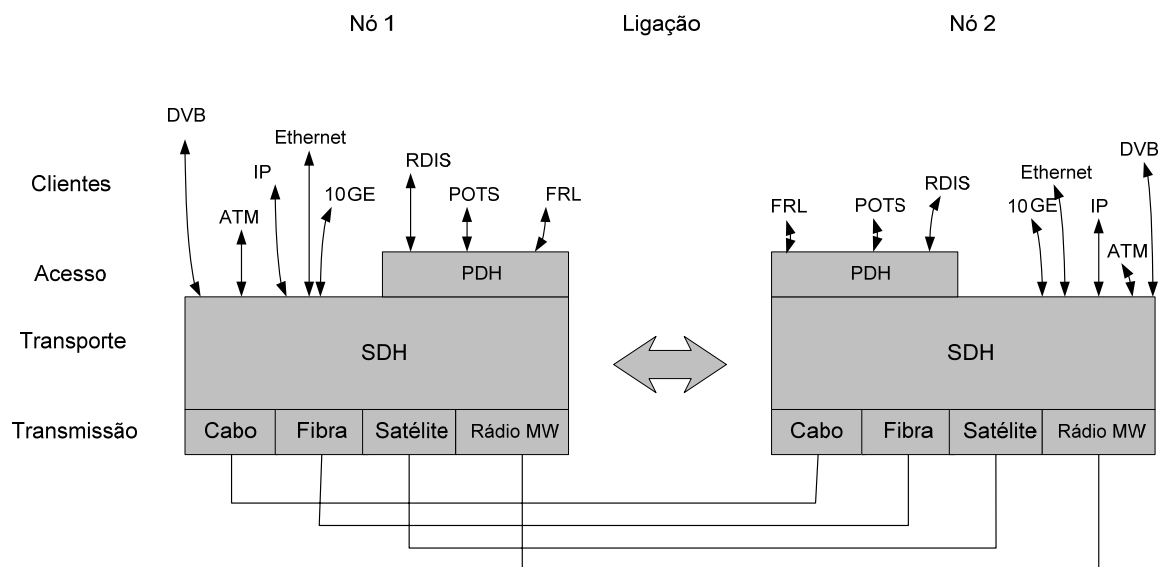


Fig. 1.1 Ligação SDH.

As redes ópticas de primeira geração baseadas na hierarquia SDH têm como função básica providenciar uma rede de transporte, metropolitana ou de longa distância, entre os diferentes nós. Cada nó disponibilizará diferentes interfaces aos clientes locais, como exemplo de interfaces podemos referir ATM (ATM - *Asynchronous Transfer Mode*), IP (IP - *Internet Protocol*), Ethernet e PDH (PDH - *Plesiochronous Digital Hierarchy*) [3]. Estes diferentes tipos de tráfego são mapeados sobre os contentores da rede de transporte, agregados e inseridos na rede. A transmissão física entre os diferentes tipos de nós pode ser feita através de cabo, geralmente usado para ligações de baixo débitos, ou através de sinais rádio, geralmente usado em ligações

onde os nós são de difícil acesso, ou fibra óptica, configuração mais usual. As redes SDH permitem elevados débitos, protecção e monitoria.

A camada óptica é capaz de fornecer mais funções do que a simples transmissão óptica ponto-a-ponto, permitindo a incorporação no domínio óptico de algumas funções de gestão de largura de banda que têm tradicionalmente sido realizadas a nível eléctrico. Nas redes ópticas de primeira geração, a parte eléctrica de um nó da rede tem de suportar não só o tráfego destinado a esse nó, mas também o tráfego que passa por esse nó e é destinado a outros nós da rede, como ilustrado na figura 1.2.

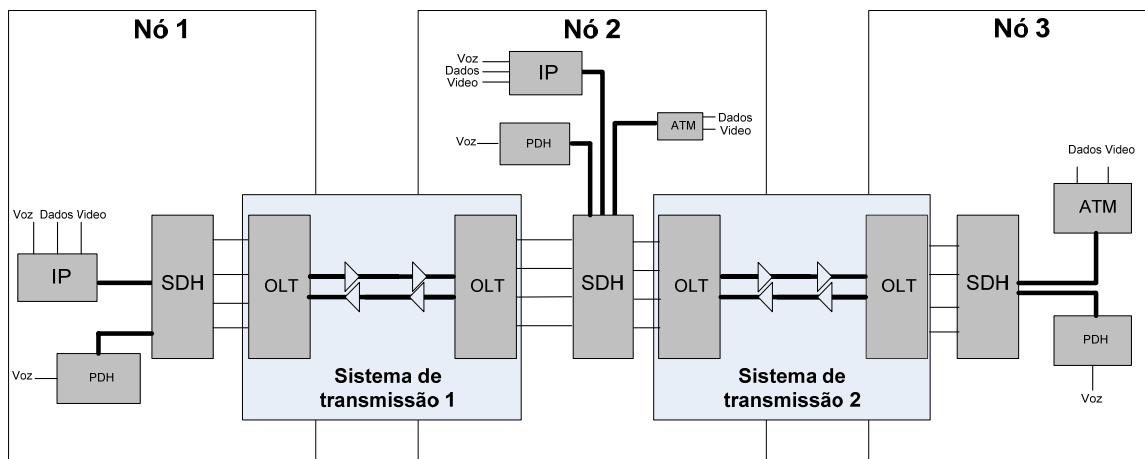


Fig. 1.2 Rede primeira geração.

Numa rede SDH em cada nó os diferentes tipos de tráfego local são mapeados sobre a hierarquia SDH e agregados em sinais de elevado débito. Entre cada equipamento SDH existe um sistema de transmissão constituído por dois OLTs (OLT – *Optical Line Termination*), um em cada extremidade, um par de fibras e eventualmente estágios de regeneração.

Se o tráfego de passagem puder ser encaminhado no domínio óptico a carga na parte eléctrica de um nó será significativamente reduzida. Este é um tópico actual, que está a conduzir ao desenvolvimento das redes de segunda geração, tecnologia OTN [6] (OTN – *Optical Transport Network*). A figura 1.3 apresenta um exemplo de uma rede de segunda geração.

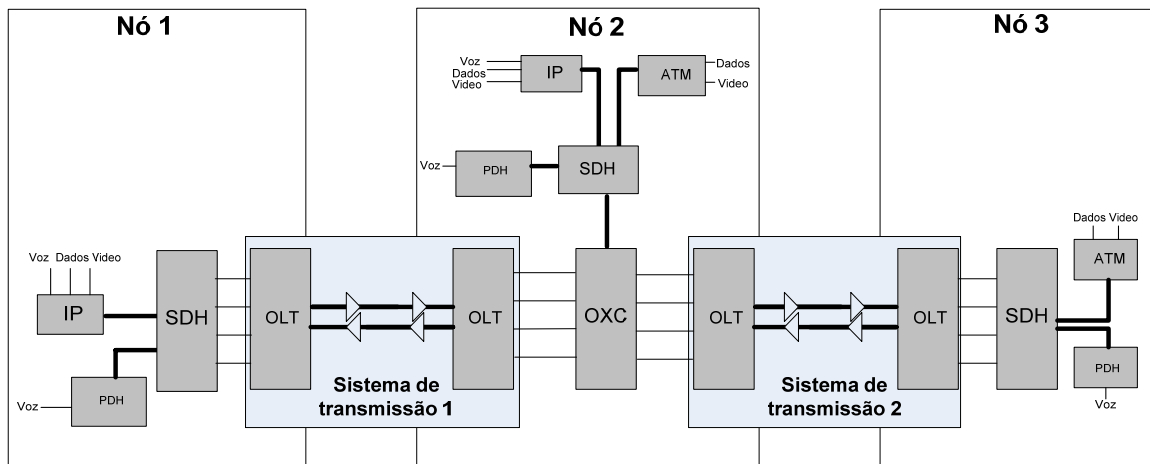


Fig.1.3 Rede segunda geração.

Numa rede de segunda geração o tráfego local em cada nó é agregado através de um comutador eléctrico e encaminhado para um comutador óptico. O comutador óptico tem como funcionalidade realizar o encaminhamento ao nível óptico, podendo ainda garantir restauro, no caso de falha do sistema de transmissão.

Nesta dissertação vamos predominantemente analisar redes de segunda geração com capacidade de encaminhamento e capacidade de restauro ao nível óptico. Vamos ainda assumir que entre dois nós temos sempre um sistema de transmissão e que o sistema de transmissão começa e acaba num OLT.

## 1.2 Arquitectura das ligações e dos nós

### 1.2.1 Arquitectura das ligações

Nesta dissertação estamos a assumir que cada ligação é implementada na forma de um sistema de transmissão óptico. Consideramos que os sistemas de transmissão ópticos são constituídos pelo equipamento terminal, OLT, pelos estágios de regeneração e pela fibra óptica. Nesta dissertação consideramos para a arquitectura genérica do sistema de transmissão, o modelo apresentado na figura 1.4.

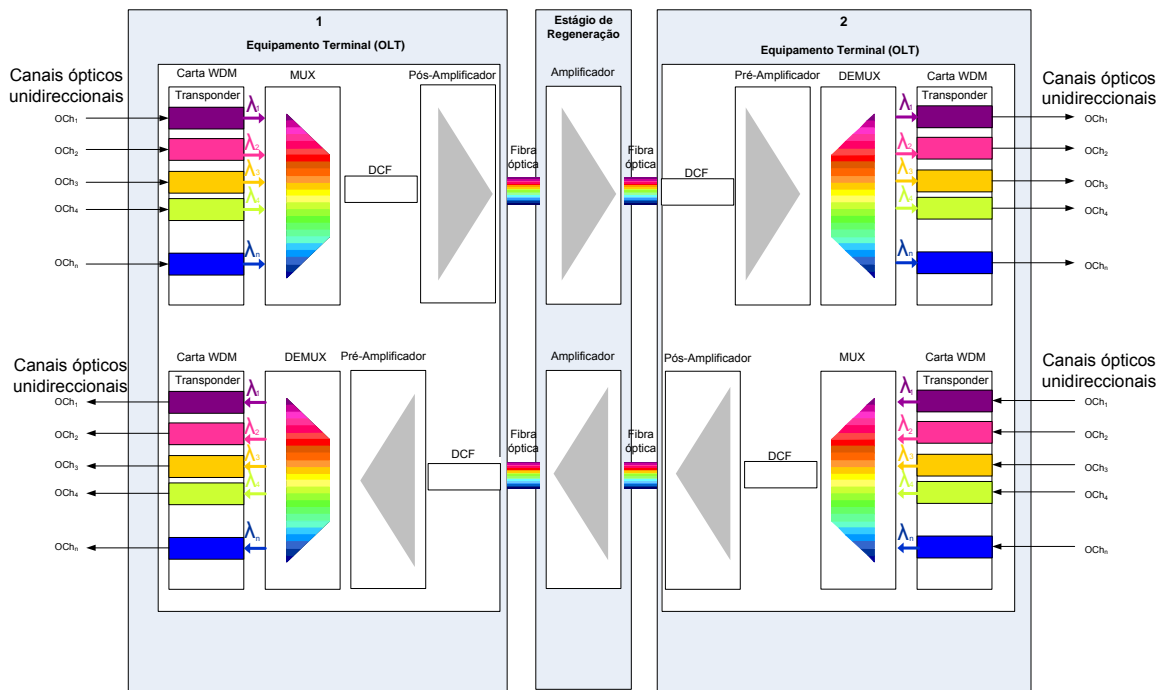


Fig. 1.4 Arquitectura do sistema de transmissão.

Cada sistema de transmissão necessita sempre de dois equipamentos terminais, OLTs, um em cada extremidade. O equipamento terminal é composto por uma estrutura base que poderá englobar, um MUX/DEMUX óptico, um pós-amplificador, um pré-amplificador, um par de fibras compensadoras de dispersão e transponderes. Notemos que na figura 1.4 cada OLT têm  $2n$  transponderes unidireccionais, isto é,  $n$  transponderes bidireccionais.

O MUX óptico é um dispositivo passivo que tem como função combinar vários sinais ópticos centrados em diferentes comprimentos de onda, tipicamente comprimentos de onda da grelha ITU-T [4] [5], numa única fibra óptica. Na outra extremidade da fibra um outro dispositivo, DEMUX óptico, realiza a função inversa, ou seja, separa os diferentes comprimentos de onda combinados na fibra. O pós-amplificador e o pré-amplificador têm como função promover a amplificação do sinal óptico de forma a otimizar o sistema de transmissão. A designação de pós-amplificador ou pré-amplificador depende do local onde estes são inseridos, se colocados logo a seguir ao multiplexer são chamados de pós-amplificadores, na terminologia anglo-saxónica *booster*, e se colocados antes do demultiplexer de pré-amplificadores. Os compensadores de dispersão, como indicado no nome, tem como função compensar a dispersão da fibra óptica. Os transponderes são responsáveis por três funções: colocação de um cabeçalho e um código corrector de erros (FEC - *Forward Error Correction*) para monitoria e controlo de erros, mapeamento na grelha da ITU-T e geração de um sinal óptico com a necessária pureza e estabilidade espectral para um sistema de transmissão de longa distância. Um transponder tem duas interfaces, uma interface de curta distância que interliga ao equipamento local do nó e uma interface de longa distância que interliga ao sistema de



transmissão. A cada canal óptico bidireccional na fibra estão associados dois transponderes bidireccionais.

Assumiremos que ao longo das ligações temos regeneração óptica e nos nós temos regeneração eléctrica, providenciada pelos transponderes. Os estágios de regeneração ao longo das ligações são efectuados por amplificadores ópticos.

Cada sistema de transmissão necessita também de um par de fibras ópticas. A tecnologia WDM (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) permite alta capacidade de transmissão usando vários comprimentos de onda, sobre um único par de fibras ópticas.

Notemos que em todos os sistemas de transmissão está também presente um canal de controlo, este canal permite comunicação entre os diferentes nós da rede. Sobre este canal circula informação de monitoria e configuração da rede.

## 1.2.2 Arquitectura dos nós

A gestão de largura de banda é efectuada nos nós da rede. Nesta dissertação vamos considerar dois modelos de gestão de largura de banda, isto é, exclusivamente eléctrica, apresentado na figura 1.5, e eléctrico e óptico, apresentado na figura 1.6.

O sistema de gestão de largura de banda exclusivamente eléctrico caracteriza-se pelo facto de todo o tráfego óptico que passa pelo nó ser convertido para eléctrico. Assumimos nesta dissertação que as interfaces entre o EXC (EXC - *Electrical Cross Connect*) e OLT são do tipo SDH, interface STM-N (STM-N - *Synchronous Transport Modules N*). O EXC tem como função mapear, agregar e encaminhar o tráfego. Nesta dissertação assumimos sempre que a agregação é feita extremo-a-extremo.

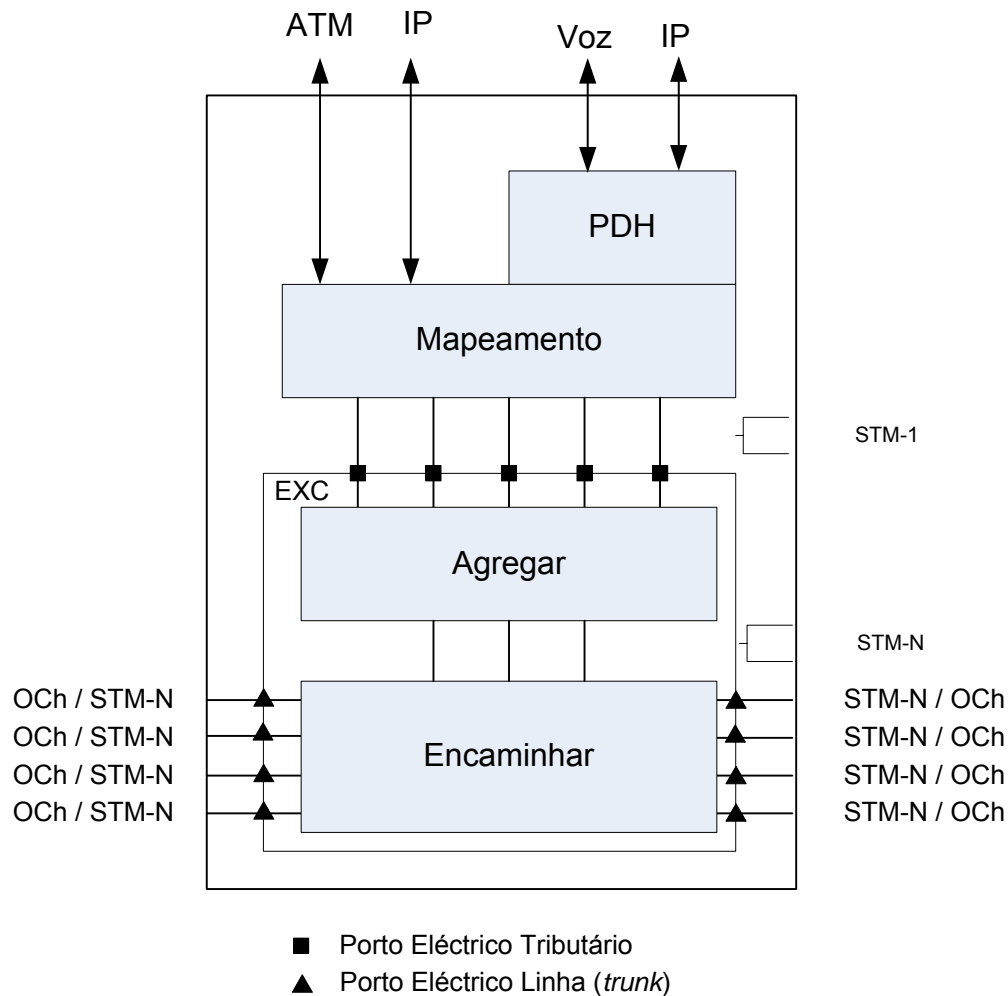


Fig. 1.5 Arquitectura nó exclusivamente eléctrico.

No âmbito desta dissertação estamos a assumir que num nó exclusivamente eléctrico o tráfego local (ATM, IP, Voz) é mapeado sobre SDH utilizando um VC-4 (*VC - Virtual Container*), cada VC-4 dará origem a uma sinal STM-1, este tráfego é depois agregado extremo-a-extremo dando origem a um sinal STM-N de forma a permitir que um comutador eléctrico o encaminhe para o nó destino.

O nó eléctrico e óptico caracteriza-se pelo facto de que só a parte do tráfego óptico que passa pelo nó é convertido para eléctrico. O tráfego de passagem, tráfego que entra no nó e tem como destino outro nó, é encaminhado no domínio óptico. O tráfego terminal, tráfego que termina no nó, é convertido para eléctrico e encaminhado para fora da rede. No OXC (*OXC - Optical Cross Connect*) o tráfego recebido do EXC é directamente encaminhado para as ligações, isto é para o sistema de transmissão.

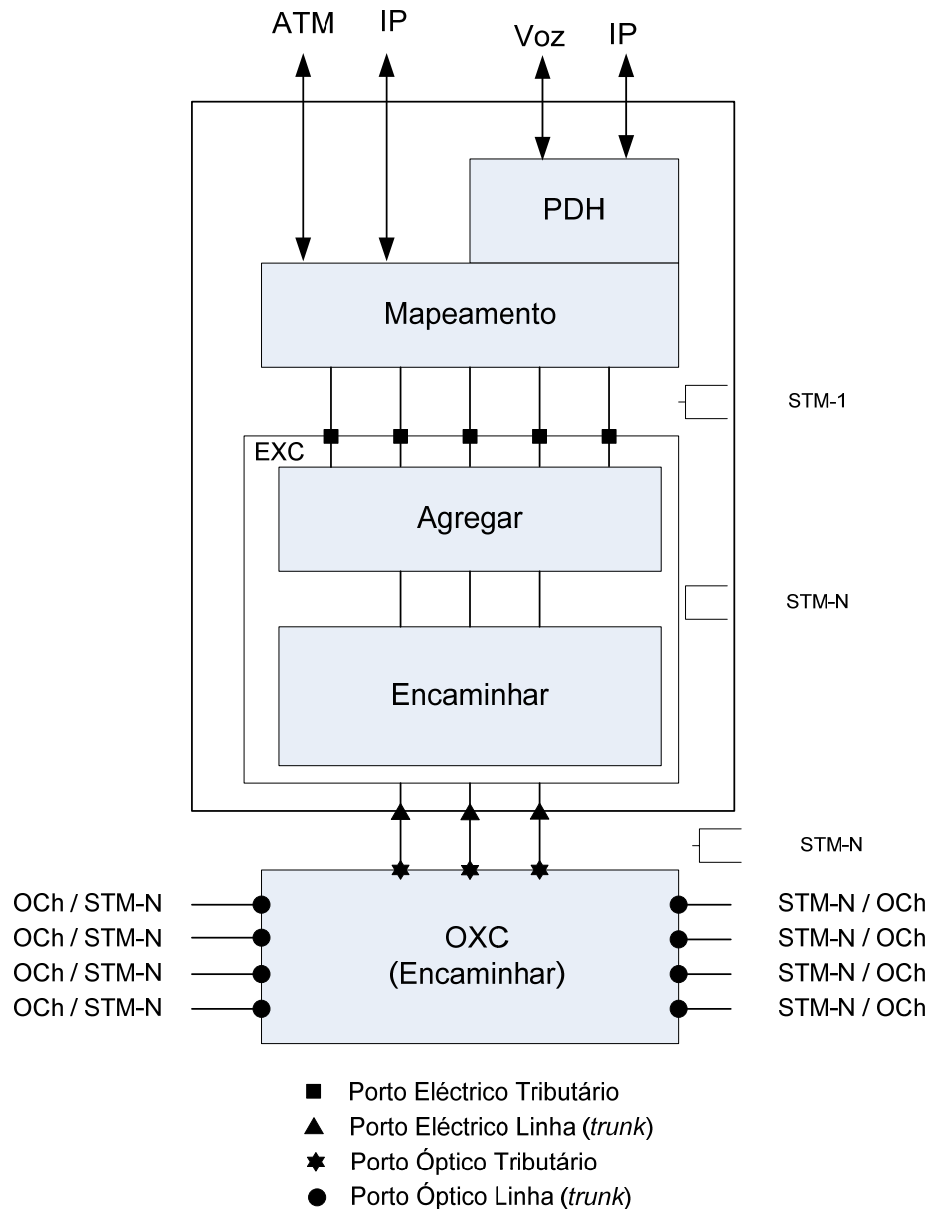


Fig. 1.6 Arquitectura do nó eléctrico e óptico.

### 1.3 Sobrevivência

A sobrevivência em redes de transporte pode ser garantida através de técnicas de restauro ou de protecção. Quando utilizamos protecção, assumindo que estamos a falar de protecção dedicada, reservamos desde o início dois caminhos alternativos para cada pedido entre nós, um caminho activo e um caminho de protecção, como apresentado na figura 1.7 a). Quando utilizamos restauro para garantir sobrevivência da rede não existe um caminho dedicado exclusivamente para protecção de outro, existe capacidade extra na rede que é usada, em caso de necessidade para restabelecer um pedido afectado por uma falha na rede, como apresentado

na figura 1.7 b). Nesta dissertação vamos considerar que a sobrevivência da rede é garantida através de uma técnica de restauro, implementada na camada óptica.

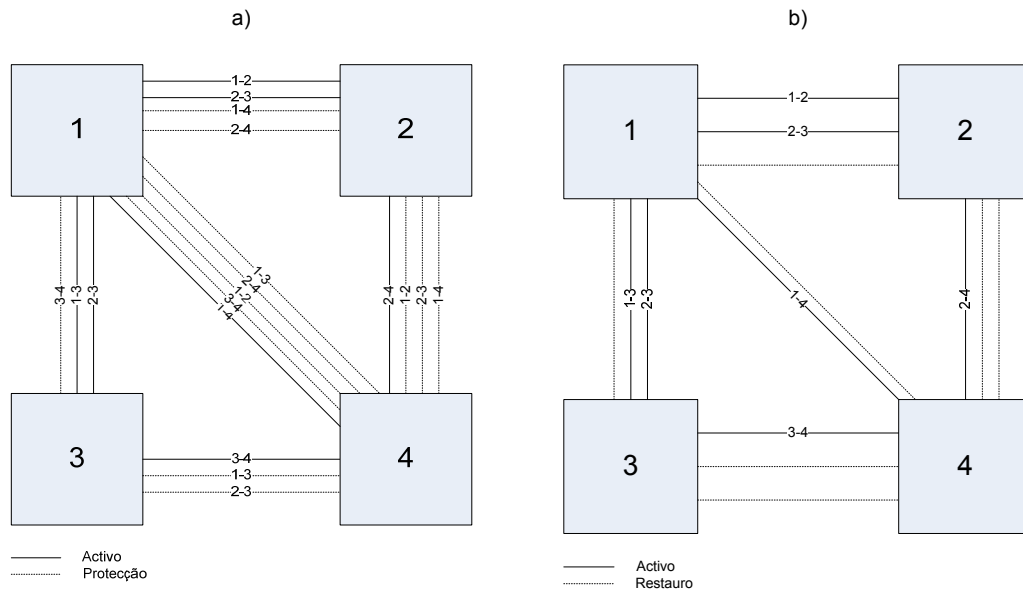


Fig. 1.7 a) Protecção b) Restauro.

Vamos considerar a técnica de restauro onde a escolha do caminho recai no caminho com menor número de saltos, esta técnica é designada por SPR (SPR- *Shortest Patch Restoration*) [7]. Esta técnica é realizada no domínio óptico e não iremos considerar a protecção SDH. Vamos apenas considerar restauro para o caso de falha numa ligação.

## 1.4 Custos

No dimensionamento de uma rede óptica pretendemos obter um sistema que satisfaça um dado conjunto de requisitos minimizando o custo. Por isso a compreensão do modelo de custos de uma rede de transporte é essencial no âmbito do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

De forma a identificar os custos associados às diferentes arquitecturas, isto é nós eléctricos e nós eléctricos e ópticos, vamos dimensionar uma rede exemplo com quatro nós e cinco ligações. Para isso vamos utilizar uma ferramenta comercial de dimensionamento, "OPNET- WDM GURU", versão 11.5, produzida e comercializada pela empresa OPNET Technologies, Inc. [8]. Vamos considerar duas estratégias, ou seja, numa primeira análise iremos considerar nós eléctricos e um esquema de protecção para garantir sobrevivência e numa segunda análise consideramos nós eléctricos e ópticos e sobrevivência garantida através de restauro na camada óptica.

Atendendo a que a referida ferramenta de simulação irá ser usada para validação de resultados obtidos, iremos também descrever com detalhe a forma como os custos são apresentados na ferramenta de simulação. Porque estamos apenas interessados no modelo de custos assumimos que o custo de todos os equipamentos é nulo.

### 1.4.1 Rede exemplo, nós eléctricos com protecção

Na figura 1.8 é apresentada a arquitectura da rede implementada no OPNET. Notemos que as ligações entre os nós 1 e 2, 1 e 3, 2 e 4, 3 e 4, têm 500 km e a ligação entre os nós 1 e 4 tem 707 km.

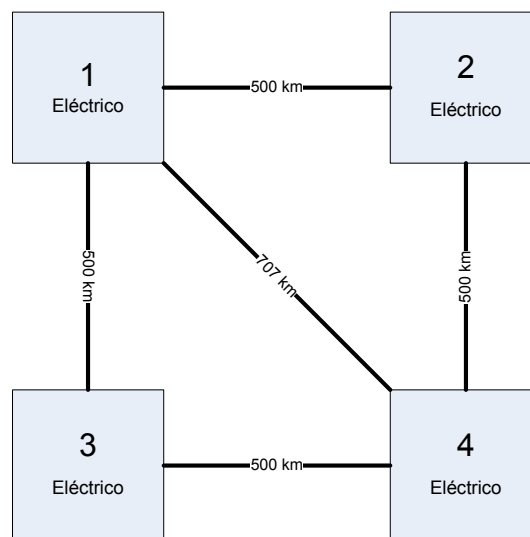


Fig. 1.8 Rede Exemplo, nós eléctricos.

Como dados de entrada considerámos que todos os nós comunicam entre si através de um pedido e que o espaçamento entre amplificadores é de 80 km.

A tabela 1.1 foi obtida do OPNET e apresenta os resultados do dimensionamento obtidos. Verificamos que o custo total para as ligações é dividido em quatro categorias *Cable*, *Fiber*, *Channel* e *SDH equipment*, o custo associado aos nós é apresentado em duas categorias, *Electrical* e *Optical*.

| Category           |               | Cost | Total |
|--------------------|---------------|------|-------|
| Link Cost          | Cable         | 0.00 | 0.00  |
|                    | Fiber         | 0.00 |       |
|                    | Channel       | 0.00 |       |
|                    | SDH Equipment | 0.00 |       |
| Node Cost          | Electrical    | 0.00 | 0.00  |
|                    | Optical       | 0.00 |       |
| Total Network Cost |               |      | 0.00  |

Tabela 1.1 Resultado do OPNET relativo ao custo total da rede exemplo.

### Custos associados ao sistema de transmissão (*Link Cost*)

Os custos associados ao sistema de transmissão são apresentados em quatro categorias, isto é, *Cable*, *Fiber*, *Channel* e *SDH Equipment*, ver tabela 1.2.

| Category           |                         | Quantity  | Cost | Total |
|--------------------|-------------------------|-----------|------|-------|
| Cable Cost         | Fixed                   | 5         | 0.00 | 0.00  |
|                    | Length                  | 2,707.00  | 0.00 |       |
|                    | Regenerator Sites       | 0         | 0.00 |       |
|                    | OA Sites                | 32        | 0.00 |       |
| Fiber Cost         | Fixed                   | 5         | 0.00 | 0.00  |
|                    | Length                  | 2,707.00  | 0.00 |       |
|                    | WDM TMs                 | 10        | 0.00 |       |
|                    | OAs                     | 32        | 0.00 |       |
|                    | Regenerators (Com. Eq.) | 0         | 0.00 |       |
| Channel Cost       | Fixed                   | 19        | 0.00 | 0.00  |
|                    | Length                  | 10,535.00 | 0.00 |       |
|                    | WDM Channel Cards       | 38        | 0.00 |       |
|                    | Regeneration Cards      | 0         | 0.00 |       |
|                    | Long Reach Transponders | 38        | 0.00 |       |
| SDH Equipment Cost | SDH Regenerators        | 0         | 0.00 | 0.00  |
|                    | SDH Amplifiers          | 0         | 0.00 |       |
| Total Link Cost    |                         |           |      | 0.00  |

Tabela 1.2 Resultado do OPNET relativo ao custo das ligações.

A categoria designada por *Cable* engloba os custos associados ao cabo óptico e infra-estruturas para localização dos estágios de regeneração. Esta categoria é subdividida em 4 rubricas, ou seja, são apresentados os custos fixos associados aos cabos ópticos, custos proporcionais ao comprimento dos cabos ópticos, custos associados às infra-estruturas para localização dos regeneradores e custos associados às infra-estruturas para localização dos amplificadores ópticos.

Relativamente aos cabos ópticos são usados 5 cabos, um por ligação, o comprimento total dos cabos ópticos é de 2707 km (4x500 km + 707 km), não são necessárias infra-estruturas para os repetidores eléctricos, porque na arquitectura adoptada para as ligações estes não são considerados. São necessárias 32 infra-estruturas para localização dos amplificadores ópticos. Como o espaçamento considerado entre amplificadores foi de 80 km necessitamos de 6 amplificadores nas ligações de 500 km e de 8 amplificadores na ligação de 707 km, perfazendo um total de 32 estágios de regeneração óptica (4x6+8).

A categoria designada por *Fiber* engloba os custos com as ligações em fibra óptica, esta categoria é subdividida em 5 rubricas, ou seja, são apresentados os custos fixos associados à fibra óptica, custos proporcionais ao comprimento da fibra óptica, custos associados aos terminais WDM, custos associados aos amplificadores ópticos e custos associados aos módulos para regeneradores eléctricos.

Relativamente às fibras ópticas são usados 5 pares, um por ligação, o comprimento total dos pares de fibras ópticas é de 2707 km (4x500 km + 707 km). São necessários 10 equipamentos terminais WDM, ou seja cada sistema de transmissão necessita de 2 equipamentos terminais WDM. São necessários 32 amplificadores ópticos. Não são necessários módulos para repetidores eléctricos, porque na arquitectura adoptada para as ligações estes não são considerados.

A categoria designada por *Channel* engloba os custos associados aos canais ópticos, esta categoria é subdividida em 5 rubricas, ou seja, são apresentados os custos fixos associados aos canais ópticos, os custos proporcionais ao comprimento dos canais ópticos, custos associados aos módulos para transponderes (*WDM channel cards*), custos associados às cartas de regeneração eléctrica e custos associados aos transponderes de longa distância, ver figura 1.9.

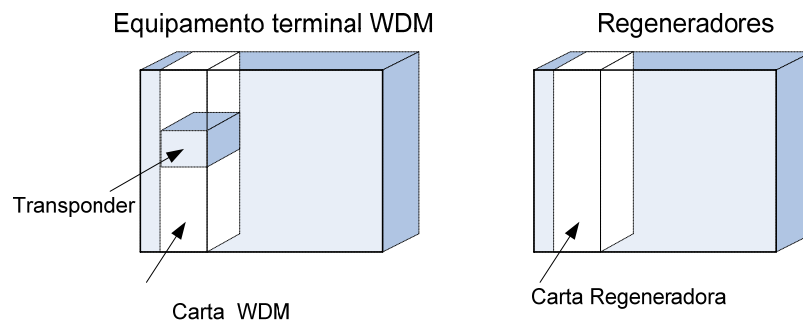


Fig. 1.9 Equipamento terminal WDM e regenerador eléctrico.

Relativamente aos canais ópticos são necessários 19, de forma a satisfazer as necessidades de todas as ligações, ver figura 1.10, isto é, na ligação entre o nó 1 e o nó 2 necessitamos de quatro canais ópticos, dois canais activos e dois canais para garantir protecção, na ligação entre o nó 2 e o nó 4 necessitamos também de quatro canais ópticos, um canal activo e três canais para garantir protecção, na ligação entre o nó 1 e o nó 3 necessitamos de três canais ópticos, dois canais activos e um canal para garantir protecção, na ligação entre o nó 3 e o nó 4 necessitamos de três canais ópticos, um canal activo e dois para garantir protecção, na ligação entre o nó 1 e o nó 4 necessitamos de cinco canais ópticos, um canal activo e quatro para garantir protecção, assim podemos verificar que necessitamos em toda a rede de 19 canais ópticos. Multiplicando o número de canais pelo comprimento da respectiva ligação, verificamos que o comprimento total dos canais bidireccionais é 10535 km ( $14 \times 500$  km +  $5 \times 707$  km). O número de cartas WDM depende da configuração da carta, no nosso caso considerámos que cada carta suporta apenas um transponder. O número de transponderes de longa distância está relacionado com o número de canais, isto é, cada canal óptico necessita de dois transponderes bidireccionais, assim na rede apresentada necessitamos de 38 ( $2 \times 19$ ) transponderes de longa distância. Não são necessárias cartas para regeneração eléctrica, porque na arquitectura adoptada para as ligações estas não são consideradas.

A categoria designada por *SDH Equipment* engloba os custos associados ao equipamento SDH esta categoria é subdividida em 2 rubricas, são apresentados os custos associados aos regeneradores SDH e os custos associados aos amplificadores SDH.

Relativamente ao equipamento SDH, não é considerada regeneração e amplificação ao nível do SDH nas ligações, por isso a quantidade destes equipamentos é 0.

### **Custos associados aos nós (Node Cost)**

Os custos associados aos nós são apresentados na ferramenta de simulação em duas categorias, isto é, custos associados à parte eléctrica, EXC, do nó e custos associados à parte óptica do nó, OXC, nesta configuração o nó não tem parte óptica. Assim os custos totais estão associados apenas à parte eléctrica, EXC, e englobam os custos relacionados com o número e o tipo, tributários e linha (*trunk*), de portos eléctricos utilizados.



Na configuração de rede apresentada todos os nós necessitam de um pedido, STM-1, para os restantes. Cada EXC necessita, por isso, de 3 portos tributários STM-1 para tráfego terminal. Notemos que todos os portos tributários são portos STM-1. Como estamos a considerar agregação extremo-a-extremo cada um destes tributários dá origem a um pedido STM-16 entre todos os nós, por que se assumiu que os portos de linha (*trunk*) são STM-16.

O número de portos de linha (*trunk*) STM-16 para o tráfego de linha depende da especificidade de cada nó, ver figura 1.10. Assim o nó 1 necessita de doze portos de linha (*trunk*), isto é, três portos activos e três portos de protecção para os pedidos que originam os tributários do respectivo nó, dois portos activos e quatro portos de protecção de passagem. O nó 2 necessita de oito portos de linha (*trunk*), isto é, três portos activos e três portos de protecção para os pedidos que originam os tributários do respectivo nó e dois portos de protecção de passagem. O nó 3 necessita de seis portos de linha (*trunk*), isto é, três portos activos e três portos de protecção para os pedidos que originam os tributários do respectivo nó. O nó 4 necessita de doze portos de linha (*trunk*), isto é, três portos activos e três portos de protecção para os pedidos que originam os tributários do respectivo nó e seis portos de protecção de passagem. Assim a nossa rede necessita de 50 portos eléctricos, isto é, o nó 1 necessita de 15 portos, 3 tributários e 12 de linha, o nó 2 necessita de 11 portos, 3 tributários e 8 de linha, o nó 3 necessita de 9 portos, 3 tributários e 6 de linha, o nó 4 necessita de 15 portos, 3 tributários e 12 de linha. O tipo designado por *Continuous*, coluna 7 da tabela 1.3, significa que a cada carta está associado um porto.

| Name         | Trib STM-1 | #Trib Ports | Trunk STM-16 | #Trunk Ports | Total Ports | Type       | Cost        |
|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|-------------|------------|-------------|
| node_01      | 3          | 3           | 12           | 12           | 15          | Continuous | 0.00        |
| node_02      | 3          | 3           | 8            | 8            | 11          | Continuous | 0.00        |
| node_03      | 3          | 3           | 6            | 6            | 9           | Continuous | 0.00        |
| node_04      | 3          | 3           | 12           | 12           | 15          | Continuous | 0.00        |
| <b>Total</b> | <b>12</b>  | <b>12</b>   | <b>38</b>    | <b>38</b>    | <b>50</b>   | -          | <b>0.00</b> |

Tabela. 1.3 Resultado do OPNET relativo ao custo dos nós.

Apresentamos na figura 1.10 o esquema da rede detalhado por forma a comparar os resultados com os resultados obtidos através do OPNET.

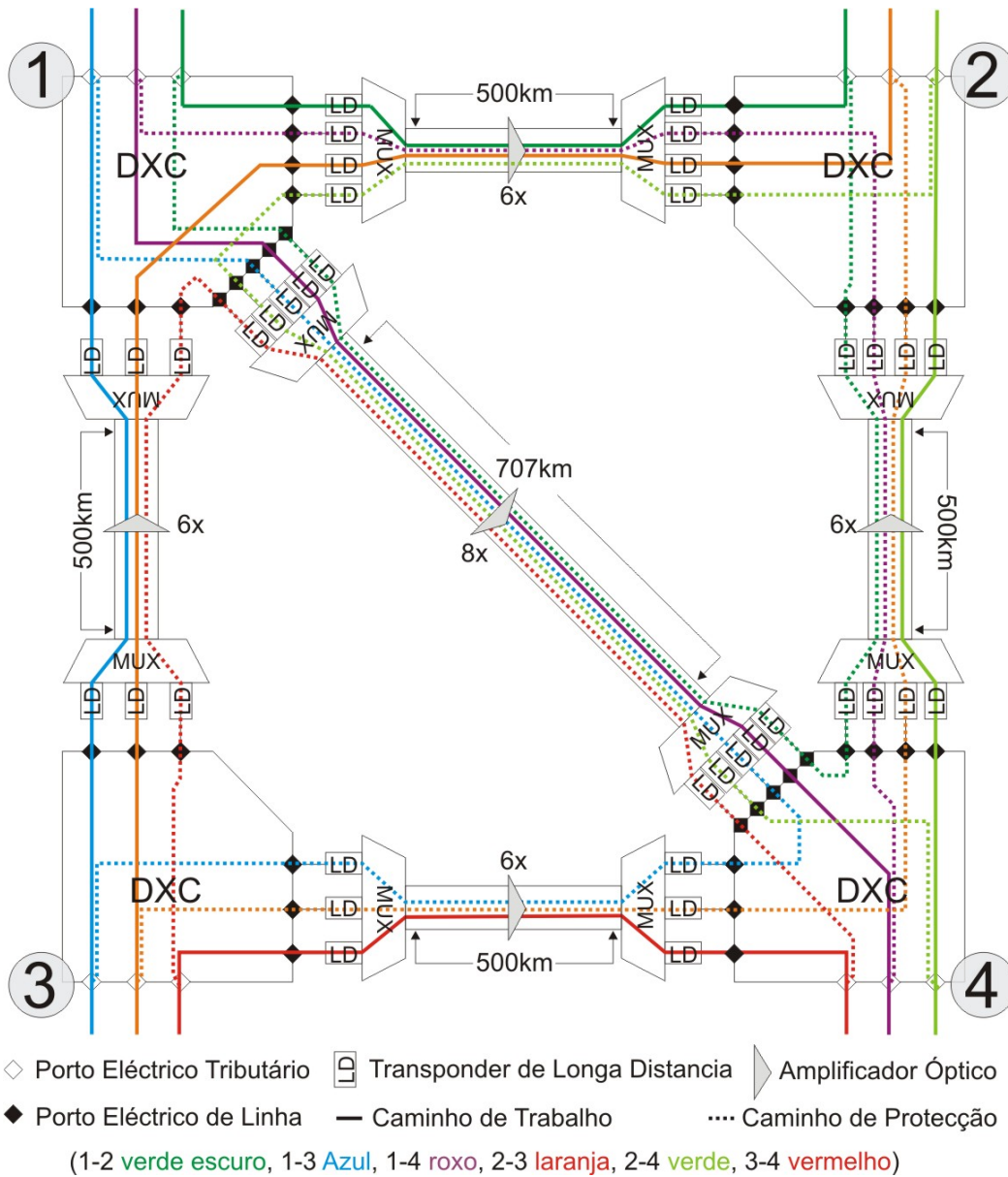


Fig. 1.10 Arquitectura rede exemplo com protecção.

### 1.4.2 Rede exemplo, nós eléctricos e ópticos com restauro

Na figura 1.11 é apresentada a arquitectura de rede implementada no OPNET. Notemos que agora os nós têm parte eléctrica e parte óptica.

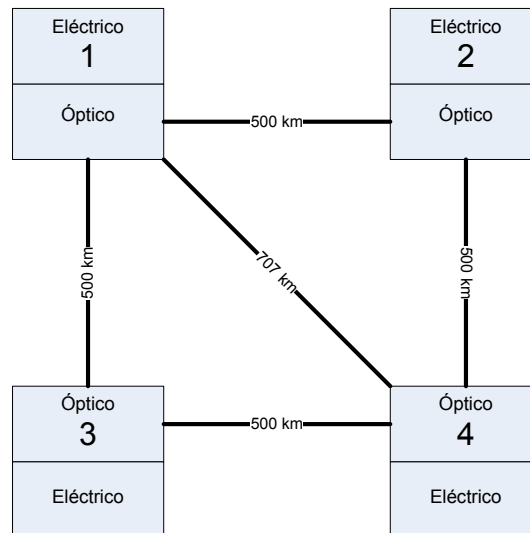


Fig. 1.11 Rede Exemplo, nós eléctricos e ópticos

A tabela 1.4 foi obtida do OPNET e apresenta os resultados do dimensionamento obtidos. Verificamos que o custo total para as ligações é apresentado em quatro categorias *Cable*, *Fiber*, *Channel* e *SDH Equipment*. O custo associado aos nós é apresentado em duas categorias, *Electrical* e *Optical*.

| Category           |               | Cost | Total |
|--------------------|---------------|------|-------|
| Link Cost          | Cable         | 0.00 | 0.00  |
|                    | Fiber         | 0.00 |       |
|                    | Channel       | 0.00 |       |
|                    | SDH Equipment | 0.00 |       |
| Node Cost          | Electrical    | 0.00 | 0.00  |
|                    | Optical       | 0.00 |       |
| Total Network Cost |               |      | 0.00  |

Tabela. 1.4 Resultado do OPNET relativo ao custo total de rede exemplo.

### Custos associados ao sistema de transmissão (*Link Cost*)

Como apresentado anteriormente os custos associados ao sistema de transmissão são apresentados em quatro categorias diferentes, isto é, *Cable*, *Fiber*, *Channel* e *SDH Equipment*.

As categorias designadas por *Cable*, *Fiber*, e *SDH Equipment* apresentam resultados iguais aos obtidos na secção anterior quando considerarmos nós exclusivamente eléctricos, ver tabela 1.5.

Na categoria designada por *Channel* que engloba os custos associados aos canais ópticos, foram obtidos resultados diferentes, ver tabela 1.5.

Relativamente aos canais ópticos são necessários 14, ver figura 1.12. Podemos considerar as necessidades ligação a ligação, isto é, na ligação entre o nó 1 e o nó 2 necessitamos de três canais ópticos, dois canais activos e um necessário para garantir restauro, na ligação entre o nó 2 e o nó 4 necessitamos de três canais ópticos, um canal activo e dois canais para garantir restauro, na ligação entre o nó 1 e o nó 3 necessitamos de três canais ópticos, dois canais activos e um necessário para garantir restauro, na ligação entre o nó 3 e o nó 4 necessitamos de três canais ópticos, um canal activo e dois para garantir restauro, na ligação entre o nó 1 e o nó 4 necessitamos de dois canais ópticos, um canal activo e um para garantir restauro, assim podemos verificar que necessitamos em toda a rede de 14 canais ópticos. Multiplicando o número de canais pelo comprimento da respectiva ligação, verificamos que o comprimento total dos canais é 7414 km ( $12 \times 500$  km +  $2 \times 707$  km). O número de cartas WDM depende da configuração da carta, no nosso caso considerámos que cada carta suporta apenas um transponder. O número de transponderes de longa distância está relacionado com o número de canais ópticos, isto é, cada canal óptico necessita de dois transponderes bidireccionais, assim na rede apresentada necessitamos de 28 ( $2 \times 14$ ) transponderes de longa distância. Não são necessárias cartas para regeneração eléctrica, porque na arquitectura adoptada para as ligações estas não são consideradas.

| Category               |                         | Quantity | Cost | Total       |
|------------------------|-------------------------|----------|------|-------------|
| Cable Cost             | Fixed                   | 5        | 0.00 | 0.00        |
|                        | Length                  | 2,707.00 | 0.00 |             |
|                        | Regenerator Sites       | 0        | 0.00 |             |
|                        | OA Sites                | 32       | 0.00 |             |
| Fiber Cost             | Fixed                   | 5        | 0.00 | 0.00        |
|                        | Length                  | 2,707.00 | 0.00 |             |
|                        | WDM TMs                 | 10       | 0.00 |             |
|                        | OAs                     | 32       | 0.00 |             |
|                        | Regenerators (Com. Eq.) | 0        | 0.00 |             |
| Channel Cost           | Fixed                   | 14       | 0.00 | 0.00        |
|                        | Length                  | 7,414.00 | 0.00 |             |
|                        | WDM Channel Cards       | 28       | 0.00 |             |
|                        | Regeneration Cards      | 0        | 0.00 |             |
|                        | Long Reach Transponders | 28       | 0.00 |             |
| SDH Equipment Cost     | SDH Regenerators        | 0        | 0.00 | 0.00        |
|                        | SDH Amplifiers          | 0        | 0.00 |             |
| <b>Total Link Cost</b> |                         |          |      | <b>0.00</b> |

Tabela. 1.5 Resultado do OPNET relativo custo das ligações.

### Custos associados aos nós (*Node Cost*)

Os custos associados aos nós são divididos em duas categorias, isto é, custos associados a parte eléctrica, EXC, do nó e custos associados a parte óptica do nó, OXC.

Os custos associados a parte eléctrica, EXC, englobam os custos relacionados com o número e o tipo de portos eléctricos utilizados. Para o caso apresentado cada EXC necessita do mesmo número de portos, isto é, necessita de três portos tributários STM-1 para tráfego local e três portos de linha (*trunk*) STM-16 para o tráfego de linha, lado do OXC, assim, a nossa rede necessita de vinte e quatro (4x(3+3)) portos eléctricos. Notemos que considerámos que todos os nós comunicam entre si através de um pedido, STM-1, por isso a necessidade de três portos tributários em cada nó. Como estamos a considerar agregação extremo-a-extremo aos portos tributários correspondem três portos de linha, STM-16. Notemos ainda que todos os portos

tributários são do tipo STM-1 e todos os portos de linha (*trunk*) do tipo STM-16, porque assim foi especificado.

| Name         | Trib STM-1 | #Trib Ports | Trunk STM-16 | #Trunk Ports | Total Ports | Type       | Cost        |
|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|-------------|------------|-------------|
| node_01      | 3          | 3           | 3            | 3            | 6           | Continuous | 0.00        |
| node_02      | 3          | 3           | 3            | 3            | 6           | Continuous | 0.00        |
| node_03      | 3          | 3           | 3            | 3            | 6           | Continuous | 0.00        |
| node_04      | 3          | 3           | 3            | 3            | 6           | Continuous | x.xx        |
| <b>Total</b> | <b>12</b>  | <b>12</b>   | <b>12</b>    | <b>12</b>    | <b>24</b>   | -          | <b>0.00</b> |

Tabela. 1.6 Resultado do OPNET relativo aos custos associados ao EXC.

Os custos associados a parte óptica englobam os custos relacionados com o número e o tipo de portos ópticos utilizados. Para o caso apresentado cada OXC necessita de três portos tributários, com interfaces de curta distância, para interligar ao EXC, notemos que todos os portos ópticos tributários são do tipo STM-16. O número de portos de linha (*trunk*) é dependente da especificidade de cada nó, ver figura 1.12, assim o nó 1 necessita de oito portos de linha (*trunk*), isto é, cinco portos activos e três portos reservados para garantir restauro, dos portos activos três são para os pedidos que originam os tributários do respectivo nó e dois para um pedido de passagem (*Trunk Ports For Transit*). O nó 2 necessita de seis portos de linha (*trunk*), isto é, três portos activos e três portos reservados para garantir restauro, os portos activos são para os pedidos que originam os tributários do respectivo nó. O nó 3 necessita de seis portos de linha (*trunk*), isto é, três portos activos e três portos reservados para garantir restauro, os portos activos são para os pedidos que originam os tributários do respectivo nó. O nó 4 necessita de oito portos de linha (*trunk*), isto é, três portos activos e cinco portos reservados para garantir restauro, os portos activos são para os pedidos que originam os tributários do respectivo nó. Notemos que todos os portos de linha são do tipo STM-16. Assim a nossa rede necessita de quarenta portos eléctricos, isto é, o nó 1 necessita de onze portos, três tributários e oito de linha, o nó 2 necessita de nove portos, três tributários e seis de linha, o nó três necessita de nove portos, três tributários e seis de linha, o nó 4 necessita de onze portos, três tributários e oito de linha.

| Name         | Trib STM-16 | #Trib Ports | Trunk STM-16 | #Trunk Ports | #Trunk Ports For Transit | Total Ports | Type           | Cost        |
|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------------------|-------------|----------------|-------------|
| node_01      | 3           | 3           | 8            | 8            | 2                        | 11          | OXC Continuous | 0.00        |
| node_02      | 3           | 3           | 6            | 6            | 0                        | 9           | OXC Continuous | 0.00        |
| node_03      | 3           | 3           | 6            | 6            | 0                        | 9           | OXC Continuous | 0.00        |
| node_04      | 3           | 3           | 8            | 8            | 0                        | 11          | OXC Continuous | 0.00        |
| <b>Total</b> | <b>12</b>   | <b>12</b>   | <b>28</b>    | <b>28</b>    | <b>2</b>                 | <b>40</b>   | -              | <b>0.00</b> |

Tabela. 1.7 Resultado do OPNET relativo aos custos associados ao OXC.

Apresentamos na figura 1.12 o esquema da rede detalhado por forma a comparar os resultados com os resultados obtidos através do OPNET.

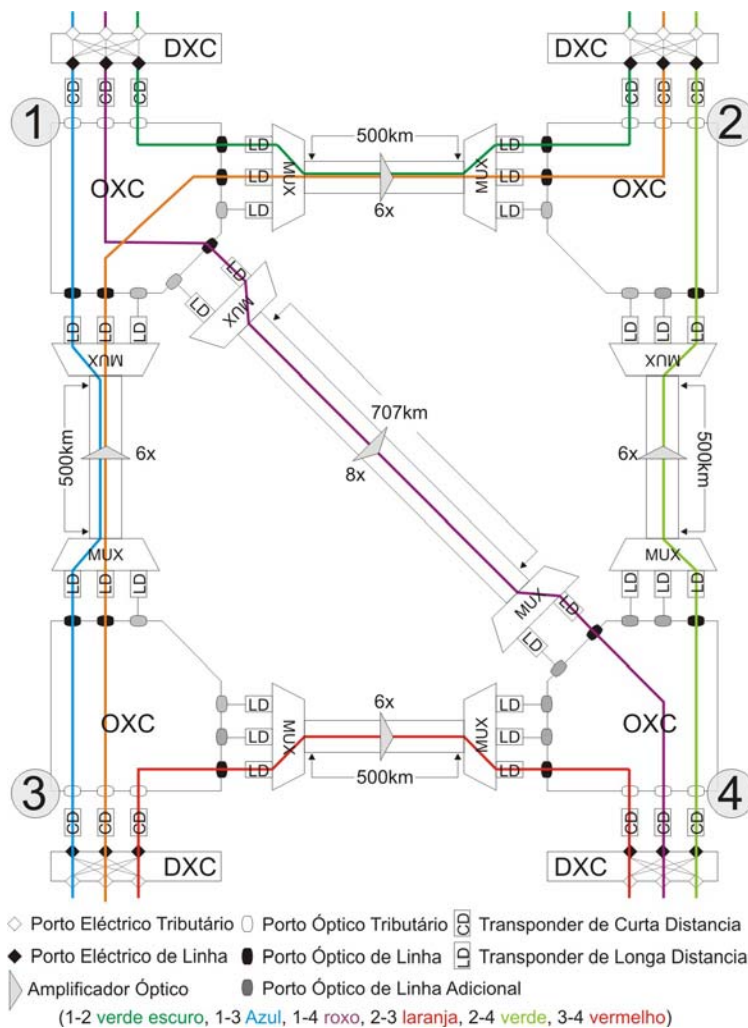


Fig. 1.12 Arquitectura rede exemplo com restauro.

A estrutura de custos descrita nesta secção será usada como base para desenvolver um modelo de custos para redes de transporte ópticas.

## 1.5 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo, Introdução, foram apresentados os conceitos fundamentais sobre redes de transporte foram ainda apresentado os pressupostos, sobre a arquitectura de rede e nós, considerados nesta dissertação.

No segundo capítulo, Variáveis do Modelo de Custos sem Restauro, são apresentados os conceitos fundamentais sobre o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte não considerando capacidade de restauro.

No terceiro capítulo, Variáveis do Modelo de Custos com Restauro, são apresentados os conceitos fundamentais sobre o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte considerando capacidade de restauro.

No quarto capítulo, Custos da Rede, é apresentado o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte considerando as variáveis apresentadas nos capítulos anteriores.

No quinto capítulo, Aplicação do Modelo a Redes de Referência, é aplicado o modelo apresentado às oito redes de referência, ver anexo A1. É ainda feita uma comparação com resultados obtidos através de uma ferramenta comercial de dimensionamento, “OPNET- WDM GURU”, versão 11.5, produzido e comercializado pela empresa OPNET Technologies, Inc.

No sexto capítulo, Conclusões, apresentamos as conclusões sobre o trabalho realizado.

Faz ainda parte desta dissertação três anexos, um em que são apresentadas as redes de referência, outro em que são apresentados resultados sobre o número médio de saltos e outro em que é feita a derivação do número médio de saltos.



## 1.6 Principais resultados obtidos

Nesta dissertação comprovamos a possibilidade de tratar o problema do dimensionamento em redes ópticas usando uma abordagem estatística.

Verificámos que a abordagem estatística permite obter resultados com um erro na ordem dos 10%.

Identificamos como parâmetros críticos do dimensionamento, o número médio de saltos,  $\langle h \rangle$ , e o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ .

Apresentamos novas expressões para cálculo do número médio de saltos e para o cálculo do coeficiente de restauro.

Aplicamos a formulação estatística a 8 redes reais.

## 1.7 Lista de artigos submetidos

Claunir Pavan, Rui M. Morais, Abel R. Correia, Armando N. Pinto, The Impact of the Mean Nodal Degree on Optical Networks, to be presented at Photonics North Conference, Montreal, Canada, June 2-4, 2008;

C. Pavan, R. M. Morais, A. R. Correia, A. N. Pinto, Dimensioning of Optical Networks with Incomplete Information, AICT 2008 - The Fourth Advanced International Conference on Telecommunications, June 8-13, Athens, Greece, 2008, Accepted;

Claunir Pavan, Abel R. P. Correia, Armando Nolasco Pinto, A Statistical Model for the Average Number of Hops in Optical Networks, Conftele 2007, 6th Conference on Telecommunications, Peniche, Portugal, May 9-11, Proceedings of the 6th Conference on Telecommunications, pp. 465 - 467, ISBN: 978-989-8109-00-2, 2007;

Claunir Pavan, Abel Ricardo Pereira Correia, Armando Nolasco Pinto, A Graph Problem in the Context of Optical Networks Dimensioning, accepted for oral presentation in MTPT'06, 3rd International Workshop on Mathematical Techniques and Problems in Telecommunications, September 4-8, Leiria, Portugal, 2006;

Abel R. P. Correia, Claunir Pavan, Armando Nolasco Pinto, A Probabilistic Model for the Demands on Link on Mesh Optical Networks, SEON'06, IV Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors, Porto, Portugal, pp. 43-44, June 16, 2006;

Claunir Pavan, Abel Ricardo Correia, Rui Manuel Morais, José R. Ferreira da Rocha, and Armando Nolasco Pinto, Restoration Capacity in Optical Mesh Networks, submitted to IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008;

## 1.8 Referências

[1] S. K. Korotky, "Network Global Expectation Model: A Statistical Formalism for Quickly Quantifying Network Needs and Costs," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.22, NO. 3, pp. 703-22, March 2004.

[2] R. Ramasawi, K. N. Sivarajan, "Optical Networks a practical perspective". Morgan Kaufmann, second edition, 2002.

[3] José M. Caballero, Francisco Hens, Roger Segura, Andreu Guimerá, "Installation and Maintenance of SDH/SONET, ATM, xDSL and Synchronization Networks", Artech House 2003.

[4] ITU-T G.694.2 "Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid", 2002.

[5] ITU-T G.694.1 "Spectral grids for WDM applications: DWDM wavelength grid", 2002.

[6] ITU-T G.709 "Interface for the optical transport network (OTN)", 2003.

[7] S.Ramamurthy, Biswanath Mukherjee, "Survivable WDM Mesh Networks, Part II - Restoration, in Proceedings IEEE ICC, 1999, Vancouver, British Columbia, Canada, June 1999, vol. 3, pp. 2023-30.

[8] Opnet WDM Guru (version 11.5), [Online], Available: <http://www.opnet.com>

# Capítulo 2

## Variáveis do Modelo de Custos sem Restauro

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais sobre o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte não considerando capacidade de restauro. A título ilustrativo, é aplicado a uma rede exemplo o modelo apresentado.

Na secção 2.1 é introduzido o conceito de custo total de uma rede de transporte. Particular destaque é dado à sua dependência com o custo médio das ligações e o custo médio dos nós. Posteriormente é efectuada ainda a modelação matemática de uma rede de transporte, usando um grafo de rede e uma matriz de adjacência. De seguida, é também introduzido o conceito de tráfego que a rede deve suportar.

Na secção 2.2 é definido o número total de pedidos na rede. Iremos assumir pedidos uniformes, o que faz com que o número total de pedidos seja apenas função do número de nós da rede. Analisaremos a dependência da largura de banda por pedido com o tráfego total, apresentando uma expressão para cálculo desta variável conhecendo-se o tráfego total e o número de nós da rede. De seguida, é apresentada ainda a variável grau do nó e a sua relação com o número de nós e ligações.

A secção 2.3 é dedicada ao estudo do número médio de saltos por pedido. Iremos comparar várias aproximações que permitem calcular o número médio de saltos por pedido conhecendo-se apenas o número de nós e ligações. Apresentaremos uma aproximação estatística obtida através da simulação de mais de 2 milhões de topologias de redes diferentes. Faremos uma análise comparativa entre as várias aproximações já conhecidas, a nova aproximação estatística proposta e o valor exacto calculado através do algoritmo Dijkstra.

Na secção 2.4 é introduzido o número médio de pedidos por ligação. Apresenta-se uma expressão para cálculo desta variável conhecendo-se o valor médio de pedidos, o número médio de saltos por pedido e o valor médio do grau do nó. Apresentamos também a sua relação com a probabilidade de cada ligação ser escolhida para encaminhar um pedido. Discutimos ainda a variável pedidos numa ligação.

## 2.1 Modelo para rápida identificação de custos e necessidades

O custo total de uma rede de transporte,  $C_T$ , é igual ao somatório do custo individual de cada elemento de rede,  $C_i$ , isto é

$$C_T = \sum_i C_i. \quad (2.1)$$

Os limites do índice do somatório, na expressão (2.1), estão nesta altura indefinidos, mas esta ambiguidade é posteriormente eliminada.

Se agruparmos componentes de rede do mesmo tipo, logo com custo igual, podemos escrever,

$$C_T = \sum_i V_i C_i, \quad (2.2)$$

sendo  $V_i$  o número de elementos de rede do tipo  $i$ .

Podemos agrupar os custos considerando os custos de transmissão e os custos de gestão de largura de banda, assim,

$$C_T = \sum_l V_l C_l + \sum_n V_n C_n, \quad (2.3)$$

em que o primeiro somatório contabiliza os custos das ligações e o segundo somatório o custo dos nós. Considerando  $L$  o número de ligações e  $N$  o número de nós, podemos escrever

$$\sum_l V_l C_l = \sum_{l=1}^L C_l, \quad (2.4)$$

e

$$\sum_n V_n C_n = \sum_{n=1}^N C_n, \quad (2.5)$$

em que  $C_l$  e  $C_n$  são, respectivamente, o custo da ligação  $l$  e do nó  $n$ .

Logo a expressão (2.3) pode ser reescrita como

$$C_T = \sum_{l=1}^L C_l + \sum_{n=1}^N C_n = \frac{L}{L} \sum_{l=1}^L C_l + \frac{N}{N} \sum_{n=1}^N C_n, \quad (2.6)$$

ou em termos de custo médio das ligações,  $\langle c_l \rangle$ , e dos nós,  $\langle c_n \rangle$ , como

$$C_T = L \underbrace{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L C_l}_{\langle c_l \rangle} + N \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n}_{\langle c_n \rangle} = L \langle c_l \rangle + N \langle c_n \rangle. \quad (2.7)$$

Assim podemos dizer que o custo total é igual ao número de ligações,  $L$ , multiplicado pelo valor médio do custo das ligações,  $\langle c_l \rangle$ , somado com o produto do número de nós,  $N$ , pelo valor médio do custo dos nós,  $\langle c_n \rangle$ .

Usando um grafo podemos representar esquematicamente a topologia de uma rede. Os nós do grafo representam os nós da rede e as arestas as ligações da rede, ver exemplo na figura 2.1-a). Esta representação é usualmente utilizada como primeira aproximação ao problema da modelação matemática de uma rede de transporte.

Outra forma de representar uma rede de transporte é através de uma matriz de adjacência, ver figura 2.1-b). Os elementos da matriz,  $g_{ij}$ , assumem o valor 1 se existir uma ligação entre os nós  $i$  e  $j$  ou 0 caso não exista ligação.

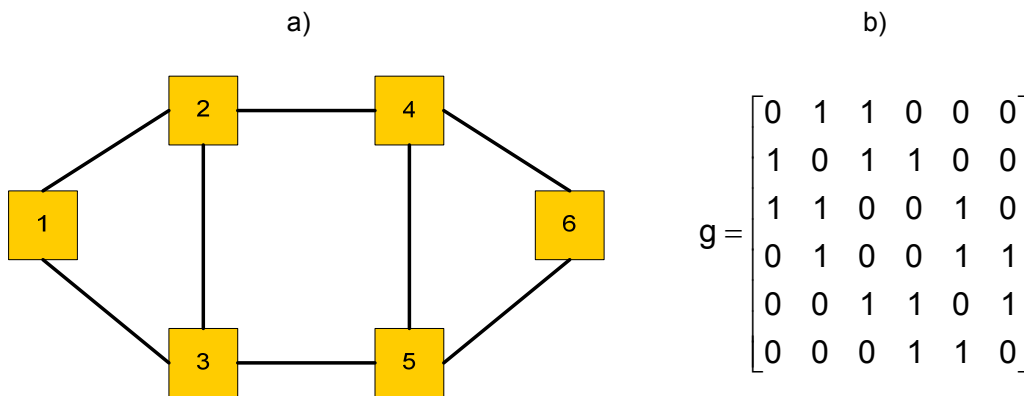


Fig. 2.1-a) Grafo de rede; b) Correspondente representação matricial.

Outro aspecto importante de uma rede transporte é o tráfego que esta tem que suportar. Para modelar o tráfego vamos utilizar uma matriz de pedidos,  $[d]$ , onde os elementos,  $d_{ij}$ , assumem um valor inteiro positivo correspondendo a uma unidade de tráfego elementar, ou zero, caso não exista tráfego entre dois nós. Para um modelo de tráfego uniforme, cada nó comunica com todos os outros nós usando o mesmo número de unidades elementares de tráfego. No âmbito deste trabalho vamos assumir que o tráfego é uniforme e com valor correspondente a uma unidade de tráfego elementar, ou seja,

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Vamos ainda assumir que a matriz  $[d]$  é independente do tempo e não há tráfego com origem e destino no mesmo nó.

Neste capítulo será utilizada a rede apresentada na figura 2.1 de forma a ilustrar o cálculo de todas as variáveis apresentadas.

## 2.2 Número total de pedidos, largura de banda por pedido e grau médio dos nós

O número total de pedidos na rede pode ser obtido através da matriz de pedidos  $[d]$ , somando todos os elementos dessa matriz,  $d_{ij}$ , desta forma obtemos o número total de pedidos unidireccionais,  $D_1$ ,

$$D_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij} = \frac{N}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij} = N \langle d \rangle, \quad (2.8)$$

sendo  $\langle d \rangle$  o número médio de pedidos com origem ou com destino nos nós.

Considerando que a matriz de pedidos,  $[d]$ , é simétrica, ou seja, os pedidos são bidireccionais e de igual valor e que não há tráfego com origem e destino no mesmo nó, podemos somar apenas os elementos da parte triangular superior da matriz  $[d]$ ,

$$D = D_2 = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij} = \frac{D_1}{2} = \frac{N \langle d \rangle}{2}. \quad (2.9)$$

Para o modelo de tráfego considerado

$$\langle d \rangle = N - 1, \quad (2.10)$$

$$D_1 = N(N - 1), \quad (2.11)$$

e

$$D = D_2 = \frac{N(N - 1)}{2}. \quad (2.12)$$

Para a nossa rede exemplo,  $N=6$  e  $L=8$ , obtemos

$$\langle d \rangle = 6 - 1 = 5,$$

$$D_1 = 6(6 - 1) = 30,$$

$$D = \frac{6(6 - 1)}{2} = 15.$$

Sendo o tráfego total na rede,  $T$ , conhecido à partida, a largura de banda por pedido,  $\tau$ , é dada por,

$$\tau \equiv \frac{T}{D}. \quad (2.13)$$

Utilizando a expressão (2.12) para os pedidos na rede obtemos,

$$\tau = \frac{T}{\left[ \frac{N(N-1)}{2} \right]}. \quad (2.14)$$

Vamos considerar para a nossa rede exemplo que o tráfego total,  $T$ , é 35 Gbps assim o tráfego por pedido será

$$\tau \equiv \frac{T}{D} = \frac{35000}{15} = 2333.33 \text{ Mbps.}$$

Como no nosso caso temos um modelo de pedidos uniforme isto significa que cada nó necessita para comunicar com cada um dos outros nós de 2333.33 Mbps, ou seja, um STM-16 (2488.32 Mbps) se considerarmos a hierarquia de multiplexagem digital SDH.

A quantidade grau do nó,  $\delta$ , refere-se ao número de ligações que convergem num determinado nó. Considerando a representação matricial, podemos definir grau do nó como,

$$\delta_i = \sum_{j=1}^N g_{ij}. \quad (2.15)$$

O valor médio do grau do nó,  $\langle \delta \rangle$ , é dado por

$$\langle \delta \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{ij}. \quad (2.16)$$

Atendendo que cada ligação contribui duas vezes para o grau médio dos nós podemos também escrever

$$\langle \delta \rangle = \frac{2L}{N}. \quad (2.17)$$

Para a nossa rede exemplo,  $N=6$  e  $L=8$ , obtemos

$$\langle \delta \rangle = \frac{2L}{N} = \frac{2 \times 8}{6} = 2.667 .$$

### 2.3 Número médio de saltos por pedido

O número de saltos de um pedido é considerado como sendo o número de ligações atravessadas por um pedido. Neste trabalho o encaminhamento dos pedidos obedece a regra do número de saltos mínimo, ou seja, o caminho escolhido entre dois nós é sempre aquele que percorre o menor número de ligações possíveis. No caso de existirem dois ou mais caminhos distintos com o mesmo número de saltos a escolha recai no primeiro encontrado. Para encontrar os caminhos mínimos é usado o algoritmo Dijkstra [1]. A matriz de saltos,  $[h]$ , é obtida tendo por base os caminhos mínimos entre todos os pares de nós. Ou seja cada elemento desta matriz,  $h_{ij}$ , indica o número mínimo de ligações que um pedido entre o nó  $i$  e  $j$  necessita de atravessar.

Considerando a nossa rede exemplo, a matriz de saltos,  $[h]$ , será dada por

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 0 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} .$$

O número médio de saltos por pedido pode ser obtido através da expressão,

$$\langle h \rangle = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D f_d, \quad (2.18)$$

onde  $f_d$  corresponde ao número de saltos que o pedido  $d$  tem que atravessar.

Para o modelo de tráfego considerado, temos

$$\langle h \rangle = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N h_{ij} \quad (2.19)$$



atendendo a que

$$D = \frac{N(N-1)}{2} \text{ e } \sum_{d=1}^D f_d = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N h_{ij}.$$

Na rede exemplo considerada temos

$$\langle h \rangle = \frac{2 \times 23}{30} = 1.533 .$$

O número médio de saltos por pedido pode ser calculado exactamente se a topologia e a matriz de pedidos da rede forem conhecidas. No entanto, o nosso objectivo é determinar o número médio de saltos por pedido conhecendo apenas o número de nós e o número de ligações, assumindo pedidos uniformes. Nas subsecções seguintes são apresentadas cinco aproximações para este problema.

### 2.3.1 Aproximação baseada numa rede regular com grau 4

Vamos considerar uma rede em que todos os nós têm grau quatro, isto é uma rede regular de grau 4 (4-regular), com o número de nós a tender para infinito, como exemplificado na Figura 2.2.

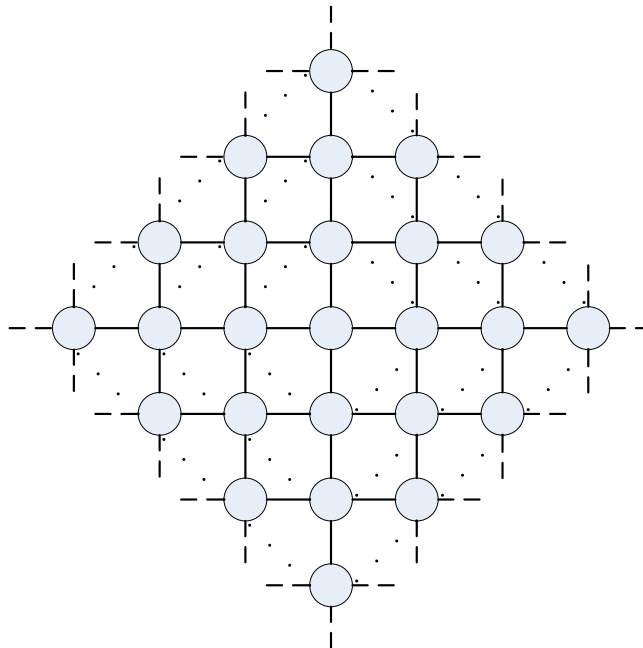


Fig. 2.2 Rede 4-regular, com número de nós a tender para infinito.

Na rede considerada podemos observar que o número de nós que está à distância mínima  $h$  do nó central,  $N_h$ , depende do valor médio do grau do nó da seguinte forma

$$N_h = \langle \delta \rangle h. \quad (2.20)$$

Podemos ainda escrever

$$N = 1 + \sum_{h=1}^{H_c} N_h = 1 + \sum_{h=1}^{H_c} \langle \delta \rangle h = 1 + \langle \delta \rangle \sum_{h=1}^{H_c} h, \quad (2.21)$$

em que  $H_c$  é a distância do nó central ao nó mais distante.

O resultado de um somatório pode ser aproximado por um integral da seguinte forma,

$$\sum_{k=1}^n f(k) \approx \int_0^n f(x) dx \quad (2.22)$$

desta forma podemos reescrever a expressão (2.21) como

$$N = 1 + \sum_{h=1}^{H_c} \langle \delta \rangle h = 1 + \langle \delta \rangle \sum_{h=1}^{H_c} h \approx 1 + \langle \delta \rangle \int_0^{H_c} h dh = 1 + \frac{\langle \delta \rangle H_c^2}{2}. \quad (2.23)$$

O número total de saltos,  $h_T$ , para o nó central pode ser obtido,

$$h_T = \sum_{h=1}^{H_c} N_h h = \sum_{h=1}^{H_c} h^2 \langle \delta \rangle = \langle \delta \rangle \sum_{h=1}^{H_c} h^2 \approx \langle \delta \rangle \int_0^{H_c} h^2 dh = \langle \delta \rangle \frac{H_c^3}{3}. \quad (2.24)$$

Assumindo que (2.24) é válida para todos os nós e considerando os  $N(N-1)$  pedidos unidireccionais, podemos obter o número médio de saltos

$$\langle h \rangle \approx \frac{N h_T}{N(N-1)} = \frac{\langle \delta \rangle \frac{H_c^3}{3}}{\langle \delta \rangle \frac{H_c^2}{2}} = \frac{2}{3} H_c, \quad (2.25)$$

ou substituindo  $H_c$  usando a expressão (2.23) [2],

$$\langle h \rangle = \frac{2}{3} \sqrt{2} \sqrt{\frac{N-1}{\langle \delta \rangle}} = 0.94 \sqrt{\frac{N-1}{\langle \delta \rangle}}. \quad (2.26)$$

Notemos que a aproximação efectuada em (2.25) resulta do facto do nó central ser um nó particular.

As expressões (2.21) e (2.24) podem ser calculadas evitando-se a aproximação (2.22) para resolver o somatório (ver anexo A1).

### 2.3.2 Aproximação estatística considerando 14 redes

No artigo [2] é apresentada uma aproximação para o número médio de saltos por pedido obtida através de um estudo estatístico, baseado no método dos mínimos quadrados, considerando 14 redes em que o número de nós está compreendido entre 4 e 100, e a média do grau do nó é maior que 2.5 e menor que 5. O autor considerou que o valor médio do número de saltos por pedido, considerando um modelo de pedidos uniforme, pode ser razoavelmente aproximado por

$$\langle h \rangle \approx 1.12 \sqrt{\frac{N}{\langle \delta \rangle}}, \quad (2.27)$$

com um erro de 10% para as 14 redes consideradas, ou ainda por

$$\langle h \rangle \approx \sqrt{\frac{(N-2)}{(\langle \delta \rangle - 1)}}, \quad (2.28)$$

com um erro de 5% para as referidas redes.

### 2.3.3 Aproximação usando o majorante de Moore

Outra aproximação [3] pode ser obtida usando uma variação do majorante de Moore [4]. O majorante de Moore dá-nos um majorante para o número de nós,  $N$ , de uma rede regular com diâmetro  $H$ , definido como sendo o máximo  $h_{ij}$  da rede. Quando o grau é maior que 2 o majorante de Moore diz-nos que

$$N \leq 1 + \delta \sum_{h=1}^H (\delta - 1)^{h-1} = 1 + \delta \frac{(\delta - 1)^H - 1}{\delta - 2}. \quad (2.29)$$

O majorante de Moore pode ser obtido da seguinte forma. No caso trivial de  $\delta=1$  temos  $N=2$  e  $H=1$ . No caso de  $\delta=2$ , a topologia de rede é um anel e  $N \leq 2H+1$ . Sendo  $N$  igual  $2H+1$  se o anel tiver um número ímpar de nós ou  $N$  igual a  $2H$  se o anel tiver um número par de nós. Vamos agora considerar que o grau é maior que 2, caso considerado em (2.29).

Conhecendo o grau e o diâmetro de uma rede regular podemos construir uma árvore de Moore, ver figura 2.3. Um nó é escolhido para raiz, esse nó está ligado a  $\delta$  nós que estão à distância de um salto, por sua vez cada um desses nós está ainda ligado a  $\delta-1$  nós e assim sucessivamente até que a árvore tenha  $H$  níveis. Assim temos a garantia de ter todos os nós na árvore de Moore. Notemos, no entanto, que podem aparecer nós repetidos.

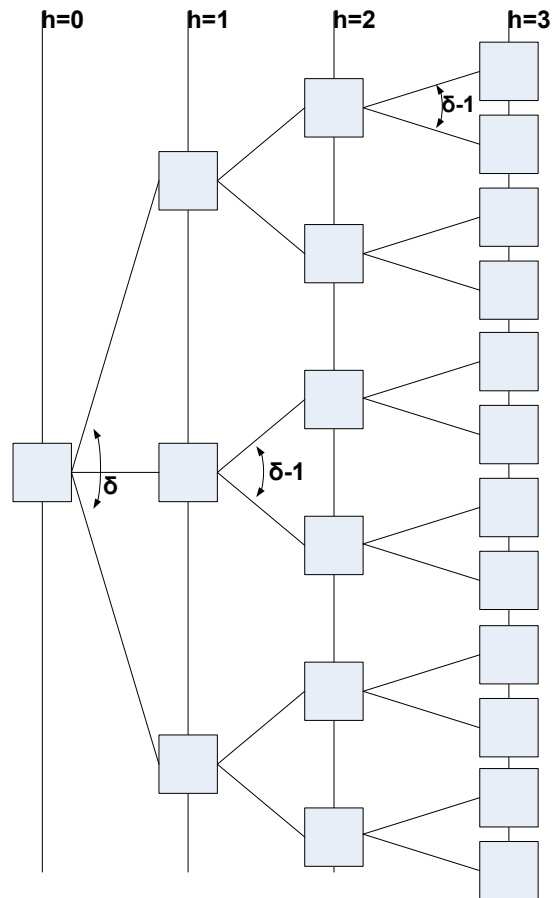


Fig. 2.3 Árvore de Moore para uma rede regular com diâmetro 3.

Para tornar a explicação mais clara vamos considerar a rede 3-regular da figura 2.4 ,

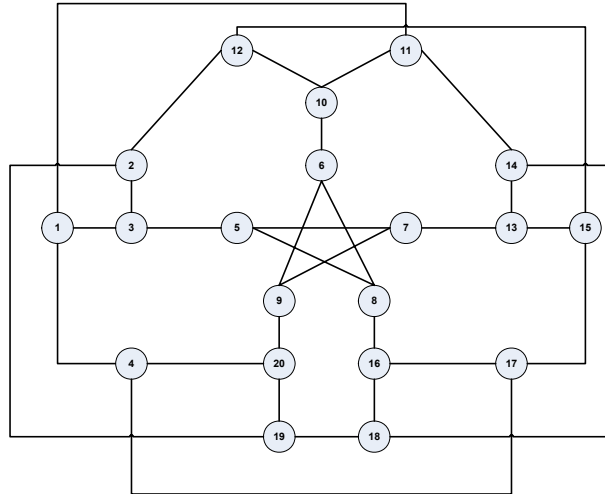


Fig. 2.4 Rede 3-regular, com  $H=3$  e  $N=20$ .

a árvore de Moore para esta rede é apresentada na figura 2.5 .

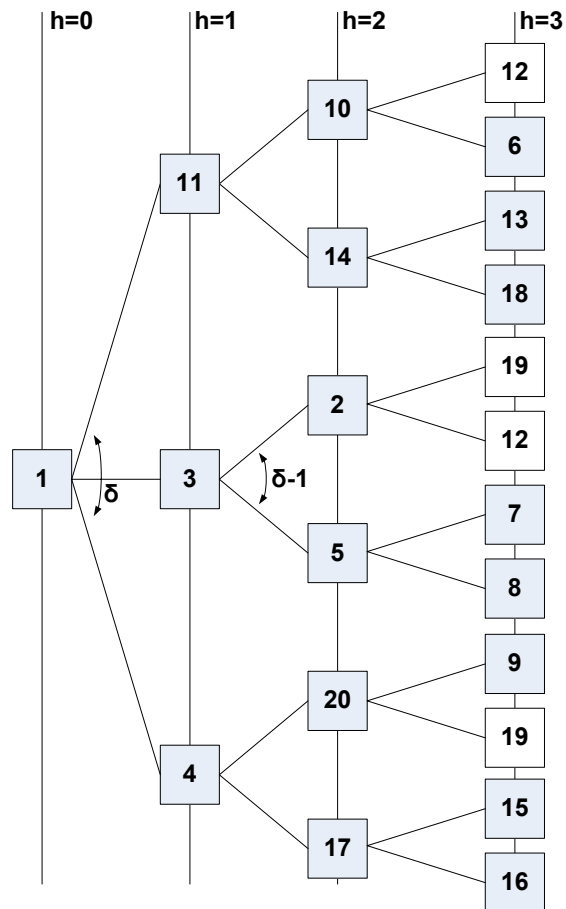


Fig. 2.5 Árvore de Moore rede 3-regular, com  $H=3$  e  $N=20$ .

Na raiz,  $h=0$ , temos um nó, no primeiro nível,  $h=1$ , temos  $\delta$  nós, no segundo nível,  $h=2$ , temos  $(\delta-1)\delta$  nós, no terceiro nível,  $h=3$ , teremos  $\delta(\delta-1)^2$  e assim sucessivamente. Logo o número total de nós que estão na árvore é igual a

$$1 + \delta \sum_{h=1}^H (\delta-1)^{h-1} = 1 + \delta \frac{(\delta-1)^H - 1}{\delta-2},$$

no entanto porque podem aparecer nós repetidos, ver Figura 2.5 e os nós 12 e 19, temos que

$$N \leq 1 + \delta \sum_{h=1}^H (\delta-1)^{h-1} = 1 + \delta \frac{(\delta-1)^H - 1}{\delta-2}. \quad (2.30)$$

Assim para o caso apresentado na Figura 2.4 o majorante de Moore é igual a 22 e o número de nós é de facto 20.

Conhecendo o número de nós,  $N$ , e o grau dos nós,  $\delta$ , é possível obter um minorante para o diâmetro da rede, invertendo a expressão (2.30).

$$\frac{(N-1)(\delta-2)}{\delta} + 1 \leq (\delta-1)^H$$

$$H \geq \log_{(\delta-1)} \left[ \frac{(N-1)(\delta-2)}{\delta} + 1 \right]$$

Usando a base neperiana para o logaritmo obtemos

$$H \geq H_{\min} = \frac{\ln \left[ \frac{(N-1)(\delta-2)}{\delta} + 1 \right]}{\ln(\delta-1)}. \quad (2.31)$$

Em [4] é obtida uma aproximação para o número médio de saltos por pedido assumindo,  $\delta \approx \langle \delta \rangle$  e  $H_{\min} \approx \langle h \rangle$ , na expressão (2.31)

$$\langle h \rangle \approx \frac{\ln \left[ \frac{(N-1)(\langle \delta \rangle - 2)}{\langle \delta \rangle} + 1 \right]}{\ln(\langle \delta \rangle - 1)}. \quad (2.32)$$

### 2.3.4 Aproximação estatística considerando 2 milhões de redes

Para um determinado número de nós e ligações existe um determinado número de topologias possíveis, a cada uma destas topologias corresponderá uma média de saltos por pedido,  $\langle h \rangle$ . Vamos considerar apenas redes sobreviventes, isto significa que há pelo menos dois caminhos com ligações disjuntas entre qualquer par de nós. Portanto, o grau de cada nó é sempre maior ou igual a dois.

Para um  $N$  específico e considerando apenas redes sobreviventes o número de ligações que uma rede pode ter está compreendido entre,  $L_{min}$ , que corresponde a uma topologia em anel, (ver Figura 2.6-a), e  $L_{max}$  que corresponde a uma topologia em que todos os nós estão directamente ligados entre si, rede completa (ver Figura 2.6-b)). Atendendo a que num anel o número de ligações é igual ao número de nós temos

$$L_{min} = N, \tag{2.33}$$

e porque numa rede completa o número de ligações é  $N(N-1)/2$  temos

$$L_{max} = \frac{N(N-1)}{2}. \tag{2.34}$$

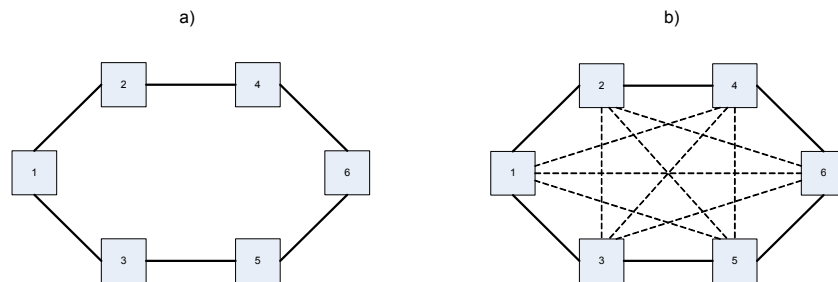


Fig. 2.6 Topologias de redes: a) Rede com L mínimo b) Rede com L máximo.

O número de diferentes topologias sobreviventes,  $T_{N,L}$ , partindo de um anel, pode ser calculado com base na fórmula geral de combinações sem repetição [6]

$$C_r^n = \frac{n!}{r! (n-r)!}, \tag{2.35}$$

onde  $n$  é o total de elementos e  $r$  o número de elementos escolhidos para as combinações.

Para um dado  $N$  e um dado  $L$  o número de possíveis redes sobreviventes,  $T_{N,L}$ , é dado por

$$C_{L-L_{min}}^{L_{max}-L_{min}},$$

isto é

$$T_{N,L} = \frac{(L_{\max} - L_{\min})!}{(L - L_{\min})!(L_{\max} - L)!} \quad (2.36)$$

Como  $L_{\max}$  aumenta com  $N^2$  e  $L_{\min}$  com  $N$  o número de combinações possíveis aumenta muito com o aumento de  $N$ . Ainda assim, verifica-se que existe um número reduzido de possíveis valores para a média do número de saltos por pedido [7]. Considerando o caso  $N=6$  e  $L=8$  temos que,

$$L_{\max} = \frac{6(6-1)}{2} = 15,$$

$$L_{\min} = 6,$$

e

$$T_{NL} = \frac{(15-6)!}{(8-6)!(15-8)!} = 36.$$

Embora existam 36 diferentes topologias possíveis, ao calcularmos a média de saltos por pedido verificamos que só obtemos dois valores, 1.533 e 1.467, com probabilidade 0.472 e 0.528, respectivamente.

Vamos agora considerar redes maiores que devido à complexidade dos cálculos só podem ser tratadas computacionalmente. Para tratar estes casos desenvolvemos um algoritmo para determinar o valor de  $\langle h \rangle$ . O fluxograma do algoritmo é apresentado na Figura 2.7.

O algoritmo necessita como parâmetros de entrada do número de nós,  $N$ , o grau médio máximo,  $\langle \delta_{\max} \rangle$ , o grau médio mínimo,  $\langle \delta_{\min} \rangle$ , assim como o número de realizações que pretendemos efectuar,  $R_s$ . Em cada realização são feitas  $S_N$  simulações. Cada simulação corresponde a uma topologia de rede com grau compreendido entre  $\langle \delta_{\min} \rangle$  e  $\langle \delta_{\max} \rangle$ . O número de simulações,  $S_N$ , é dependente do grau médio,  $\langle \delta \rangle$ , de cada vez que se adiciona uma ligação, ou seja,

$$S_N = \lfloor L_{\delta_{\max}} \rfloor - \lfloor L_{\delta_{\min}} \rfloor + 1,$$

em que

$$\langle \delta_{\max} \rangle = \frac{2L_{\delta_{\max}}}{N} \quad \text{e} \quad \langle \delta_{\min} \rangle = \frac{2L_{\delta_{\min}}}{N},$$

e em que  $\lfloor x \rfloor$  representa o maior inteiro menor que  $x$ .

O algoritmo inicia com a interligação de todos os nós formando um anel, assim garante-se que a rede é sobrevivente. De seguida e enquanto o grau médio mínimo,  $\langle \delta_{\min} \rangle$ , não for atingido são



adicionadas ligações aleatoriamente entre quaisquer dois nós da rede não ligados directamente. No passo seguinte é calculado e guardado o valor médio de saltos por pedido para essa topologia, para isso é usado o algoritmo de Dijkstra, isto repete-se até que o grau máximo,  $\langle \delta_{max} \rangle$ , seja atingido. Por sua vez este ciclo repete-se  $R_s$  vezes.

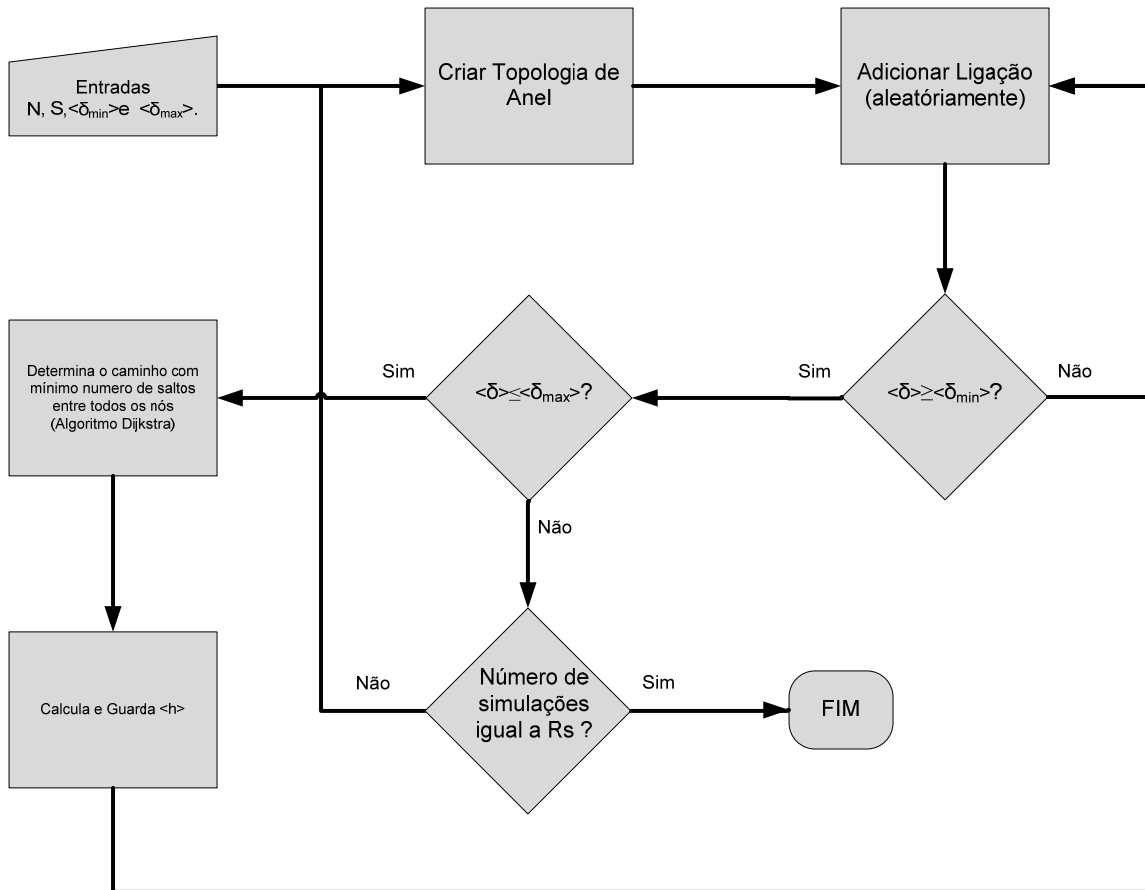


Fig. 2.7 Algoritmo determinar o valor médio de saltos por pedido.

Utilizando o algoritmo apresentado na Figura 2.7 e considerando o número de nós,  $N$ , compreendido entre 5 e 120 assim como o grau médio entre 2.5 e 4.5 e o número de realizações igual a 1000, simulámos mais de 2 milhões de topologias, o que correspondeu a aproximadamente 25 dias de cálculo num computador Pentium IV. Os resultados completos destas simulações podem ser observados no anexo A2.

Aqui vamos apenas analisar quatro casos, correspondente aos pares  $(N,L)$  igual a  $(15,19)$ ,  $(15,33)$ ,  $(100,125)$  e  $(100,224)$ .

Apresentamos na Figura 2.8 histogramas com os resultados obtidos.

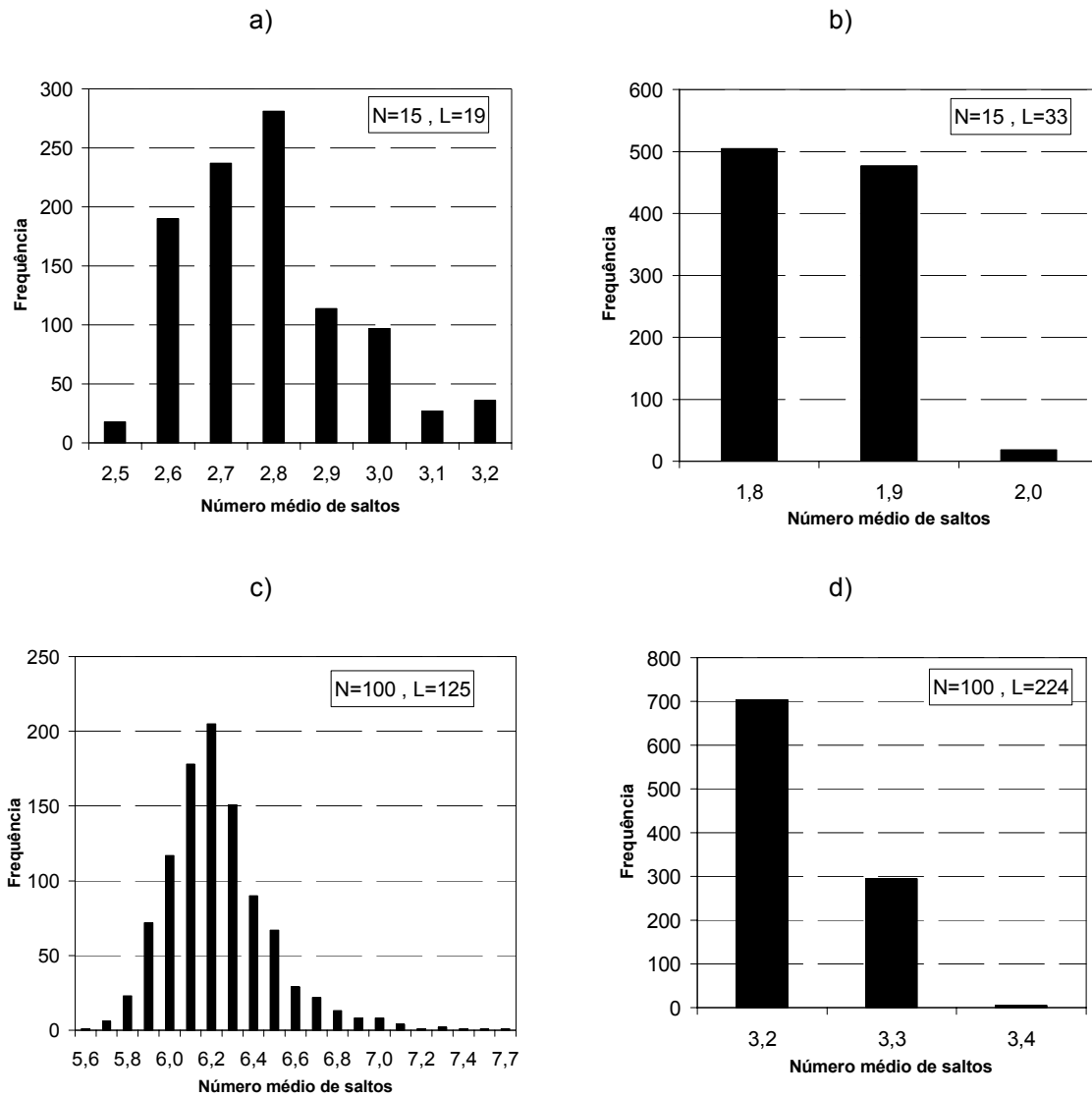


Fig. 2.8 Histogramas com número médio de saltos para os pares a)(15,19); b)(15,33);c)(100,125);d)(100,224).

A título de exemplo, uma rede com quinze nós,  $N=15$ , e dezanove ligações,  $L=19$ , possui  $T_{15,19}=1.50 \times 10^{267}$  combinações possíveis. No entanto, observamos na amostra da Figura 2.5-a), constituída por mil topologias, que foram encontrados apenas oito valores possíveis para o valor médio do número de saltos por pedido,  $\langle h \rangle$ . Verificamos ainda que o  $\langle h \rangle = 2.8$  tem uma probabilidade maior de ser encontrado.

A partir do conjunto de dados simulados, dois milhões de redes, encontramos o  $\langle h \rangle$  mais provável para cada  $N$  e  $L$  utilizando uma aproximação estatística, usando regressão não linear com o método dos mínimos quadrados foi estimada a expressão,

$$\langle h \rangle \cong \begin{cases} 0.66 - 0.011N + \frac{1.23 + 0.31N - 0.002N^2}{\langle \delta \rangle}, & N < 60 \\ 0.31 - 0.006N + \frac{-9.67 + 5.37 \ln(N)}{\langle \delta \rangle}, & N \geq 60 \end{cases}, \quad (2.37)$$

que possui dois ramos devido à dificuldade de se conseguir uma boa escalabilidade com funções sem ramos. Em redes com menos de 60 nós o número de saltos aumenta seguindo um polinómio de segunda ordem em  $N$ , enquanto para redes com mais de 60 nós tem um aumento que se ajusta melhor a uma função logarítmica.

O critério utilizado para determinar a melhor aproximação é o coeficiente de determinação [7],  $R^2$ , que é uma variável que mede a precisão do ajuste da função ao conjunto de dados e o seu valor varia entre 0 e 1, correspondendo o valor 1 a um ajuste perfeito. Considerando a expressão (2.37) e para as 1000 realizações efectuadas, os coeficientes de determinação,  $R^2$ , são 0.90 e 0.96 para o primeiro e segundo ramo, respectivamente.

### 2.3.5 Aplicação das diferentes aproximações à rede exemplo

Considerando a nossa rede exemplo,  $N=6$  e  $L=8$ , observámos anteriormente que o grau do nó,  $\langle \delta \rangle$ , é 2.667, o número total de pedidos na rede,  $D$ , é 15 e o valor médio de saltos de um pedido,  $\langle h \rangle$ , é 1.533 .

Utilizando as aproximações formuladas em (2.26), (2.27), (2.28), (2.32) e (2.37) teremos respectivamente,

$$\langle h \rangle = 0.94 \sqrt{\frac{N-1}{\langle \delta \rangle}} = 1.287$$

$$\langle h \rangle = 1.12 \sqrt{\frac{N}{\langle \delta \rangle}} = 1.680$$

$$\langle h \rangle = \sqrt{\frac{N-2}{\langle \delta \rangle - 1}} = 1.549$$

$$\langle h \rangle = \frac{\ln \left[ \frac{(N-1)(\langle \delta \rangle - 2)}{\langle \delta \rangle} + 1 \right]}{\ln(\langle \delta \rangle - 1)} = 1.590$$

$$\langle h \rangle = 0.66 - 0.011 \times 6 + \frac{1.23 + 0.31 \times 6 - 0.002 \times 6^2}{2.667} = 1.725$$

O erro absoluto de cada aproximação é, respectivamente, 0.246, 0.147, 0.016, 0.057, 0.192. Assim podemos concluir que a expressão (2.27) é a que tem menor erro absoluto para a rede exemplo considerada.

### 2.3.6 Validação das aproximações apresentadas

De forma a podermos comparar as diferentes aproximações apresentamos na Figura 2.9 gráficos com os resultados obtidos através das diferentes aproximações e o valor mais provável, considerando 1000 realizações por par (N,L) do valor médio de saltos por pedido,  $\langle h \rangle$ . Notemos que ao definirmos o par (N,L) o grau médio,  $\langle \delta \rangle$ , fica inequivocamente definido, ver expressão (2.17). Estes gráficos foram obtidos considerando redes com grau médio constante e aumentando o numero de nós. Podemos verificar que as equações (2.32) e (2.37) tem bom ajuste ao valor mais provável, excepto para redes com  $\langle \delta \rangle < 3$ , em que (2.26) e (2.37) tem melhor ajuste. As expressões (2.26), (2.27) e (2.28) apresentam problemas quando aumentamos os números de nós da rede.

a)

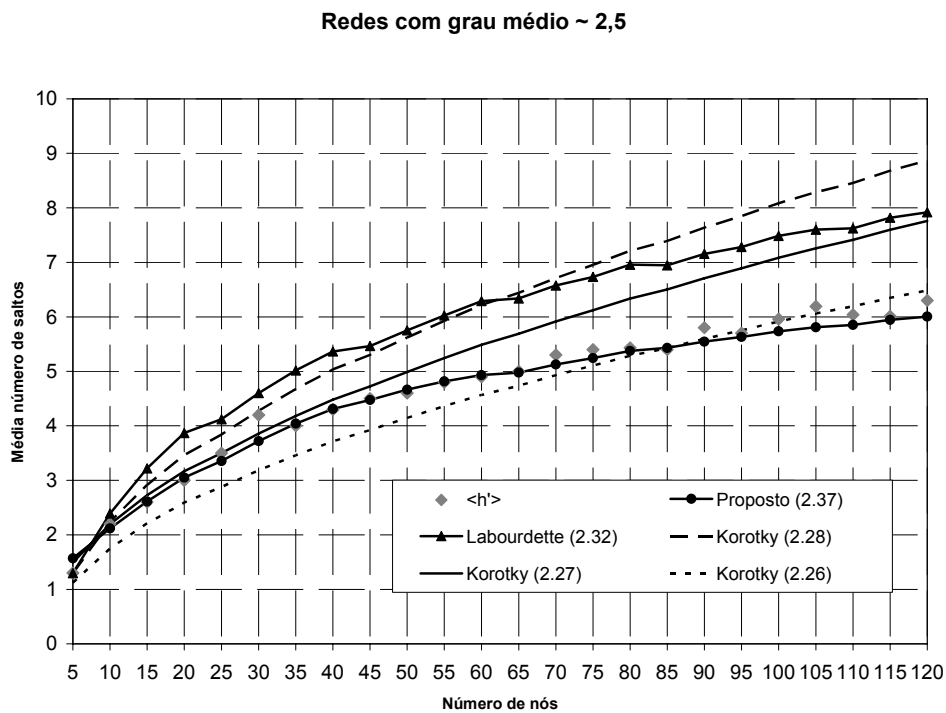


Fig. 2.9- a) Média numero de saltos,  $\langle h \rangle$ , em redes com  $\langle \delta \rangle \approx 2.5$ .

b)

Redes com grau médio ~ 3

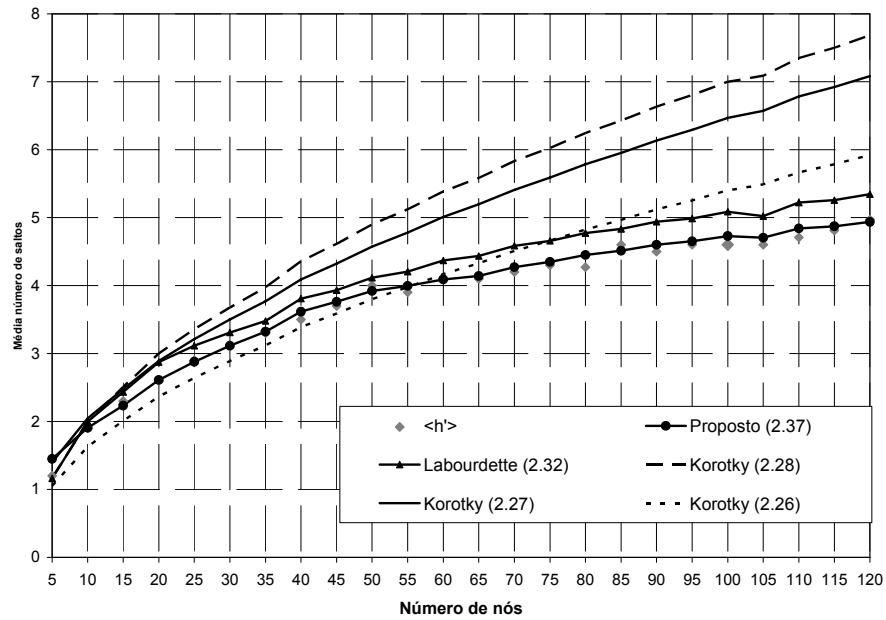


Fig. 2.9-b) Média numero de saltos,  $\langle h \rangle$ , em redes com  $\langle \delta \rangle \approx 3$ .

c)

Redes com grau médio ~ 3,5

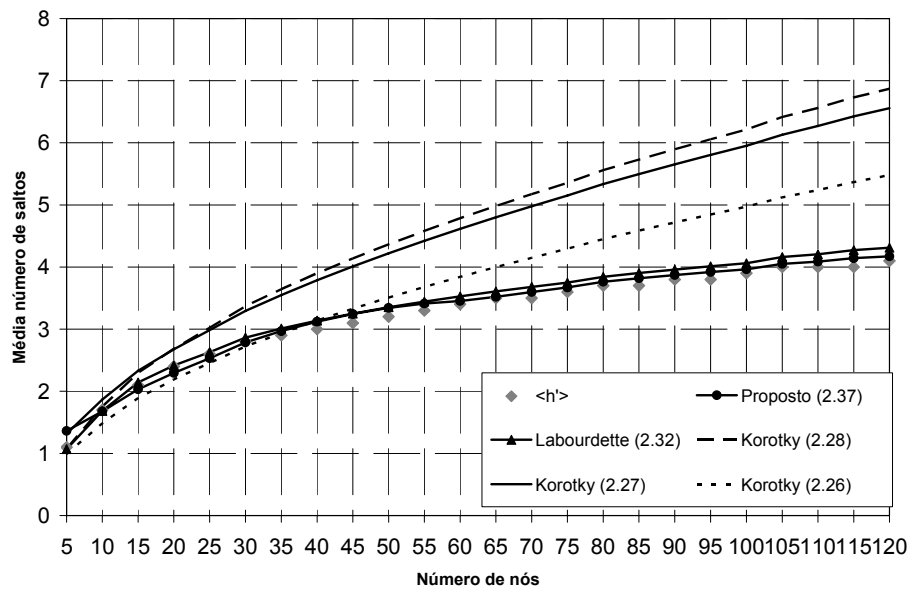


Fig. 2.9-c) Média numero de saltos,  $\langle h \rangle$ , em redes com  $\langle \delta \rangle \approx 3.5$ .

d)

Redes com grau médio = 4

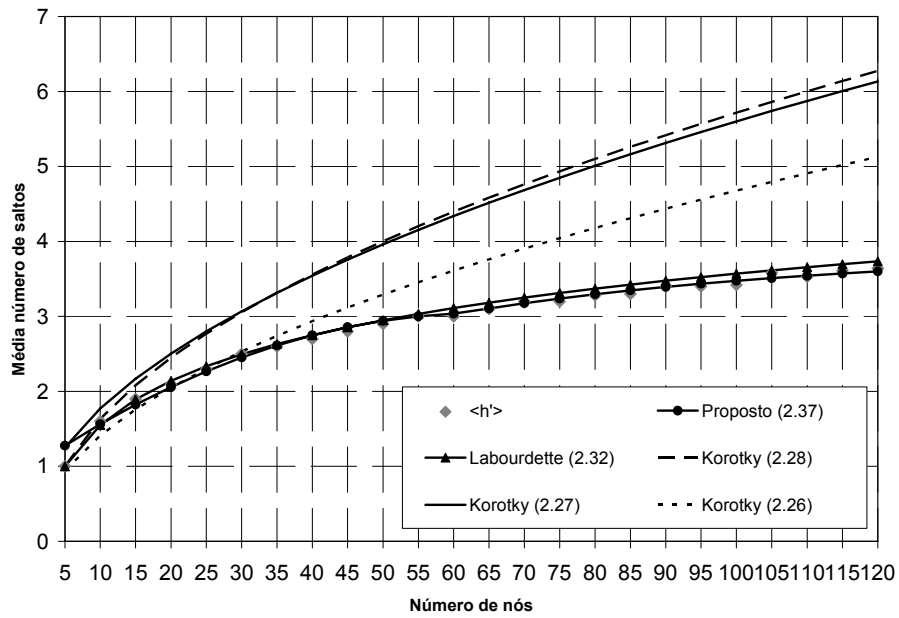


Fig. 2.9-d) Média numero de saltos,  $\langle h \rangle$ , em redes com  $\langle \delta \rangle \approx 4$ .

e)

Redes com grau do nó  $\sim 4,5$

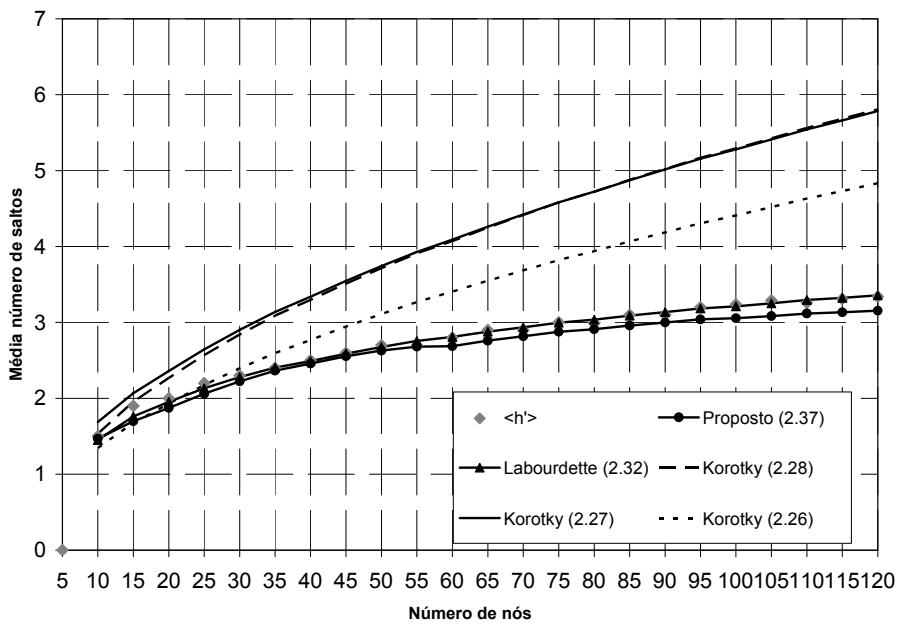


Fig. 2.9-e) Média numero de saltos,  $\langle h \rangle$ , em redes com  $\langle \delta \rangle \approx 4.5$ .

Na figura 2.10 é apresentado o erro médio quadrático para cada uma das aproximações apresentadas anteriormente. Sendo o erro médio quadrático definido por

$$\langle \varepsilon^2 \rangle = \frac{1}{S_N} \sum_{L=L_{min}}^{L_{max}} \left( \langle h_{(N,L)} \rangle_{sim} - \langle h_{(N,L)} \rangle \right)^2,$$

sendo  $S_N$  o número de simulações correspondente às topologias com  $N$  nós e grau médio compreendido entre 2.5 e 4.5, em que  $L_{min}$  e  $L_{max}$  são o número de ligações correspondentes, respectivamente, a  $\langle \delta \rangle_{min}$  e  $\langle \delta \rangle_{Max}$ ,  $\langle h_{(N,L)} \rangle_{sim}$  o número médio de saltos da topologia simulada e  $\langle h_{(N,L)} \rangle$  é a aproximação para o número médio de saltos relativamente a uma rede com  $N$  nós e  $L$  ligações.

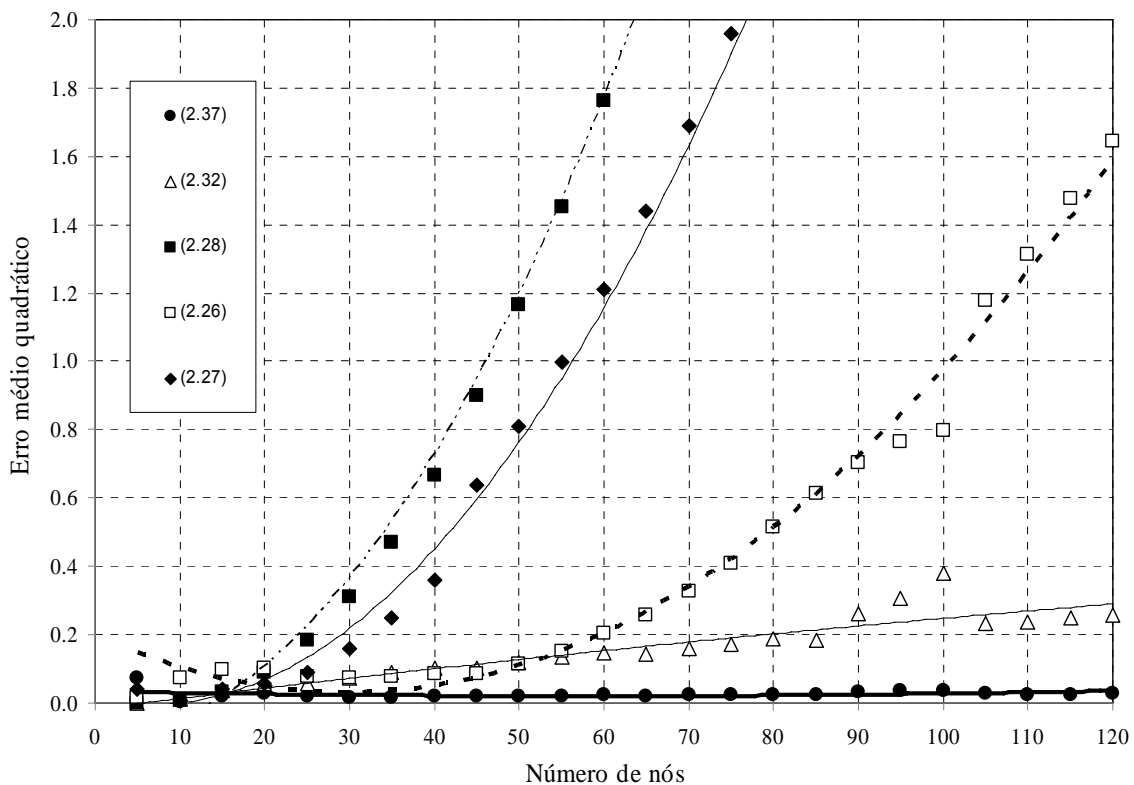


Fig. 2.10 Erro médio quadrático das aproximações.

Observando a Figura 2.10 podemos verificar que a aproximação proposta expressão (2.37) é a que melhor se ajusta ao valor mais provável do valor médio do número de saltos por pedido, apresentando um erro médio quadrático constante e inferior a 0.03 para todos os casos considerados. A expressão (2.32) é bastante boa apresentando um aumento aproximadamente linear do erro quadrático médio com  $N$ . Para  $N$  pequeno as expressões (2.27) e (2.28) são boas aproximações mas rapidamente perdem qualidade com o acréscimo de  $N$ , estas expressões

assim como a expressão (2.26) apresentam um aumento exponencial do erro médio quadrático com  $N$ .

## 2.4 Número médio de canais ópticos por ligação

Um pedido ao ser encaminhado na rede entre dois nós ocupa uma unidade de transmissão, canal, em cada ligação por ele percorrida, o número mínimo de ligações ocupados por um pedido entre os nós  $i$  e  $j$  é, como visto anteriormente, dado por  $h_{ij}$ .

O número médio de canais por ligação,  $\langle W^o \rangle$ , pode ser calculado exactamente se a topologia, a matriz de pedidos e o encaminhamento forem conhecidos. No entanto, o nosso objectivo é determinar o número médio de canais por ligação conhecendo apenas o número de nós e o número de ligações ou a probabilidade de uma ligação ser usada no encaminhamento do pedido, assumindo pedidos uniformes. Nas subsecções seguintes são apresentadas duas soluções para este problema.

### 2.4.1 Número médio de canais ópticos por ligação, conhecendo-se $N$ , $L$ e $\langle h \rangle$

O número total de canais ópticos na rede é designado por  $W^0$  e pode ser calculado conhecendo-se o número de canais ópticos em cada ligação, isto é

$$W^0 = \sum_{l=1}^L W^0_l.$$

em que  $W^0_l$  é o número total de canais ópticos que atravessam a ligação  $l$ . O número total de canais numa ligação,  $W^0_l$ , irá também ser designado por  $W^0_{ij}$  quando pretendemos especificar os nós extremos da ligação  $l$ .

O número médio de canais ópticos bidireccionais numa ligação,  $\langle W^o \rangle$ , pode ser determinado por,

$$\langle W^o \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W^0_l = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 1 \times h_{ij} = \frac{1}{L} \frac{D}{D} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N h_{ij} = \frac{D \langle h \rangle}{L}. \quad (2.38)$$

Considerando as expressões (2.9) e (2.17), podemos reformular (2.38),

$$\langle W^o \rangle = \frac{N \langle d \rangle \langle h \rangle}{2L} = \frac{\langle d \rangle \langle h \rangle}{\langle \delta \rangle}, \quad (2.39)$$



ou ainda , considerando (2.10),

$$\langle W^o \rangle = (N-1) \frac{\langle h \rangle}{\langle \delta \rangle}. \quad (2.40)$$

Notemos ainda que para o modelo de trafego considerado o número médio de canais ópticos bidireccionais por ligação é igual ao total de saltos dividido pelo número de ligações

$$\langle W^o \rangle = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N h_{ij}. \quad (2.41)$$

Igualando as expressões (2.40) e (2.41) e considerando (2.17), obtemos,

$$\langle W^o \rangle = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N h_{ij} = \frac{N(N-1) \langle h \rangle}{2L}. \quad (2.42)$$

Utilizando a nossa rede exemplo e realizando um encaminhamento, escolhendo sempre caminhos com numero mínimo de saltos, obtemos (ver figura 2.11),

$$W_{12} = 3 \quad W_{24} = 4 \quad W_{13} = 2 \quad W_{46} = 3 \quad W_{35} = 5 \quad W_{56} = 2 \quad W_{23} = 2 \quad W_{45} = 2.$$

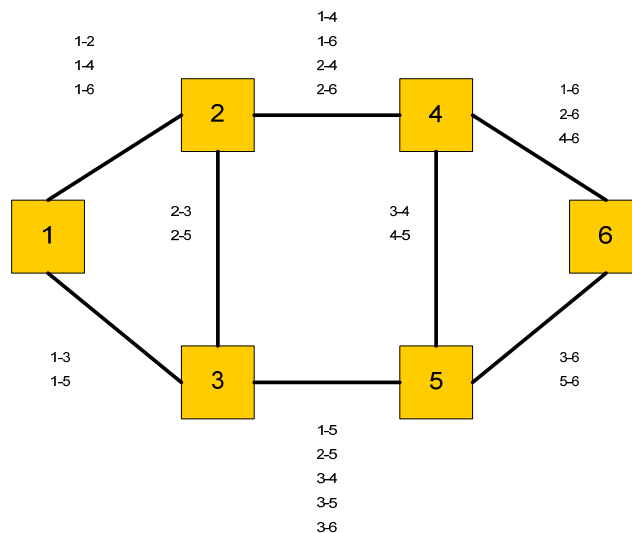


Fig. 2.11 Encaminhamento pedidos, rede exemplo.

O número médio de canais ópticos numa ligação,

$$\langle W^o \rangle = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L W_i = \frac{23}{8} = 2.875.$$

Utilizando a fórmula expressa em (2.40), podemos calcular a média de canais ópticos considerando,

$$\langle d \rangle = 5 \quad \langle h \rangle = 1.533 \quad \langle \delta \rangle = 2.667$$

como sendo

$$\langle W^o \rangle = 2.875.$$

#### 2.4.2 Número médio de canais ópticos por ligação, conhecendo-se $p_{k,ij}$

Entre dois nós podem existir diferentes caminhos que obedecem ao critério do número de saltos mínimos, por isso o número de canais ópticos numa ligação depende do encaminhamento, i.e., da escolha dos caminhos.

Seja  $l_{ij}$  o número total de ligações distintas percorridas pelos diferentes caminhos possíveis e  $p_{k,ij}$  a probabilidade de a ligação  $k$  ser escolhida podemos escrever,

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^{l_{ij}} p_{k,ij}. \quad (2.43)$$

Substituindo a expressão (2.43) em (2.41) obtemos,

$$\langle W^o \rangle = \frac{1}{L} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sum_k^{l_{ij}} p_{k,ij}. \quad (2.44)$$

Considerando que  $p_k$  é independente de  $k$  em (2.43) temos

$$p_k = h_{ij} / l_{ij}. \quad (2.45)$$

Notemos que (2.45) é verdadeira se os caminhos forem disjuntos.

Como exemplo podemos considerar a rede apresentada na figura 2.12, para encaminhar um pedido entre o nó 1 e 11 temos três caminhos possíveis com 4 saltos: caminho 1 utilizando os nós 1-2-3-4-11, caminho 2 utilizando os nós 1-5-6-7-11 e o caminho 3 utilizando os nós 1-8-9-10-11. O número de ligações distintas percorridas pelos diferentes caminhos é  $l_{ij}=12$ , sendo a probabilidade de uma ligação ser escolhida  $1/3$ , porque a probabilidade de escolher um dos três caminhos possíveis é  $1/3$ .

Aplicando a expressão (2.45) obtemos,

$$p_k = h_{ij} / l_{ij} = 1/3,$$

ou seja, o resultado pretendido.

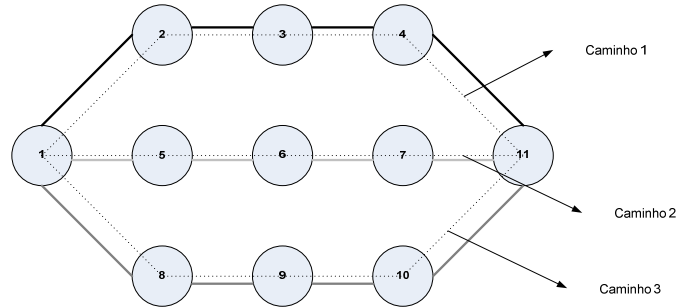


Fig. 2.12 Exemplo cálculo probabilidade.

Considerando a nossa rede exemplo e utilizando a expressão (2.44),

$$\begin{aligned} \langle W^o \rangle &= \frac{1}{L} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sum_k^{l_{ij}} p_{k,ij} \\ \langle W^o \rangle &= \frac{1}{8} \left[ \begin{aligned} &(1)+(1)+(1+1)+(1+1) + \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) + \\ &(1)+(1) + \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) + (1+1) + \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) + (1) \\ &+ (1+1) + (1) + (1) + (1) \end{aligned} \right] \\ \langle W^o \rangle &= \frac{23}{8} = 2.875. \end{aligned}$$

Onde  $p_{k,ij}$  pode ser aproximado usando a expressão (2.45). Notemos que neste caso o resultado é o mesmo do que na subsecção anterior, porque os diferentes caminhos entre quaisquer pares de nós são todos disjuntos.

## 2.5 Número de canais ópticos numa ligação

O número de canais ópticos numa ligação é dependente do encaminhamento. Vamos considerar  $r_{ij}$  como sendo o número de caminhos possíveis entre os nós  $i$  e  $j$ , que obedecem à regra do número mínimo de saltos. Considerando todos os pares de nós possíveis, podemos definir uma matriz com o número de caminhos  $[r]$ .

Para a rede exemplo temos

$$r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

conhecendo-se  $[r]$  e considerando o nosso modelo de tráfego podemos determinar o número total de encaminhamentos possíveis,  $R$ , isto é

$$R = \prod_{i=1}^{N-1} \prod_{j=i+1}^N r_{ij} \quad (2.46)$$

cada encaminhamento pode ser representado por  $L$  vectores, em que  $L$  é o número de ligações e que  $D$  é o número de pedidos. Vamos representar cada elemento do vector por,  $X_{r,d,l}$ , estes elementos assumem o valor 1 se no encaminhamento  $r$  o pedido  $d$  for encaminhado pela ligação  $l$ . Considerando a rede exemplo e para o encaminhamento apresentado na figura 2.11 temos

$$X_{r,d,l} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

considerando a ligação 1 a interligação entre os nós 1 e 2, ligação 2 a interligação entre os nós 1 e 3, ligação 3 a interligação entre os nós 2 e 3, ligação 4 a interligação entre os nós 2 e 4, ligação 5 a interligação entre os nós 3 e 5, ligação 6 a interligação entre os nós 4 e 5, ligação 7 a interligação entre os nós 4 e 6, ligação 8 a interligação entre os nós 5 e 6 e que os pedidos são numerados da seguinte forma,

|           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        |
| $d_{1,2}$ | $d_{1,3}$ | $d_{1,4}$ | $d_{1,5}$ | $d_{1,6}$ | $d_{2,3}$ | $d_{2,4}$ | $d_{2,5}$ | $d_{2,6}$ | $d_{3,4}$ | $d_{3,5}$ | $d_{3,6}$ | $d_{4,5}$ | $d_{4,6}$ | $d_{5,6}$ |

O número de canais ópticos numa ligação para um determinado encaminhamento,  $W_{l,r}$ , pode ser expresso como

$$W_{l,r} = \sum_{d=1}^D X_{r,d,l}, \quad (2.47)$$

se considerarmos todas as ligações podemos escrever

$$W^0 = \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D X_{l,r,d}, \quad (2.48)$$

sendo  $W^0$  o número total de pedidos na rede.

O número de pedidos numa ligação depende do encaminhamento escolhido, por isso podemos definir uma matriz,  $[W_r]$ , para cada encaminhamento onde cada elemento  $W_{r,ij}$  representa o número de canais ópticos que passam na ligação  $ij$  quando utilizamos o encaminhamento  $r$ .

Considerando a rede exemplo e o encaminhamento realizado na figura 2.11 temos

$$W_r = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 5 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 \end{bmatrix},$$

Considerando os  $R$  possíveis encaminhamentos e usando (2.47) podemos calcular o valor médio do número de canais ópticos numa ligação,  $\langle W_l \rangle$ ,

$$\langle W_l \rangle = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R W_{r,l} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{d=1}^D X_{r,d,l}. \quad (2.49)$$

Notemos que a possibilidade de encontrar uma expressão que nos permita calcular a média e a variância dos pedidos numa ligação sem ser necessário realizar o encaminhamento se encontra em aberto.

Partindo da expressão (2.47) e considerando todas as ligações, podemos expressar o número de pedidos na rede para um encaminhamento como

$$W^o = \sum_{l=1}^L W_{l,r} = \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D X_{l,r,d}. \quad (2.50)$$

Sabendo que todos os encaminhamentos seguem a mesma estratégia, número mínimo de saltos, dos  $R$  encaminhamentos resulta o mesmo número de pedidos nas ligações. Dividindo o número de pedidos nas ligações,  $W^o$ , pelo número de ligações,  $L$ , obtemos o número médio de pedidos nas ligações, e podemos escrever

$$\langle W^o \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W_{l,r} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D X_{l,r,d}. \quad (2.51)$$

## 2.6 Resumo

Neste capítulo especificámos conceitos fundamentais sobre o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte. Apresentámos expressões para cálculo das seguintes variáveis: número total de pedidos, largura de banda por pedido, grau médio dos nós, número médio de saltos por pedido (consideradas 5 aproximações), número médio de pedidos por ligação, número médio de pedidos numa ligação e valor médio do tráfego numa ligação. Na tabela 2.1 é apresentado um resumo das relações consideradas.

| Variáveis                   | Relação                                 | Expressão | Tipo   | Observações                    |
|-----------------------------|---|-----------|--------|--------------------------------|
| Número total de pedidos     | $D = \frac{N \langle d \rangle}{2}$     | (2.9)     | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Média de pedidos            | $\langle d \rangle = N - 1$             | (2.10)    | Exacta | Tráfego uniforme               |
| Largura de banda por pedido | $\tau = \frac{T}{D}$                    | (2.13)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Grau médio dos nós          | $\langle \delta \rangle = \frac{2L}{N}$ | (2.17)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |

|                               |  |        |             |  |
|-------------------------------|--|--------|-------------|--|
| Média de saltos por pedido    | $\langle h \rangle = 0.94 \sqrt{\frac{N-1}{\langle \delta \rangle}}$   | (2.26) | Aproximação | Baseada numa rede 4-regular  |
| Média de saltos por pedido    | $\langle h \rangle \approx 1.12 \sqrt{\frac{N}{\langle \delta \rangle}}$   | (2.27) | Aproximação | Estatística considerando 14 redes reais (erro 10%)                 |
| Média de saltos por pedido    | $\langle h \rangle \approx \sqrt{\frac{(N-2)}{(\langle \delta \rangle - 1)}}$  | (2.28) | Aproximação | Estatística considerando 14 redes reais (erro 5%)                  |
| Média de saltos por pedido    | $\langle h \rangle \approx \frac{\ln \left[ \frac{(N-1)(\langle \delta \rangle - 2)}{\langle \delta \rangle} + 1 \right]}{\ln(\langle \delta \rangle - 1)}$  | (2.32) | Aproximação | Usando majorante de Moore  |
| Média de saltos por pedido    | $\langle h \rangle \approx \begin{cases} \frac{0.66 - 0.011N + \frac{1.23 + 0.31N - 0.002N^2}{\langle \delta \rangle}}{0.31 - 0.006N + \frac{-9.67 + 5.37 \ln(N)}{\langle \delta \rangle}}, & N < 60 \\ \frac{1.23 + 0.31N - 0.002N^2}{\langle \delta \rangle}, & N \geq 60 \end{cases}$ | (2.37) | Aproximação | Estatística considerando 2 milhões de redes geradas aleatoriamente |
| Média de pedidos por ligação  | $\langle W^o \rangle = \frac{\langle d \rangle \langle h \rangle}{\langle \delta \rangle}$   | (2.39) | Exacta      | Independente do modelo tráfego                                     |
| Média de pedidos por ligação  | $\langle W^o \rangle = \frac{1}{L} \frac{1}{2} \sum_i^N \sum_j^{N-1} \sum_k^{l_{ij}} p_{k,i,j}$  | (2.44) | Exacta      | Independente do modelo tráfego                                     |
| Média de pedidos numa ligação | $\langle W_l \rangle = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{d=1}^D X_{l,r,d}$  | (2.49) | Exacta      | Independente do modelo tráfego                                     |
| Média de pedidos nas ligações | $\langle W \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W_{l,r} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D X_{l,r,d}$   | (2.51) | Exacta      | Independente do modelo tráfego                                     |

Tabela 2.1 Resumo das variáveis apresentadas no Capítulo II.

## 2.7 Referências

- [1] E. W. Dijkstra, "A Note on Two Problems in Conexion with Graphs," in *Numerische Math*, vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- [2] S. K. Korotky, "Network Global Expectation Model: A Statistical Formalism for Quickly Quantifying Network Needs and Costs," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol.22, NO. 3, pp. 703-22, March 2004.
- [3] J. F. Labourdette, E. Bouillet, R. Ramamurthy, A. A. Akyama, "Fast Approximate Dimensioning and Performance Analysis of Mesh Optical Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 3, issue 4, pp. 906 – 917, IEEE Press Piscataway, NJ, USA, August 2005.
- [4] M. Miller, J. Siran, "Moore graphs and beyond: A survey of the degree/diameter problem," *The Electronic Journal of Combinatorics*, Dynamic Survey DS14, December 2005.
- [5] P. J. Cameron, "Enumerative Combinatorics: Topics, Thecniques, Algorithms," Cambridge University Press, vol. 1, p. 365, January, 1995.
- [6] C. Pavan, A. Correia, A. N. Pinto, "A Graph Problem in the Context of Optical Networks Dimensioning", in *Proceedings Mathematical Techniques and Problems in Telecommunications* , Leiria , Portugal , vol. 1 , pp. 22 - 25 , September , 2006 .
- [7] J. Pallant, "SPSS Survival Manual," Open University Press, vol. 1, 2 ed. p. 336, November 2004.



# Capítulo 3

## Variáveis do Modelo de Custos com Restauro

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais sobre o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte considerando capacidade de restauro. A título ilustrativo, são aplicadas a uma rede exemplo todas as variáveis necessárias ao modelo apresentado.

Na secção 3.1 é quantificada a capacidade extra,  $\psi$ , necessária para possibilitar o restauro no caso de falha numa ligação. É ainda definido o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ , variável que determina a quantidade de recursos extra que são necessários para garantir restauro. Apresentaremos ainda duas aproximações para o cálculo rápido destas variáveis, uma aproximação obtida por Korotky [1] e uma aproximação estatística obtida através da simulação de mais de 20 mil topologias de redes diferentes. É feita uma análise comparativa entre estas duas aproximações.

A secção 3.2 é dedicada ao estudo do número de portos numa rede óptica. Apresentamos expressões fechadas para o número de portos de entrada e número de portos de entrada/saída. Apresentaremos ainda expressões para portos de entrada, saída e passagem, para portos tributários e de linha. Apresenta-se também expressões que permitem calcular o número de portos tributários e de linha considerando capacidade de restauro. Posteriormente é efectuada uma análise de forma a obtermos uma aproximação para o número de portos de uma rede considerando capacidade de restauro, é também apresentada uma nova aproximação para o número de canais na rede considerando capacidade de restauro.

### 3.1 Capacidade extra e coeficiente de restauro

Vamos definir capacidade extra de uma rede,  $\psi$ , como a soma da capacidade adicionada, canais ópticos, às diferentes ligações de forma a possibilitar o restauro em caso de falha de uma ligação.

O número total de canais ópticos na rede considerando capacidade de restauro, que designaremos por,  $W^k$ , pode ser calculado conhecendo-se o número de canais ópticos activos por ligação,  $W^0$ , e o número de canais ópticos extra por ligação,  $\psi_l$ , isto é,

$$W^k = \sum_{l=1}^L W_l^k = \sum_{l=1}^L (W_l^0 + \psi_l) = \sum_{l=1}^L W_l^0 + \sum_{l=1}^L \psi_l = W^0 + \psi, \quad (3.1)$$

em que  $W_l^k$  é o número total de canais ópticos que atravessam a ligação  $l$ , considerando capacidade de restauro e  $\psi$  o número total de canais ópticos extra necessários na rede.

O número total de canais ópticos numa ligação,  $W_l^k$ , irá também ser designado por  $W_{ij}^k$  quando pretendemos especificar os nós extremos da ligação  $l$ , assim como o número de canais ópticos extra necessários numa ligação será também designado por  $\psi_{ij}$ .

O número médio de canais ópticos por ligação considerando capacidade para restauro,  $\langle W^k \rangle$ , é definido como

$$\langle W^k \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W_l^k = \frac{W^k}{L}, \quad (3.2)$$

ou considerando a expressão (3.1)

$$\langle W^k \rangle = \frac{\sum_{l=1}^L (W_l^0 + \psi_l)}{L} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W_l^0 + \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \psi_l = \langle W^0 \rangle + \langle \psi \rangle, \quad (3.3)$$

em que  $\langle \psi \rangle$ , representa a média de canais ópticos extra na rede, por ligação, para se garantir restauro.

Vamos definir o coeficiente de restauro de uma ligação,  $k_l$ , como a percentagem adicional de canais ópticos suficiente para garantir restauro no caso de falha de uma ligação, em relação à média de canais ópticos na rede não considerando capacidade de restauro,  $\langle W^0 \rangle$ , isto é,

$$k_l = \frac{\psi_l}{\langle W^0 \rangle}. \quad (3.4)$$

Considerando a expressão (3.4) podemos reescrever (3.3) como

$$\langle W^k \rangle = \langle W^0 \rangle + \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L k_l \langle W^0 \rangle = \langle W^0 \rangle + \langle W^0 \rangle \langle k \rangle = \langle W^0 \rangle (1 + \langle k \rangle), \quad (3.5)$$

em que

$$\langle k \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L k_l. \quad (3.6)$$

Notemos ainda que substituindo (3.4) em (3.6), obtemos

$$\langle k \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{\psi_l}{\langle W^0 \rangle} = \frac{1}{L \langle W^0 \rangle} \sum_{l=1}^L \psi_l = \frac{\langle \psi \rangle}{\langle W^0 \rangle} = \frac{\psi}{W^0}. \quad (3.7)$$

Para uma ligação entre os nós  $i$  e  $j$ , temos

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^0 + \psi_{i,j}, \quad (3.8)$$

ou ainda

$$W_{ij}^k = W_{ij}^0 + \langle W^0 \rangle k_{ij}. \quad (3.9)$$

Para o caso de restauro a capacidade extra na rede é partilhada e o seu uso depende da ligação onde a falha ocorre e do esquema de restauro. Como assumimos o esquema de restauro pelo menor caminho, no caso de falha de uma ligação todos os canais dos pedidos afectados são retirados do caminho original e reencaminhados. Os canais ópticos retirados e que não fazem parte da ligação afectada podem ser novamente usados no processo de restauro de forma a otimizar a utilização recursos.

Vamos definir o coeficiente de partilha da ligação  $l$ ,  $\phi_l$ , como

$$\phi_l = 1 + \frac{1}{W_l^k} \sum_{f=1, f \neq l}^L W_{l,f}^*, \quad (3.10)$$

onde  $W_{l,f}^*$  representa o número de pedidos distintos que podem atravessar a ligação  $l$  no caso de falha na ligação  $f$ . Definimos a variável partilha de recursos,  $\langle \phi \rangle$ , como o valor médio de  $\phi_l$  sobre todas as ligações,

$$\langle \phi \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \phi_l. \quad (3.11)$$

Um exemplo de cálculo detalhado de  $\langle \phi \rangle$  é apresentado na secção 3.1.2.2. Notemos que uma rede com  $N$  nós e  $L$  ligações pode ser apresentada com diferentes topologias. Cada topologia apresentará diferentes valores para a média do número de saltos,  $\langle h \rangle$ , variância do grau do nó,  $\sigma^2(\delta)$ , e partilha de recursos,  $\langle \phi \rangle$ . Todos estes parâmetros afectam a capacidade extra mínima de canais ópticos na rede para garantir sobrevivência.

### 3.1.1 Aproximação obtida por Korotky [2]

Para o caso de uma rede em anel temos que a média do grau dos nós é igual a 2 e a capacidade extra é aproximadamente igual à capacidade activa, isto é  $\langle k \rangle \approx 1$ .

Podemos então dizer que para um anel temos,

$$\langle k \rangle \approx \frac{1}{\langle \delta \rangle - 1}. \quad (3.11)$$

Para um caso mais genérico, onde a média do grau é maior que 2, podemos generalizar (3.12) da seguinte forma

$$\langle k \rangle = \frac{a - b}{\langle \delta \rangle - b}. \quad (3.13)$$

Os parâmetros  $a$  e  $b$  podem ser determinados usando um tratamento estatístico. No artigo [1] é apresentada uma aproximação para o coeficiente de restauro, considerando falha numa ligação, obtida através de um estudo estatístico, considerando oito redes em que o número de nós está compreendido entre 4 e 100, e a média do grau do nó é maior ou igual a 2.5 e menor ou igual a 4.5. Em [1] após a análise de 8 redes planares concluiu-se que  $a \approx 2$  e  $b \approx -0.4$ . Substituindo estes resultados em (3.13) obtemos

$$\langle k \rangle \approx \frac{2.4}{\langle \delta \rangle - 0.4} \approx \frac{2}{\langle \delta \rangle} \approx \frac{N}{L}. \quad (3.14)$$

### 3.1.2 Aproximação estatística considerando mais de 20 mil topologias de rede

Procurámos analisar este problema de forma análoga ao efectuado por Korotky em [1] mas considerando 20 mil topologias de rede aleatoriamente geradas em vez das 8 redes particulares consideradas em [1].

Gerámos aleatoriamente as topologias de rede satisfazendo as seguintes restrições:

1. Número de nós compreendido entre 5 e 100;
2. Grau médio compreendido entre 2.5 e 4.5;
3. Qualquer par de nós tem pelo menos dois caminhos disjuntos com nós distintos;

### 3.1.2.1 Algoritmo

O primeiro passo para atacar este problema foi desenvolver um algoritmo capaz de gerar redes aleatoriamente considerando as restrições atrás enumeradas. Para além de gerar as redes o algoritmo deve ainda ser capaz de fazer o encaminhamento, simular a falha individual de todas as ligações e calcular a capacidade extra de forma a possibilitar o restauro.

O fluxograma do algoritmo é apresentado na figura 3.1.

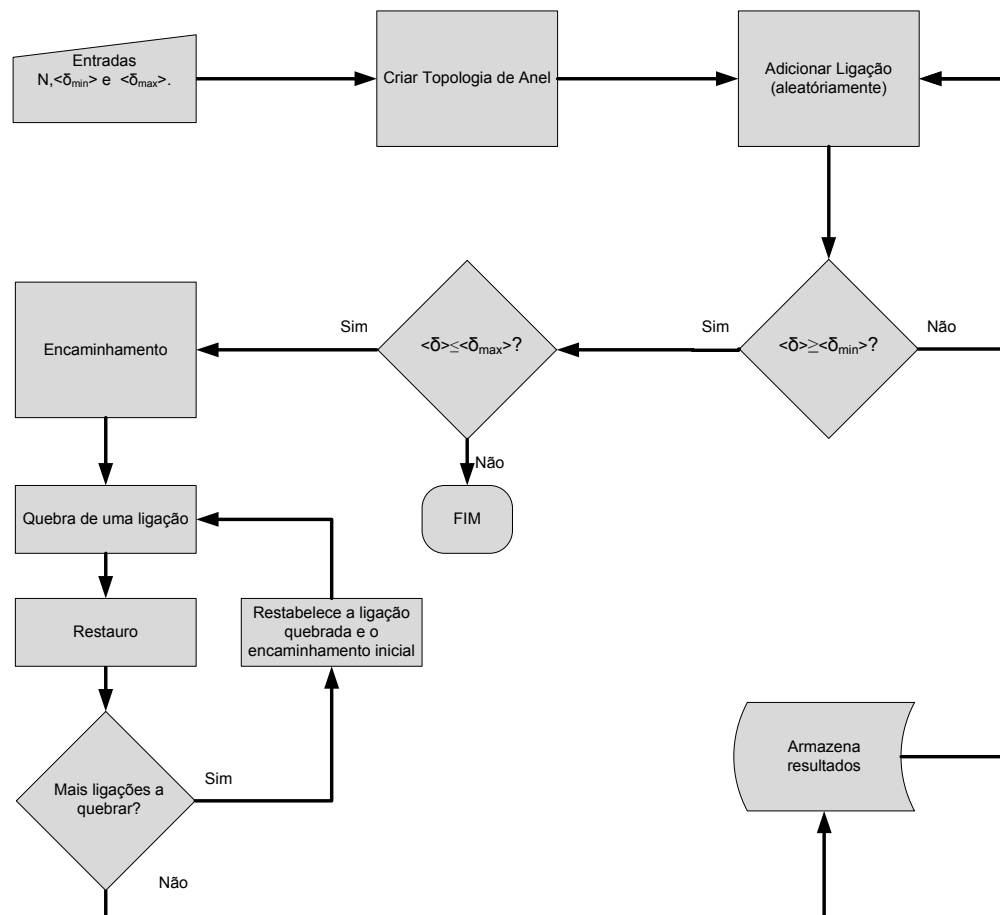


Fig. 3.1 Fluxograma do algoritmo para determinar o coeficiente de restauro

O algoritmo necessita como parâmetros de entrada do número de nós,  $N$ , do grau médio mínimo da rede,  $\langle \delta \rangle_{min}$ , e do máximo,  $\langle \delta \rangle_{max}$ . No caso considerado  $N$  vai variar entre 5 e 100,  $\langle \delta \rangle_{min}=2.5$  e  $\langle \delta \rangle_{max}=4.5$ , garantindo-se assim as condições 1) e 2), respectivamente. Inicialmente são interligados todos os  $N$  nós formando um anel, ver figura 3.2-a), garantindo-se assim a condição 3), de seguida é adicionada uma ligação entre dois nós quaisquer não ligados directamente, a escolha do par de nós é realizada aleatoriamente, sempre que se adicionada uma nova ligação é validado o grau médio da rede de forma a garantir que este está no intervalo

definido inicialmente. Este procedimento é repetido até que se verifique que o grau médio é maior ou igual que  $\langle \delta \rangle_{\min}$ . No passo seguinte todos os pedidos são encaminhados na rede utilizando o encaminhado pelo caminho mais curto, ver figuras 2.11 e 3.2-b), neste passo é usado o algoritmo Dijkstra [1]. O número de canais ópticos em cada ligação é armazenado na matriz de encaminhamento,  $[o]$ , os elementos da matriz,  $o_{ij}$ , diferentes de zero correspondem a canais ópticos activos. O número de canais ópticos bidireccionais activos na rede pode ser calculado como

$$W^0 = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N o_{i,j}. \quad (3.15)$$

Para podermos determinar a capacidade extra necessária para possibilitar o restauro são quebradas todas as ligações, uma a uma, ver figura 3.2-c) a j). Ao quebrar cada ligação é criada uma nova matriz de encaminhamento,  $[o^f]$ , sendo  $f$  o identificador da ligação onde ocorre a falha, para criar esta nova matriz são identificados os pedidos afectados, os canais ópticos associados a estes pedidos são libertados e estes pedidos são novamente encaminhados. É por isso usada a técnica de restauro SPR – *Shortest Path Restoration* [2]. Tendo as  $L$  matrizes construídas criamos uma nova matriz que identifica a capacidade extra para possibilitar o restauro sempre que exista uma falha única de uma ligação,  $[o^s]$ , os elementos desta matriz,  $o^s_{i,j}$ , correspondem ao valor máximo dos respectivos elementos de todas as matrizes  $[o^f]$ , ou seja

$$o^s_{i,j} = \max_f \{o^f_{i,j}\} \text{ com } i, j = \{1, \dots, N\} \text{ e } f = \{(i, j) : g_{i,j} = 1\}. \quad (3.16)$$

O número de pedidos bidireccionais na rede considerando capacidade necessária para sobrevivência,  $W^k$ , pode ser apresentado matematicamente como

$$W^k = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N o^s_{i,j}. \quad (3.17)$$

Considerando as expressões (3.15) e (3.17) podemos determinar a capacidade extra necessária para possibilitar o restauro,  $\psi$ , isto é

$$\psi = W^k - W^0 = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N o^s_{i,j} - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N o_{i,j}. \quad (3.18)$$

Considerando (3.7) e usando (3.15) e (3.18) podemos determinar o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ ,

$$\langle k \rangle = \frac{\psi}{W^0}. \quad (3.19)$$

Finalmente o valor de  $\langle k \rangle$  calculado em (3.17) é armazenado e é adicionada uma nova ligação, isto é, é criada uma nova topologia e o ciclo repete-se. A condição de paragem ocorre quando o grau médio for maior que  $\langle \bar{d} \rangle_{max}$ .

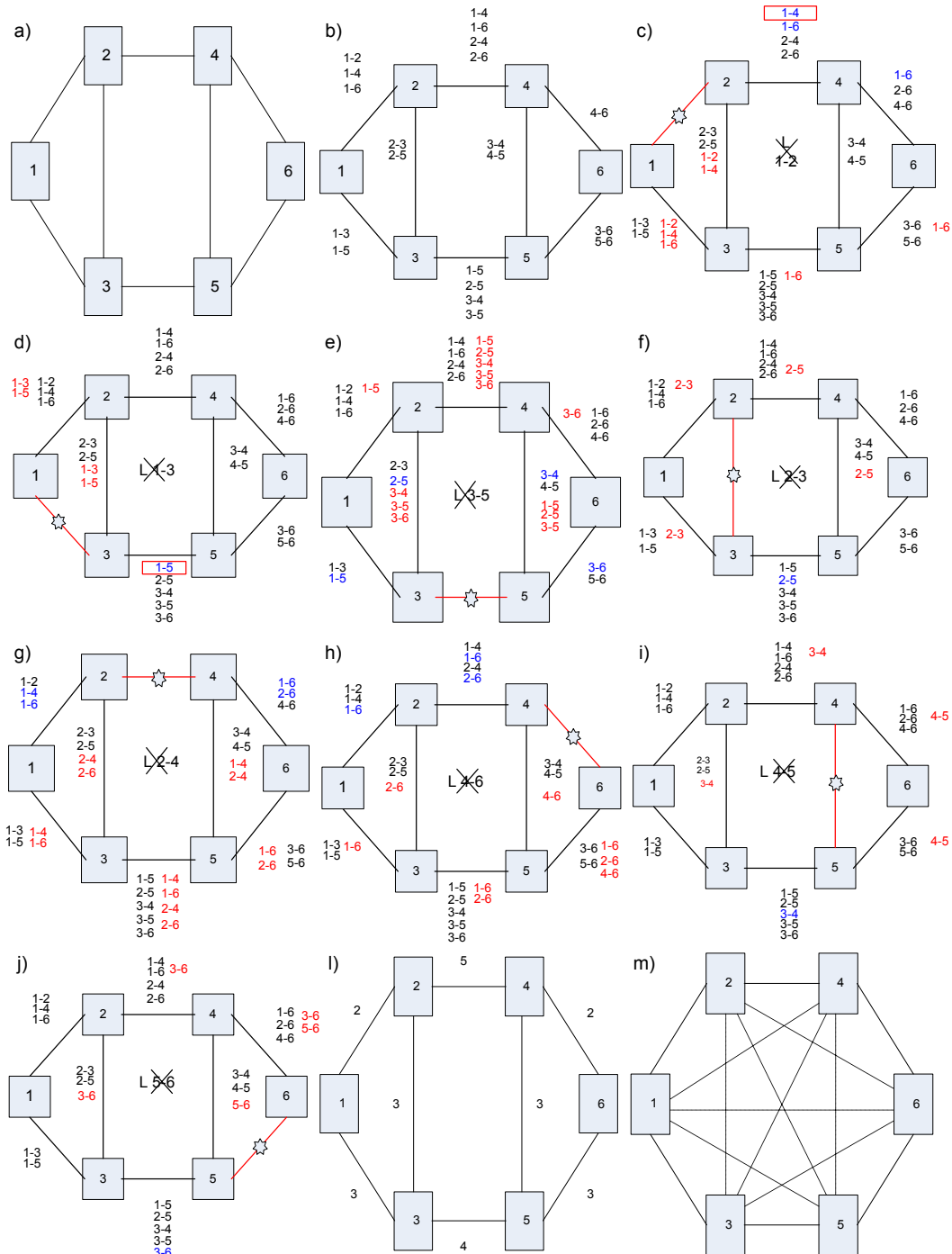


Fig. 3.2 Ilustração do algoritmo para determinar o coeficiente de restauro

### 3.1.2.2 Exemplo

Vamos considerar a nossa rede exemplo, que recordamos tem a seguinte topologia, [g], e suporta a matriz de tráfego, [d],

$$g = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Os passos relativos à aplicação do algoritmo à nossa rede exemplo estão ilustrados na figura 3.2.

Aplicando o algoritmo para determinar a capacidade de restauro à nossa rede exemplo podemos verificar que a matriz de encaminhamento [o] é dada por, ver figura 3.2-b),

$$[o] = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 5 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 \end{bmatrix}.$$

O número de canais ópticos activos na rede,  $W^0$ , dado por (3.15) e é igual a 23.

Simulando a quebra individual de cada ligação e realizando um novo encaminhamento obtemos as L matrizes  $[o^f]$ ,



$$[o^{1,2}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 5 & 4 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 6 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 \end{bmatrix} \quad [o^{1,3}] = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 4 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 6 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[o^{4,5}] = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 3 & 5 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 3 & 0 \end{bmatrix} \quad [o^{2,3}] = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 5 & 3 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[o^{4,6}] = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 3 & 4 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 0 & 0 & 7 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 3 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \end{bmatrix} \quad [o^{2,4}] = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 0 & 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 3 \\ 0 & 0 & 9 & 4 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[o^{3,5}] = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 5 & 9 & 0 & 0 \\ 2 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 & 0 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 2 & 0 \end{bmatrix} \quad [o^{5,6}] = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 3 & 5 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 3 & 5 \\ 0 & 0 & 5 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

conhecendo-se as  $L$  matrizes anteriores a matriz que identifica a capacidade necessária para possibilitar restauro sempre que exista uma falha única de uma ligação,  $[o^s]$ , pode também ser calculada, isto é

$$[o^s] = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 5 & 9 & 0 & 0 \\ 5 & 5 & 0 & 0 & 9 & 0 \\ 0 & 9 & 0 & 0 & 5 & 5 \\ 0 & 0 & 9 & 5 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 5 & 0 \end{bmatrix}$$

O número de canais ópticos na rede considerando capacidade necessária para sobrevivência,  $W^k$ , é dado através de (3.17) e é igual a 48. A capacidade extra mínima necessária para a rede ser sobrevivente,  $\psi$ , dada por (3.18), é

$$\psi = W^k - W^0 = 48 - 23 = 25 .$$

Podemos verificar que são necessários mais 25 canais ópticos na rede para garantir possibilidade de restauro no caso de falha numa ligação.

O coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ , obtido através de (3.19) é igual a 1.087, ou seja,

$$\langle k \rangle = \frac{\psi}{W} = \frac{25}{23} = 1.087 .$$

Notemos ainda que usando a aproximação proposta por Korotky [2], expressão (3.14) obtemos  $\langle k \rangle = 0.750$ .

Notemos que para calcular a partilha de recursos,  $\langle \Phi \rangle$ , necessitamos de calcular inicialmente o coeficiente de partilha de ligação  $\Phi_i$  para todas as ligações. Na primeira linha da tabela 3.1 podemos observar os pedidos que usam a ligação (1-2) após o encaminhamento inicial. Se ocorrer uma falha na ligação (1-2) todos os pedidos são encaminhados usando outras ligações, esta situação é representada na segunda linha da tabela 3.1. Cada linha da tabela 3.1 representa a falha de uma ligação e os consequentes pedidos que atravessam a ligação (1-2) considerando a respectiva falha.

| Falha na ligação | Pedidos que atravessam a ligação (1-2)    |
|------------------|---|
|                  | <u>1-2</u> , <u>1-4</u> , <u>1-6</u>      |
| (1-2)            |   |
| (2-4)            | 1-2, 1-4                                  |
| (1-3)            | 1-2, 1-4, 1-6, <u>1-3</u> , <u>1-5</u>    |
| (3-5)            | 1-2, 1-4, 1-6, 1-5                        |
| (2-3)            | 1-2, 1-4, 1-6, <u>2-3</u>                 |
| (4-5)            | 1-2, 1-4, 1-6                             |
| (4-6)            | 1-2, 1-4, 1-6                             |
| (5-6)            | 1-2, 1-4, 1-6                             |
| Total            | 6 Pedidos distintos (pedidos sublinhados) |

Tabela 3.1 Pedidos que podem atravessar a ligação (1-2)

Os seis pedidos distintos na ligação (1-2) estão sublinhados, isto é  $W_1^* = 6$ , observamos anteriormente que a ligação (1-2) tem cinco canais ópticos disponíveis, isto é  $W_1^k = 5$ . Usando a expressão (3.10) temos  $\Phi_1 = 1.2$  que significa que os cinco canais ópticos disponíveis na ligação (1-2) podem ser usados por seis pedidos. Calculando  $\Phi_i$  para todas as ligações e usando (3.11) podemos determinar a partilha de recursos,  $\langle \Phi \rangle$ . Na tabela 3.2 apresentamos os resultados obtidos para a rede exemplo.

| Ligação  | $W_1^*$ | $W_1^k$ | $\Phi_i$ |
|--|---------|---------|----------|
| (1-2)  | 6       | 5       | 1.2      |
| (1-3)  | 6       | 5       | 1.2      |
| (2-3)  | 11      | 5       | 2.2      |
| (2-4)  | 9       | 9       | 1        |
| (3-5)  | 9       | 9       | 1        |
| (4-6)  | 6       | 5       | 1.2      |
| (4-5)  | 9       | 5       | 1.8      |
| (5-6)  | 6       | 5       | 1.2      |
| Partilha de recursos, $\langle \Phi \rangle$ . |         |         | 1.35     |

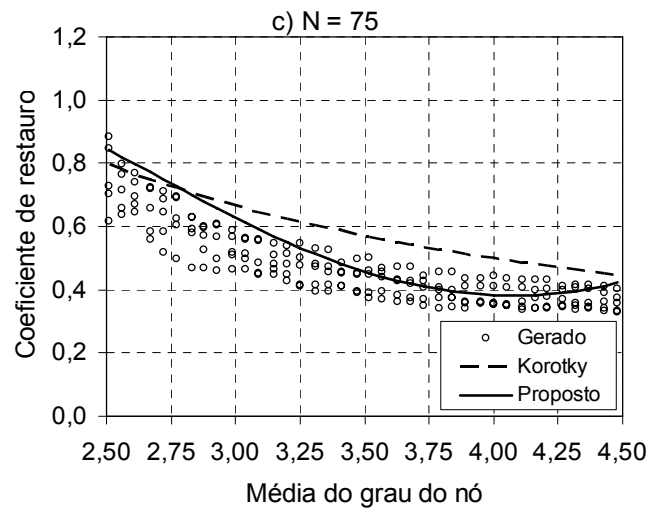
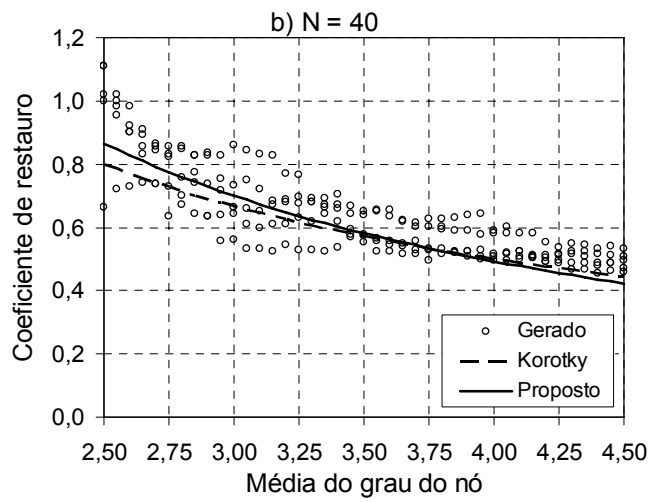
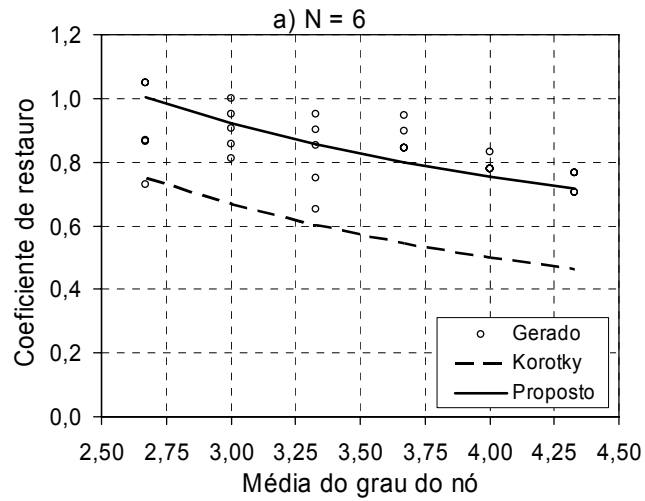
Tabela 3.2 Partilha de recursos,  $\langle \Phi \rangle$ .

### 3.1.2.3 Resultados

Como verificámos na secção anterior utilizando a aproximação (3.14) nem sempre se obtém bons resultados.

Corremos, por isso, o programa cinco vezes por cada N, com N compreendido entre 5 e 100 e com incremento de 5. Isto levou a que fossem gerados e analisados mais de que 20 mil topologias de rede distintas.

Na figura 3.3, que representa o coeficiente de restauro em função do valor médio do grau do nó, podemos observar os resultados obtidos para quatro valores de N (6, 40, 75 e 100). Cada círculo representa uma topologia de rede considerada, nesta figura é também apresentada a aproximação obtida por Korotky, expressão (3.14), linha descontinua e o resultado obtido através da aproximação proposta, linha continua. Podemos constatar que a expressão (3.14) nem sempre descreve os resultados com elevado rigor.



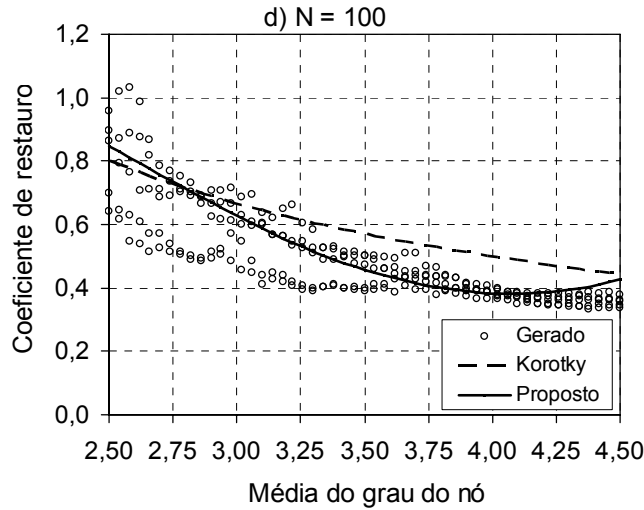


Fig. 3.3 Comportamento das aproximações (3.12) e (3.20) considerando 20 000 redes a)N=6; b)N=40; c)N=75; d)N=100

### 3.1.2.4 Discussão de resultados

Na figura 3.3 podemos verificar que para topologias com o mesmo N e L, isto é, com o mesmo valor médio do grau do nó, necessitamos de diferentes capacidades extra para garantir restauro em caso de falha de uma ligação, verificamos também que para  $\langle \delta \rangle$  menores existe uma maior variação do coeficiente de restauro. Para observar estes resultados com mais detalhe vamos considerar 3 topologias apresentadas na figura 3.7. Notemos que estas redes apresentam N e L iguais e consequentemente  $\langle \delta \rangle$  também igual.

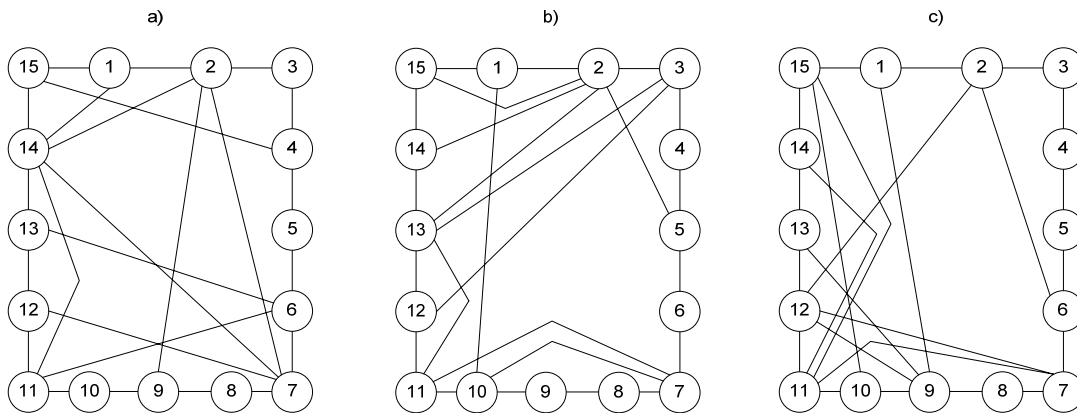


Fig. 3.4 Três topologias diferentes com N= 15 e com  $\langle \delta \rangle \sim 3.33$ .

Utilizando o algoritmo anteriormente apresentado para calcular o coeficiente de restauro obtemos os resultados apresentados na tabela 3.3. Notemos que cada rede apresenta um valor diferente para coeficiente de restauro, ver tabela 3.3 coluna 4.

| Topologia | $W^0$ | $\psi$ | $\langle k \rangle$ | $\langle h \rangle$ | $\langle \Phi \rangle$ | $\sigma^2(\delta)$ |
|-----------|-------|--------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| a)        | 225   | 182    | 0.809               | 2.14                | 1.58                   | 1.42               |
| b)        | 238   | 184    | 0.773               | 2.27                | 1.63                   | 1.16               |
| c)        | 240   | 210    | 0.875               | 2.18                | 1.52                   | 1.16               |

Tabela. 3.3 Variáveis das topologias apresentadas na figura 3.4 .

Verificamos, ver figura 3.3, que a variação do coeficiente de restauro é maior quando  $\langle \delta \rangle$  é menor, este comportamento deve-se ao facto de em topologias com menos ligações a realocação de uma ligação afecta substancialmente a média do número de saltos,  $\langle h \rangle$ . Depois de simular dois milhões de redes e analisar o comportamento de  $\langle h \rangle$  observamos que a variação do valor de  $\langle h \rangle$  tende a ser maior em topologias de rede com menores  $\langle \delta \rangle$ . Redes com valores baixos de  $\langle h \rangle$  têm caminhos mais curtos entre nós, assim é necessário menos canais ópticos activos para suportar o tráfego,  $W^0$ , e menos capacidade extra,  $\psi$ , para possibilitar restauro em caso de falha. Um exemplo deste comportamento pode ser verificado na tabela 3.1, podemos ver que a rede a) têm um valor de  $\langle h \rangle$  menor e um menor valor de  $W^0$  e  $\Psi$ . Como o coeficiente de restauro é uma fracção de  $W^0$ , a rede com menor  $\langle k \rangle$  não representa necessariamente a melhor utilização de recursos. Notemos que embora a rede b) apresente um valor menor para coeficiente de restauro, apresenta um valor maior para  $W^0$  e  $\Psi$  que a). A rede com melhor relação entre o custo e eficiência é a que apresenta um menor  $W^k$ . Se considerarmos a redes apresentadas na tabela 3.1 verificamos que a rede com melhor relação entre o custo e a eficiência é a rede a), ( $W^k = W^0 + \Psi$ ).

A influência da variância do grau do nó,  $\sigma^2(\delta)$ , no coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ , também foi avaliada, concluímos que este valor não produz consideráveis alterações nas variáveis estudadas. Como exemplo, ver tabela 3.1, as redes b) e c) apresentam o valor menor e maior para o coeficiente de restauro, respectivamente, embora apresentem o mesmo valor de variância do grau do nó.

Observamos ainda que para um determinado valor médio do grau do nó,  $\langle \delta \rangle$ , topologias com mais nós requerem um valor de coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ , menor. Se considerarmos a figura 3.3 b) e 3.3 d) constatamos que para  $\langle \delta \rangle = 4$  a topologia com  $N=40$  necessita de  $\langle k \rangle \approx 0.55$  enquanto a topologia com  $N=100$  necessita de  $\langle k \rangle \approx 0.4$ . Isto acontece porque a partilha de recursos,  $\langle \Phi \rangle$ , melhora à medida que  $N$  cresce.

Na figura 3.5 podemos observar a variação do coeficiente de restauro e da partilha de recursos com o crescimento de  $N$  para redes com grau médio aproximadamente igual a 3.5. Notemos a diminuição do coeficiente de restauro, linha contínua, e o crescimento da partilha de recursos,

linha descontinua, a mediada que o número de nós cresce. Para redes grandes,  $N > 60$ , o número de nós tende a ter menos impacto nas ambas as variáveis, coeficiente de restauro e partilha de recursos.

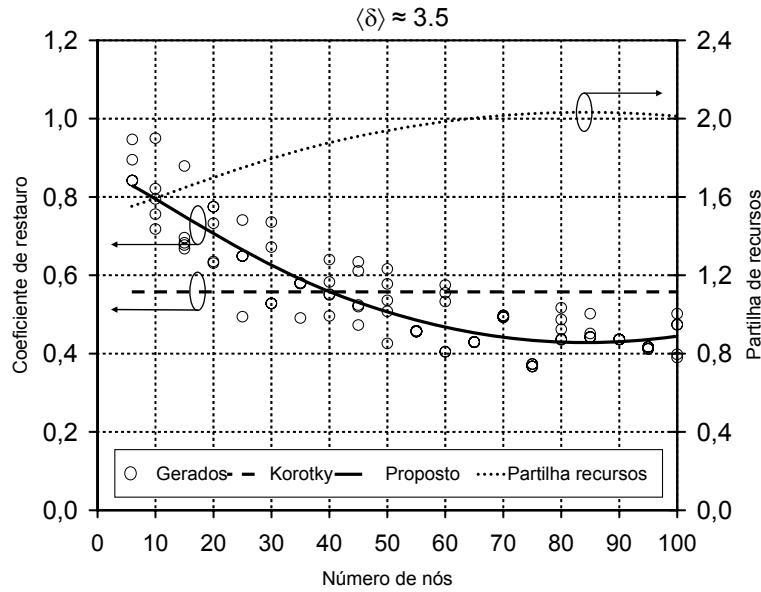


Fig. 3.5 Partilha de recursos vs. coeficiente de restauro em função de N e com  $\langle \delta \rangle \approx 3.5$ .

A aproximação obtida por Korotky, expressão (3.12), depende unicamente do grau do nó, podemos observar na figura 3.6 que esta aproximação apresenta sempre o mesmo comportamento. Como exemplo, para qualquer topologia com  $\langle \delta \rangle \approx 3.5$  o coeficiente de restauro é  $\langle k \rangle = 0.57$  considerando a aproximação (3.12). Na figura 3.6 é visível que o coeficiente de restauro é fortemente dependente do número de nós, assim um modelo mais apropriado é necessário.

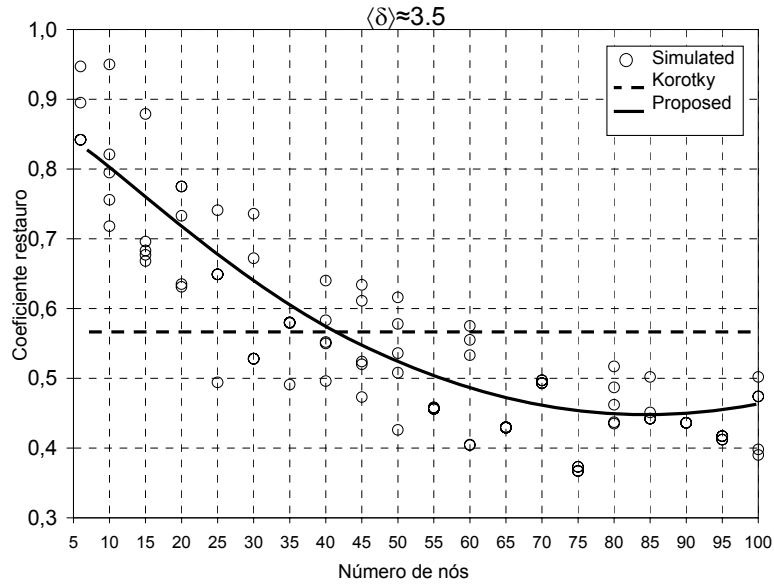


Fig. 3.6 Coeficiente de restauro em função de N e com  $\langle \delta \rangle \approx 3.5$ .

Para obter um novo modelo usamos o método dos mínimos quadrados para realizar regressões lineares e não lineares através dos resultados simulados. O critério usado par obter a expressão final foi o coeficiente de determinação,  $R^2$  [2]. Devido a problemas de escala, redes pequenas e redes muito grandes, é difícil obter uma solução adequada através de uma expressão única aplicável a todas as redes. Assim o melhor resultado foi obtido através de uma expressão com dois ramos, um considerando  $N < 60$  e outro considerando  $N \geq 60$ .

$$\langle k \rangle \approx \begin{cases} 0.35 - 0.016N - 0.0001N^2 + \frac{1.85 + 0.024N - 0.0002N^2}{\langle \delta \rangle} & N < 60 \\ 6 - 2.4\langle \delta \rangle + 0.28\langle \delta \rangle^2 - e^{-1.7 + \frac{4}{\langle \delta \rangle}} & N \geq 60 \end{cases} \quad (3.20)$$

O primeiro ramo da expressão consiste numa expressão quadrática que depende do número de nós N com uma dependência inversa da média do grau do nó,  $\langle \delta \rangle$  e é utilizada para  $N < 60$ . A expressão do segundo ramo é apenas em função de  $\langle \delta \rangle$  e contem uma função quadrática e uma função exponencial. Notemos que para  $N \geq 60$  a influência do número de nós pode ser negligenciável. Na Figura 3.3 podemos observar os resultados obtidos para quatro valores de N.

De forma a avaliar a expressão apresentada calculámos o valor do erro quadrado médio entre as duas aproximações apresentadas, (3.14) e (3.20), e os valores gerados,



$$\langle \varepsilon \rangle = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T_{op}} (\langle k \rangle_{t,N}^{ger} - \langle k \rangle_{t,N})^2}, \quad (3.21)$$

onde  $T_{op}$  é o número total de topologias geradas com  $N$  nós,  $\langle k \rangle_{t,N}^{ger}$  representa o coeficiente de restauro obtido na simulação para a topologia,  $t$ , com  $N$  nós e  $\langle k \rangle_{t,N}$  é o coeficiente de restauro obtido através das aproximações.

Na figura 3.8 podemos observar os resultados obtidos. Notemos que a aproximação (3.20) se ajusta melhor às redes consideradas.

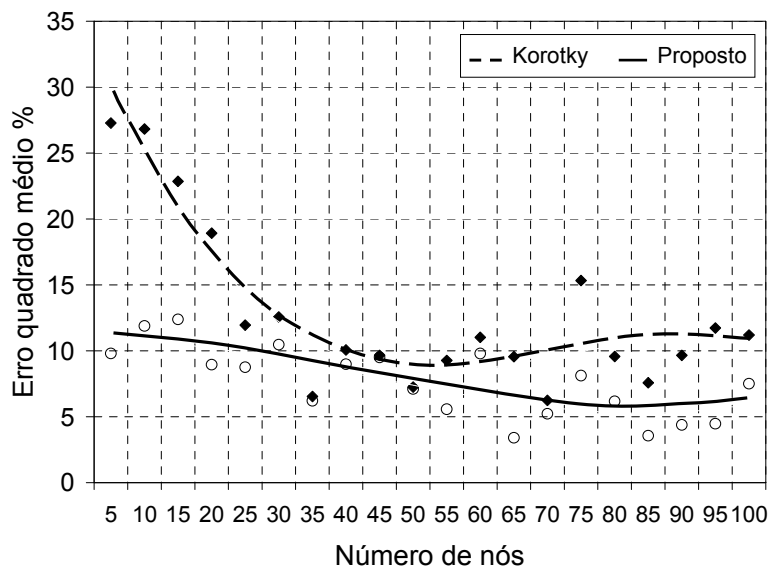


Fig. 3.8 Erro quadrado médio considerando as aproximações (3.14) e (3.20)

O tráfego numa ligação,  $\beta$ , é definido como o produto do número de pedidos numa ligação,  $W$ , e a taxa de informação por pedido,  $\tau$ ,

$$\langle \beta \rangle \equiv \langle W \rangle \tau = \tau \langle h \rangle \frac{D}{L} = \langle h \rangle \frac{T}{L}. \quad (3.22)$$

Considerando a rede exemplo

$$\langle \beta \rangle \equiv \langle W \rangle \tau = 2.875 \times 2333.33 = 6708.32 \text{ Mbps.}$$

## 3.2 Número de portos

### 3.2.1 Portos entrada

O número médio de portos num nó de uma rede óptica pode ser determinado somando o número de portos que os pedidos ocupam na rede e dividindo pelo número total de computadores.

Um pedido unidireccional entre o nó  $i$  e o nó  $j$  ocupa  $P_{i,j}$  portos de entrada, estes podem ser calculados somando o porto de entrada no primeiro nó, o porto de entrada no ultimo nó e o número de saltos entres nós menos um, ver figura 3.9 , isto é

$$P_{i,j} = 1 + 1 + (h_{i,j} - 1) = 1 + h_{i,j} . \quad (3.23)$$

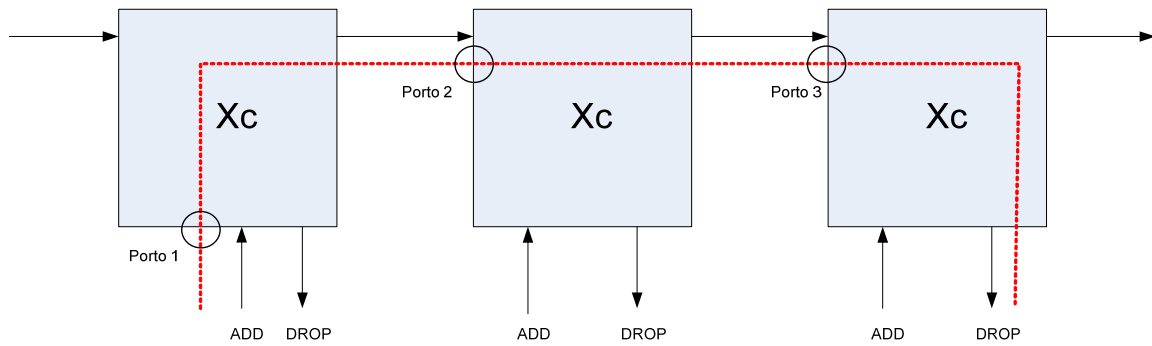


Fig. 3.9 Rede exemplo 3 portos de entrada

Considerando todos os pedidos podemos determinar o número total de portos unidireccionais de entrada,

$$P_1 = \sum_{d=1}^{D_1} (1 + f_d) = \sum_{d=1}^{D_1} 1 + \sum_{d=1}^{D_1} f_d .$$

sendo  $f_d$  o número de saltos que o pedido  $d$  tem que realizar.

Considerando a expressão (2.8), válida para qualquer modelo de tráfego, obtemos

$$P_1 = D_1 + \sum_{d=1}^{D_1} f_d = D_1 + \frac{D_1}{D_1} \sum_{d=1}^{D_1} f_d = D_1(1 + \langle h \rangle) = N \langle d \rangle (1 + \langle h \rangle) . \quad (3.24)$$

O número médio de portos de entrada é obtido dividindo o número total de portos de entrada pelo número de nós,  $N$ , ou seja

$$\langle P_1 \rangle = \frac{N \langle d \rangle [1 + \langle h \rangle]}{N} = \langle d \rangle [1 + \langle h \rangle] , \quad (3.25)$$

para o caso do modelo de pedidos uniforme temos  $\langle d \rangle = N-1$ , isto é

$$\langle P_1 \rangle = (N-1)[1 + \langle h \rangle]. \quad (3.26)$$

### 3.2.2 Portos bidireccionais

Considerando que os pedidos são bidireccionais, ou seja, o número de portos bidireccionais é o dobro do número de portos de entrada, temos

$$P_2 = 2 \sum_{d=1}^D (1 + f_d) = 2D + 2 \sum_{d=1}^D f_d.$$

temos

$$P_i = 2D + 2 \sum_{d=1}^D f_d = 2D + \frac{2D}{D} \sum_{d=1}^D f_d = 2D(1 + \langle h \rangle). \quad (3.27)$$

O número médio de portos entrada/saída pode ser obtido através

$$\langle P_2 \rangle = \frac{2D[1 + \langle h \rangle]}{N} = \langle d \rangle [1 + \langle h \rangle]. \quad (3.28)$$

Comparando (3.26) e (3.23) observamos que o número médio de portos de entrada é igual ao número médio de portos entrada/saída, isto é

$$\langle P \rangle \equiv \langle P_2 \rangle = \langle P_1 \rangle \quad (3.29)$$

Tendo em conta a nossa rede exemplo e efectuando o encaminhamento, podemos observar a necessidade de portos por nó, ver figura 3.10.

Podemos observar que nó 1 e o nó 6 necessitam de 10 portos e os restantes de 14, assim para determinar o valor médio de portos podemos somar todos os portos e dividir pelo número de nós, ou seja,

$$\langle P \rangle = \frac{1}{N} \sum_i^N P_i = \frac{76}{6} = 12.666,$$

ou utilizando as expressões (3.26) verifica-se que

$$\langle P \rangle = 5[1 + 1.533] = 12.666,$$

como seria de esperar.

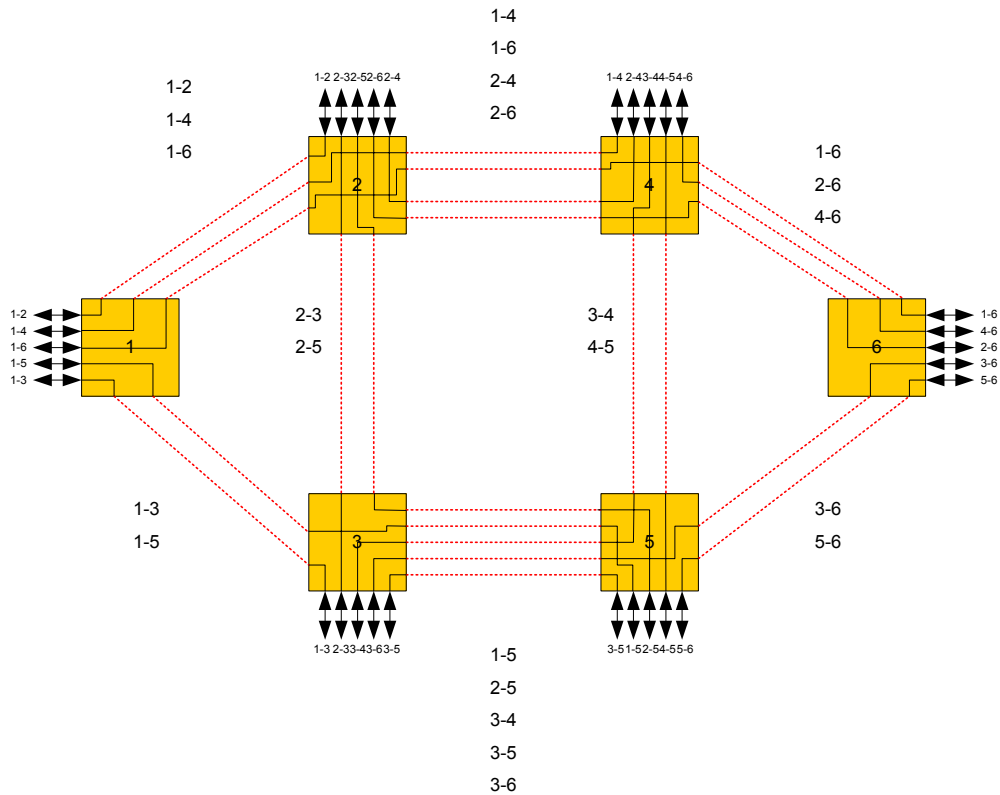


Fig. 3.10 Portos no computador

### 3.2.3 Portos de entrada, saída e passagem

O número de portos pode ser agrupado considerando três diferentes grupos, portos de entrada, “ADD”, portos de saída, “DROP”, e portos de passagem, “THROUGH”. Os portos de entrada são os portos que permitem adição de tráfego num nó, os portos de saída são os portos que permitem extrair tráfego num nó e os portos de passagem são portos de passagem de tráfego num nó. Podemos escrever

$$\langle P \rangle \equiv \langle P_{ADD} \rangle + \langle P_{DROP} \rangle + \langle P_{THRU} \rangle. \tag{3.30}$$

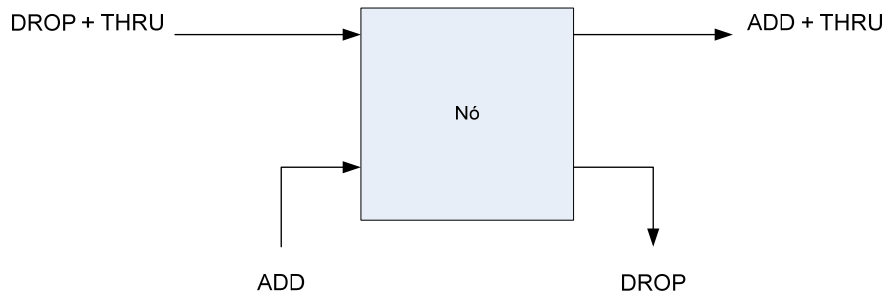


Fig. 3.11 Portos no nó.

O número médio de portos de entrada e saída é igual a  $\langle d \rangle$ , isto é

$$\langle P_{\text{ADD}} \rangle = \langle P_{\text{DROP}} \rangle = \langle d \rangle, \quad (3.31)$$

e considerando (3.26) e (3.27)

$$\langle P_{\text{THRU}} \rangle = \langle P \rangle - \langle P_{\text{ADD}} \rangle - \langle P_{\text{DROP}} \rangle = \langle d \rangle [1 + \langle h \rangle] - 2\langle d \rangle = \langle d \rangle (\langle h \rangle - 1). \quad (3.32)$$

Considerando a nossa rede exemplo, ver figura 3.10, podemos observar que o número médio de portos de entrada, “ADD”, é igual ao número médio de portos de saída, “DROP”, e igual a 5.

Tendo em atenção a expressão (3.29)

$$\langle P_{\text{ADD}} \rangle = \langle P_{\text{DROP}} \rangle = \langle d \rangle = N - 1 = 5.$$

O valor médio dos portos de passagem observando a rede exemplo é

$$\begin{aligned} \langle P_{\text{THRU}} \rangle &= \frac{1}{N} (P_{\text{THRU}1} + P_{\text{THRU}2} + P_{\text{THRU}3} + P_{\text{THRU}4} + P_{\text{THRU}5} + P_{\text{THRU}6}) \\ \langle P_{\text{THRU}} \rangle &= \frac{1}{6} (0 + 4 + 4 + 4 + 4 + 0) = 2.666, \end{aligned}$$

ou utilizando a expressão (3.30)

$$\langle P_{\text{THRU}} \rangle = \langle d \rangle (\langle h \rangle - 1) = 5 \times (1.533 - 1) = 2.666,$$

como seria de esperar.

### 3.2.4 Portos de tributário e de linha.

Uma forma alternativa de agrupar os portos é agrupa-los em portos de tributário e portos de linha, como

$$\langle P \rangle = \langle P_{\text{TERM}} \rangle + \langle P_{\text{LINE}} \rangle. \quad (3.33)$$

Por definição temos

$$\langle P_{\text{TERM}} \rangle = \langle P_{\text{ADD}} \rangle = \langle P_{\text{DROP}} \rangle = \langle d \rangle, \quad (3.34)$$

e

$$\langle P_{\text{LINE}} \rangle \equiv \langle P_{\text{ADD}} \rangle + \langle P_{\text{THRU}} \rangle = \langle P_{\text{DROP}} \rangle + \langle P_{\text{THRU}} \rangle = \langle d \rangle + \langle d \rangle (\langle h \rangle - 1) = \langle d \rangle \langle h \rangle. \quad (3.35)$$

Observando a nossa rede exemplo

$$\langle P_{\text{TERM}} \rangle \equiv \langle P_{\text{ADD}} \rangle = \langle P_{\text{DROP}} \rangle = 5,$$

e

$$\langle P_{\text{LINE}} \rangle \equiv \langle P_{\text{ADD}} \rangle + \langle P_{\text{THRU}} \rangle = \langle P_{\text{DROP}} \rangle + \langle P_{\text{THRU}} \rangle = 5 + 2.666 = 7.666,$$

ou utilizando a formula (3.33) obtemos

$$\langle P_{\text{LINE}} \rangle \equiv \langle d \rangle \langle h \rangle = 5 \times 1.533 = 7.666,$$

como seria de esperar.

### 3.2.5 Portos de linha e terminal considerando restauro

Quando introduzimos o conceito de capacidade extra para restauro necessitamos de portas extras, o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ , é adicionado aos portos de linha pois o número de pedidos originados nos nós continua o mesmo

$$\langle P_{\text{LINE}} \rangle = \langle d \rangle \langle h \rangle (1 + \langle k \rangle) = \langle d \rangle \langle h \rangle + \langle d \rangle \langle h \rangle \langle k \rangle. \quad (3.36)$$

Sendo o número total de portos igual à soma dos portos tributários com os portos de linha, temos

$$\langle P^K \rangle = \langle P_{\text{TERM}} \rangle + \langle P_{\text{LINE}} \rangle = \langle d \rangle + \langle d \rangle \langle h \rangle (1 + \langle k \rangle) = \langle d \rangle [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle], \quad (3.37)$$

usando a expressão (2.39) e (3.5) para valor médio de pedidos na rede podemos reformular a expressão (3.35), isto é,

$$\begin{aligned} \langle W^0 \rangle \langle \delta \rangle &= \langle d \rangle \langle h \rangle, \\ \langle W^k \rangle &= \langle W^0 \rangle (1 + \langle k \rangle), \\ \langle P^K \rangle &= \langle d \rangle + \langle W^0 \rangle (1 + \langle k \rangle) \langle \delta \rangle, \end{aligned} \quad (3.38)$$

ou

$$\begin{aligned} \langle P^K \rangle &= \langle d \rangle [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \\ \langle P^K \rangle &= (N - 1) [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]. \end{aligned}$$

Na figura 3.12, obtida considerando a nossa rede exemplo com capacidade de restauro e onde os canais a cheio indicam os canais reservados, podemos observar que o número de portos necessários em cada nó da nossa rede exemplo de forma a se garantir restauro no caso de uma única falha de ligação é

$$P_1 = 15, P_2 = 24, P_3 = 24, P_4 = 24, P_5 = 24, P_6 = 15,$$

sendo o valor médio dado por

$$\langle P^k \rangle = \frac{1}{N} \sum_i^N P_i = \frac{126}{6} = 21,$$

ou através da expressão (3.35)

$$\langle P^k \rangle = (5)[1 + (1 + 1,087)^{1,533}] = 21.$$

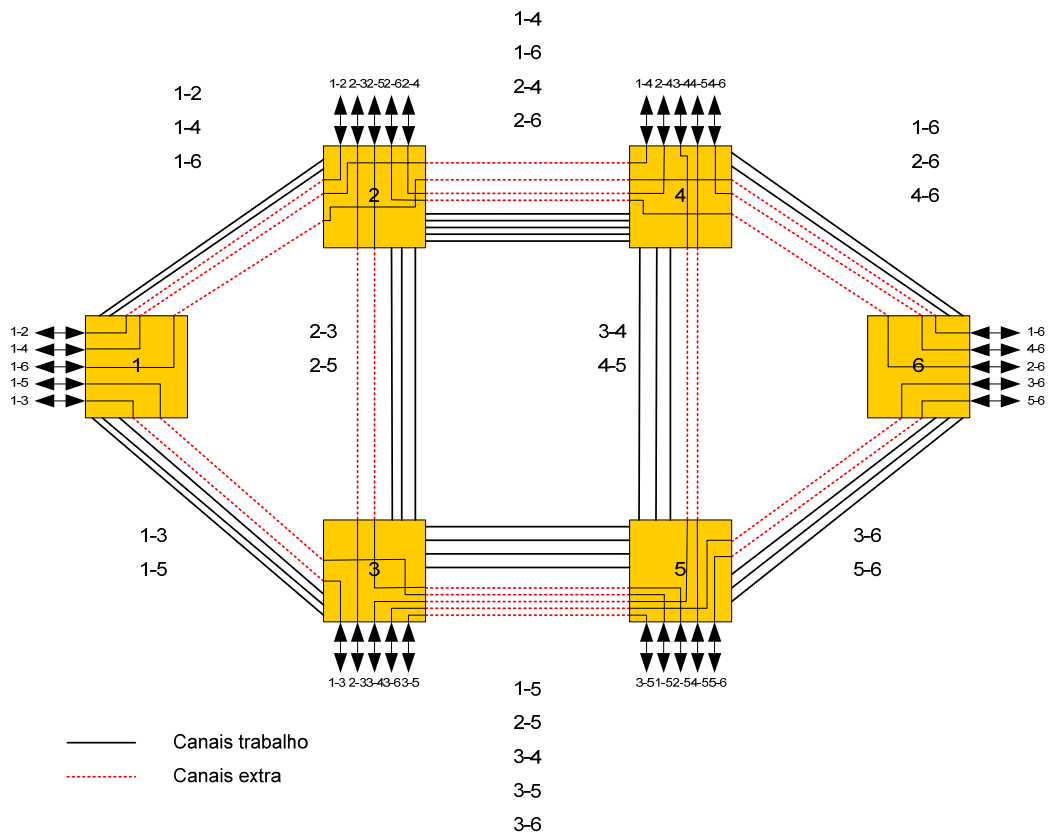


Fig. 3.12 Portos no computador considerando capacidade de restauro

### 3.2.6 Aproximação para $\langle P^k \rangle$

Uma questão interessante é saber como varia a média do número de portos,  $\langle P \rangle$ , em relação ao número de nós.

Considerando que o número de nós é muito grande,  $N \gg 1$ , um modelo de pedidos uniforme e a aproximação (2.28) para o  $\langle h \rangle$ , temos

$$\begin{aligned} \langle P^k \rangle &= (N-1) \left[ 1 + (1 + \langle k \rangle) \sqrt{\frac{N-2}{\langle \delta \rangle - 1}} \right] \\ &\approx N \left[ 1 + (1 + \langle k \rangle) \sqrt{\frac{N-2}{\langle \delta \rangle - 1}} \right] \\ &\approx N \left[ 1 + (1 + \langle k \rangle) \frac{N^{1/2}}{(\langle \delta \rangle - 1)^{1/2}} \right] \\ &= N + (1 + \langle k \rangle) \frac{N^{3/2}}{(\langle \delta \rangle - 1)^{1/2}} \\ &= N^{3/2} \left[ \frac{1}{N^{1/2}} + \frac{(1 + \langle k \rangle)}{(\langle \delta \rangle - 1)^{1/2}} \right] \end{aligned}$$

e considerando a aproximação (3.12) para  $\langle k \rangle$ , temos

$$\langle P^k \rangle \approx N^{3/2} \underbrace{\left[ \frac{\left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right)}{(\langle \delta \rangle - 1)^{1/2}} \right]}_{f(x)}. \quad (3.39)$$

Fazendo variar o grau médio dos nós podemos observar o comportamento da função  $f(x)$ , que corresponde à parte entre parêntesis rectos da expressão (3.38), ver figura 3.13,



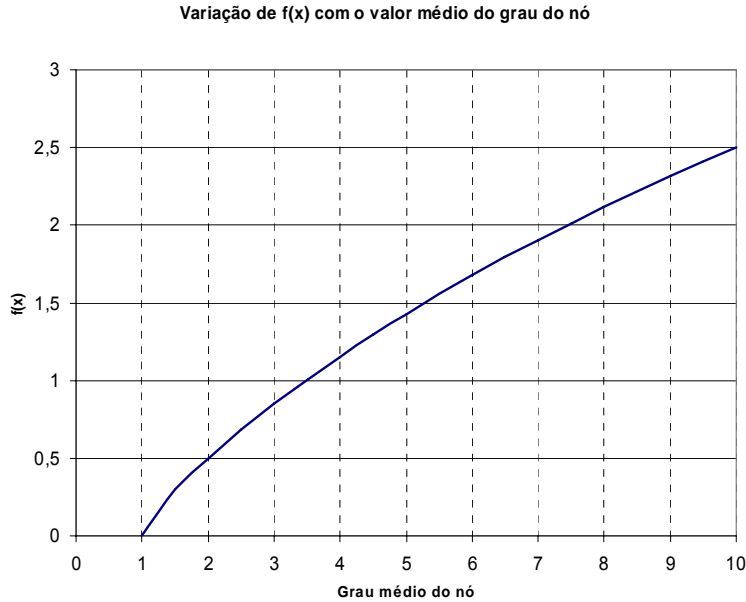


Fig. 3.13 Função  $f(x)$  (parte entre parêntesis rectos de (3.38) em relação à variação do grau do nó

Verifica-se que para valor médio do grau entre 3 e 4 temos

$$\left[ \frac{\left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right)}{(\langle \delta \rangle - 1)^{1/2}} \right] \approx 1, \quad (3.40)$$

assim

$$\langle P^k \rangle \approx N^{3/2}. \quad (3.41)$$

### 3.2.7 Nova aproximação para $\langle W^k \rangle$

Utilizando (3.5), (3.37) e a aproximação (3.40), podemos observar que o numero médio de pedidos considerando restauro é dado por,

$$\langle W^k \rangle = \frac{N^{3/2} - \langle d \rangle}{\langle \delta \rangle},$$

que para  $N \gg 1$  pode ser aproximada por

$$\langle W^k \rangle \approx \frac{N^{3/2}}{\langle \delta \rangle}. \quad (3.42)$$

### 3.3 Resumo

Neste capítulo especificámos conceitos fundamentais sobre o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte. Apresentámos expressões para cálculo das seguintes variáveis: número de canais ópticos na rede considerando restauro, número médio de canais ópticos na rede considerando restauro, coeficiente de restauro, coeficiente de partilha da ligação, partilha de recursos. Na tabela 3.3 é apresentado um resumo das relações consideradas.

| Variáveis  | Relação  | Expressão | Tipo   | Observações                    |
|--|--|-----------|--------|--------------------------------|
| Número de canais ópticos na rede considerando restauro       | $W^k = W^0 + \psi,$  | (3.1)     | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Número médio de canais ópticos na rede considerando restauro | $\langle W^k \rangle = \langle W^0 \rangle + \langle \psi \rangle$   | (3.3)     | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Coeficiente de restauro                                      | $\langle k \rangle = \frac{\psi_l}{W^0}$   | (3.4)     | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Coeficiente de partilha da ligação                           | $\phi_l = 1 + \frac{1}{W_l^k} \sum_{f=1, f \neq l}^L W_{l,f}^*$  | (3.10)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Partilha de recursos   | $\langle \phi \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \phi_l.$  | (3.11)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Coeficiente de restauro                                      | $\langle k \rangle \equiv \begin{cases} 0.35 - 0.01N - 0.0001f + \frac{1.85 - 0.02N - 0.0001f}{\langle \phi \rangle}, & N < 60 \\ 6 - 24\langle \phi \rangle + 0.24\langle \phi \rangle^2 - e^{-\frac{1.7 - \frac{4}{\langle \phi \rangle}}{\langle \phi \rangle}}, & N \geq 60 \end{cases}$ | (3.20)    | Aprox. |                                |
| Tráfego numa ligação   | $\langle \beta \rangle \equiv \langle W \rangle \tau.$   | (3.22)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Média portos entrada/saída                                   | $\langle P_2 \rangle = \langle d \rangle [1 + \langle h \rangle]$  | (3.28)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Média portos entrada e saída                                 | $\langle P_{ADD} \rangle = \langle P_{DROP} \rangle = \langle d \rangle$   | (3.31)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Média portos de passagem                                     | $\langle P_{THRU} \rangle = \langle d \rangle (\langle h \rangle - 1)$   | (3.32)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Média portos tributários                                     | $\langle P_{TERM} \rangle = \langle d \rangle$   | (3.34)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |
| Média portos de linha  | $\langle P_{LINE} \rangle = \langle d \rangle \langle h \rangle$   | (3.35)    | Exacta | Independente do modelo tráfego |

|   |   |        |             |                                |
|---|---|--------|-------------|--------------------------------|
| Média portos de linha considerando restauro | $\langle P_{LINE} \rangle = \langle d \rangle \langle h \rangle (1 + \langle k \rangle)$  | (3.36) | Exacta      | Independente do modelo tráfego |
| Média portos considerando restauro          | $\langle P^K \rangle = \langle d \rangle [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]$ | (3.37) | Exacta      | Independente do modelo tráfego |
| Média portos considerando restauro          | $\langle P^K \rangle \approx N^{3/2}$   | (3.41) | Aproximação |                                |

Tabela 3.4 Resumo das variáveis apresentadas no Capítulo III.

### 3.4 Referências

- [1] S. K. Korotky, "Network Global Expectation Model: A Statistical Formalism for Quickly Quantifying Network Needs and Costs," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.22, NO. 3, pp. 703-22, March 2004.
- [2] S.Ramamurthy, Biswanath Mukherjee, "Survivable WDM Mesh Networks, Part II - Restoration, in Proceedings IEEE ICC, 1999, Vancouver, British Columbia, Canada, June 1999, vol. 3, pp. 2023-30.

# Capítulo 4

## Custos da Rede

Neste capítulo é apresentado o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte considerando as variáveis anteriormente apresentadas. A título ilustrativo, é apresentado a aplicação prática à rede exemplo.

Na secção 4.1 é discutido o custo total de transmissão de uma rede de transporte. São apresentadas duas aproximações de onde resultam duas expressões para o cálculo destes custos.

Na secção 4.2 é discutido o custo total de gestão de largura de banda de uma rede de transporte. Consideramos duas formas de realizar a gestão de largura de banda, gestão exclusivamente eléctrica e gestão eléctrica e óptica. São apresentadas duas aproximações para ambas as arquitecturas dos nós.

Na secção 4.3 iremos comparar o factor custo das duas arquitecturas consideradas para os nós, isto é, utilizando um EXC ou utilizando um EXC e um OXC para realizar a gestão de largura de banda.

## 4.1 Custos de transmissão

Nesta secção vamos considerar duas aproximações para o calculo dos custos de transmissão de uma rede de transporte.

### 4.1.1 Primeira aproximação

Pode-se assumir que o custo de um sistema de transmissão óptico é proporcional à largura de banda e à distância, de acordo com Gawrys temos como valor aproximado 30\$ por gigabit por segundo por quilómetro, notemos que este valor está referenciado a 1999. Assumindo que 1\$ era igual a 1€ temos

$$\gamma_{B-s} \approx 30 \text{ € / Gbps / km .} \quad (4.1)$$

Sendo assim o custo de um sistema de transmissão é dependente da largura de banda e da extensão

$$C_i = \gamma_{B-s} \beta s_i , \quad (4.2)$$

sendo  $s_i$  o comprimento do sistema de transmissão  $i$ .

O custo médio por ligação, considerando a aproximação

$$\langle \beta s \rangle \approx \langle \beta \rangle \langle s \rangle ,$$

isto é, considerando que a largura de banda é independente da distância do sistema de transmissão, é dado por

$$\langle C_i \rangle = \gamma_{B-s} \langle \beta s \rangle \approx \gamma_{B-s} \langle \beta \rangle \langle s \rangle . \quad (4.3)$$

O valor médio do tráfego já foi apresentado anteriormente, ver expressão (3.39) e o valor médio do comprimento das ligações pode ser calculado sabendo a distância entre nós, isto é

$$\langle s \rangle \equiv \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L s_i . \quad (4.4)$$

Não se conhecendo o comprimento de todas as ligações podemos utilizar a aproximação [4]

$$\langle s \rangle \approx \frac{\sqrt{A}}{(\sqrt{N} - 1)}, \quad (4.5)$$

onde A representa a área geográfica coberta pela rede.

Por exemplo considerando as redes de referência apresentadas no anexo A temos

| Nome da rede         | Área [1],<br>km <sup>2</sup> | $\langle s \rangle$ , através de<br>(4.4), km | $\langle s \rangle$ , através de<br>(4.5), km | % Erro |
|----------------------|------------------------------|---|---|--------|
| Small Net            | 168803                       | 263.875                                       | 283.449                                       | 7.4    |
| ITÁLIA continental   | 244222                       | 269.000                                       | 200.555                                       | 25.4   |
| vBNS                 | 8000000                      | 955.982                                       | 1147.853                                      | 20.1   |
| NFSNET               | 8000000                      | 1299.429                                      | 1031.649                                      | 20.6   |
| ITALY                | 395402                       | 288.172                                       | 229.354                                       | 20.4   |
| EON                  | 3541131                      | 729.000                                       | 541.969                                       | 25.7   |
| PORTUGAL continental | 89092                        | 84.844  | 76.554  | 9.8    |
| PORTUGAL             | 673712                       | 203.472                                       | 200.243                                       | 1.6    |
| NewNet               | 8000000                      | 526.135                                       | 690.025                                       | 31.1   |
| USA GRD              | 8000000                      | 310.390                                       | 314.270                                       | 1.2    |

Tabela 4.1 Média do comprimento dos OLS considerando as redes referência.

Para efeitos de cálculo da área geográfica coberta pelas redes foram consideradas as áreas geográficas dos países cobertos.

Notemos que o valor do erro pode ser largamente diminuído se em vez da área do país se considerar a área efectiva da rede. Vejamos por exemplo o caso das redes NewNet e USA GRD. Para o caso da rede USA GRD a área efectiva da rede é muito próxima da área do país, no caso da rede NewNet a área efectiva da rede será aproximadamente 70% da área do país. Considerando a área efectiva da rede podemos observar que o erro diminuiu significativamente.

| Nome da rede | Área [1],<br>km <sup>2</sup> | <s>, através de<br>(4.4), km | <s>, através de<br>(4.5), km | % Erro |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------|
| NewNet       | 5600000                      | 526.135                      | 577.317                      | 9.7    |

Tabela. 4.2 Média do comprimento dos OLS considerando área efectiva.

O custo total para transmissão pode ser obtido multiplicando o valor médio do custo da ligação pelo número de ligações, ver expressão (2.7),

$$C_{\text{TRANS}} = L \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L c_i = L \langle c_i \rangle, \quad (4.6)$$

fazendo a substituição da variável <β> utilizando a expressão (3.22) e considerando capacidade para restauro, obtemos

$$C_{\text{TRANS}} = L \gamma_{B-s} \langle \beta \rangle \langle s \rangle = L \gamma_{B-s} \tau \langle W^0 \rangle (1 + \langle k \rangle) \langle s \rangle. \quad (4.7)$$

Considerando as expressões (2.13) e (2.39) e as aproximações para <k> e para <s> dadas por (3.12) e (4.5) respectivamente, temos

$$C_{\text{TRANS}} \approx L \gamma_{B-s} \frac{T}{D} \frac{\langle d \rangle \langle h \rangle}{\langle \delta \rangle} \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right) \frac{\sqrt{A}}{(\sqrt{N} - 1)}, \quad (4.8)$$

assim,

$$C_{\text{TRANS}} \approx \gamma_{B-s} T \sqrt{A} L \frac{2}{N(N-1)} \frac{(N-1) \langle h \rangle N}{2L} \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right) \frac{1}{(\sqrt{N} - 1)},$$

$$C_{\text{TRANS}} \approx \gamma_{B-s} T \sqrt{A} \frac{\langle h \rangle}{(\sqrt{N} - 1)} \left( 1 + \frac{N}{L} \right). \quad (4.9)$$

Utilizando a aproximação (2.27) para <h> e considerando  $N \gg 1$  temos

$$\begin{aligned}
 C_{\text{TRANS}} &= \gamma_{\text{B-s}} T \sqrt{A} \frac{1.12N \sqrt{\frac{1}{2L}}}{(\sqrt{N}-1)} \left(1 + \frac{N}{L}\right) \\
 &\approx \gamma_{\text{B-s}} T \sqrt{A} \frac{1.12\sqrt{N} \sqrt{\frac{N}{2L}}}{\sqrt{N}} \left(1 + \frac{N}{L}\right) \\
 &\approx \gamma_{\text{B-s}} T \sqrt{A} 1.12 \sqrt{\frac{1}{\langle \delta \rangle}} \left(1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle}\right)
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Considerando que o grau médio dos nós está compreendido entre 3 e 4 podemos fazer a seguinte aproximação

$$C_{\text{TRANS}} \approx \gamma_{\text{B-s}} T \sqrt{A}. \tag{4.11}$$

Notemos que esta aproximação resulta de

$$d(\langle \delta \rangle) = 1.12N \sqrt{\frac{1}{\langle \delta \rangle}} \left(1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle}\right) \approx 1 \tag{4.12}$$

Como podemos verificar na figura 4.1, onde é apresentado a variação da função  $d(\langle \delta \rangle)$ .

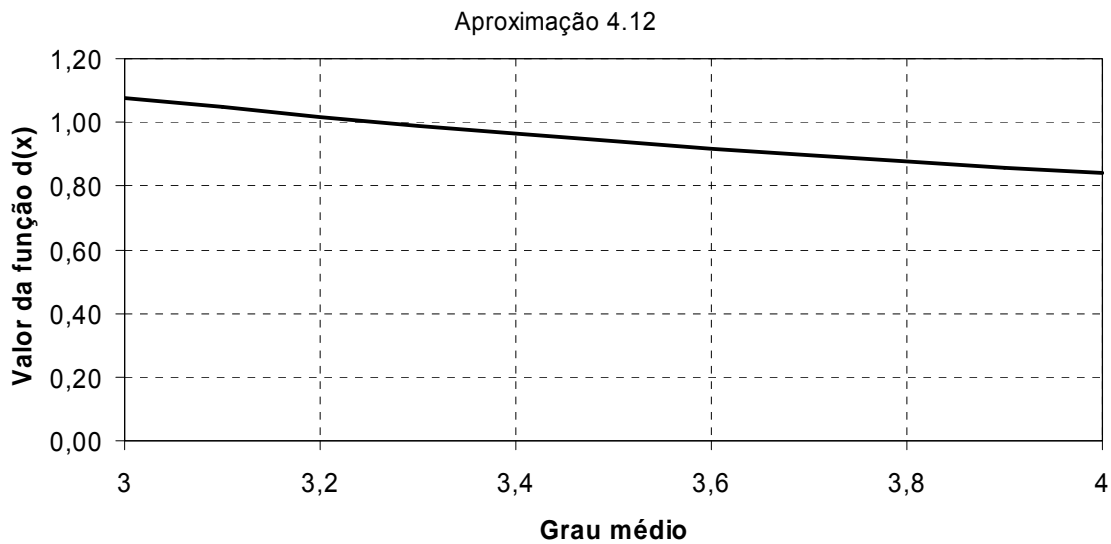


Fig. 4.1 Variação de  $d(\langle \delta \rangle)$  com o grau do nó.



Para a nossa rede exemplo, já observamos anteriormente que

$$\langle \beta \rangle = 6.708 \text{ Gbps} .$$

Considerando o comprimento das ligações, da nossa rede exemplo, em centenas de quilómetros e igual a

$$L_{12} = 1 \quad L_{13} = 1 \quad L_{24} = 2 \quad L_{23} = 2 \quad L_{35} = 2 \quad L_{45} = 2 \quad L_{46} = 1 \quad L_{56} = 1,$$

o valor médio do comprimento das ligações é

$$\langle s \rangle = \frac{1}{L} \sum_i^L s_i = \frac{12}{8} = 150 \text{ Km},$$

ou utilizando a expressão (4.5)

$$\langle s \rangle \cong \frac{\sqrt{50000}}{(\sqrt{6} - 1)} = 154.266 \text{ Km},$$

podemos observar, novamente, que (4.5) é uma boa aproximação.

O custo médio por ligação pode ser obtido assim de (4.3), isto é

$$\langle c_l \rangle = \gamma_{B-s} \langle \beta \rangle \langle s \rangle = 30 \times 6.708 \times 150 = 30186\text{€},$$

sendo o custo total para transmissão calculado por (4.6)

$$C_{\text{TRANS}} = 8 \times 30186 = 241488\text{€},$$

ou se considerarmos a aproximação apresentada em (4.11)

$$C_{\text{TRANS}} \approx 30 \times 35 \times \sqrt{50000} = 234787\text{€}.$$

Esta aproximação origina um erro de 2.85 %.

#### 4.1.2 Segunda aproximação, modelo mais refinado

O modelo apresentado anteriormente representa uma aproximação muito simplificada, por isso vamos considerar um modelo mais realista tendo em atenção os custos associados às infra-estruturas, custo de terminais e custo de amplificadores.

Vamos considerar neste modelo de custos que,  $\gamma_{t0}$  reflecte os custo fixos na ligação, tal como custo do equipamento terminal;  $\gamma_{t1}$  reflecte os custos que dependem directamente do numero de canais ópticos transportados, tal como número de transponders ópticos;  $\gamma_{t2}$  reflecte os custos que dependem da distância, tal como vala, cabo de fibra, amplificadores;  $\gamma_{t3}$  reflecte custos que crescem com o produto da distância pela largura de banda, isto é, com a complexidade do sistema. Utilizando esta divisão para os custos de um sistema de transmissão, podemos escrever

$$C_l = \gamma_{t0} + \gamma_{t1}\tau W_l + \gamma_{t2}S_l + \gamma_{t3}\tau W_l S_l, \quad (4.13)$$

notemos que  $\tau$  é a largura de banda por canal e  $w_l$  é a largura de banda total do sistema de transmissão.

Utilizando este modelo de custos podemos calcular o valor médio de custos de uma ligação

$$\langle c_l \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L c_l = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (\gamma_{t0} + \gamma_{t1}\tau W_l^k + \gamma_{t2}S_l + \gamma_{t3}\tau W_l^k S_l). \quad (4.14)$$

Assim temos para custo total de transmissão

$$C_{\text{TRANS}} = L \langle c_l \rangle = L (\gamma_{t0} + \gamma_{t1}\tau \langle W^k \rangle + \gamma_{t2} \langle S \rangle + \gamma_{t3}\tau \langle W^k S \rangle). \quad (4.15)$$

Os custos que crescem com o produto da distância e número de canais, tais como laser e compensadores de dispersão, em cenários reais tendem a ser pequenos em relação aos outros, por isso vamos considera-los desprezáveis, isto é,

$$C_{\text{TRANS}} \approx L (\gamma_{t0} + \gamma_{t1}\tau \langle W^k \rangle + \gamma_{t2} \langle S \rangle). \quad (4.16)$$

Substituindo na expressão (4.18) as quantidades já anteriormente referenciadas temos

$$\begin{aligned} C_{\text{TRANS}} &= L \{ \gamma_{t0} + \gamma_{t1}\tau \langle W^k \rangle + \gamma_{t2} \langle S \rangle \} \\ C_{\text{TRANS}} &\approx L \left[ \gamma_{t0} + \gamma_{t1} \frac{T}{D} \frac{\langle d \rangle \langle h \rangle}{\langle \delta \rangle} \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right) + \gamma_2 \frac{\sqrt{A}}{(\sqrt{N}-1)} \right] \\ C_{\text{TRANS}} &\approx \gamma_{t0} \frac{\langle \delta \rangle N}{2} + \gamma_2 \frac{\langle \delta \rangle N}{2} \frac{\sqrt{A}}{(\sqrt{N}-1)} + \gamma_{t1} \frac{\langle \delta \rangle N T (N-1) \langle h \rangle}{2 D \langle \delta \rangle} \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right) \\ C_{\text{TRANS}} &\approx \frac{1}{2} \left[ \gamma_{t0} \langle \delta \rangle N + \gamma_{t2} \frac{\langle \delta \rangle N \sqrt{A}}{(\sqrt{N}-1)} \right] + \gamma_{t1} T \left[ \frac{\langle \delta \rangle N}{2} \frac{2}{N(N-1)} \frac{(N-1) \langle h \rangle}{\langle \delta \rangle} \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right) \right] \\ C_{\text{TRANS}} &\approx \frac{1}{2} \left[ \gamma_{t0} \langle \delta \rangle N + \gamma_{t2} \frac{\langle \delta \rangle N \sqrt{A}}{(\sqrt{N}-1)} \right] + \gamma_{t1} T \left[ \langle h \rangle \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right) \right] \\ C_{\text{TRANS}} &\approx \frac{1}{2} \left[ \gamma_{t0} \langle \delta \rangle N + \gamma_{t2} \frac{\langle \delta \rangle N \sqrt{A}}{(\sqrt{N}-1)} \right] + \gamma_{t1} T \left[ \sqrt{\frac{(N-2)}{(\langle \delta \rangle - 1)}} \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right) \right] \end{aligned}$$

$$C_{\text{TRANS}}(N, T) = L \langle C_1 \rangle \approx \frac{1}{2} \left[ \gamma_{t0} + \frac{\gamma_{t2} \langle \delta \rangle N \sqrt{A}}{(\sqrt{N} - 1)} \right] + \gamma_{t1} \left[ \frac{\sqrt{A} \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right)}{\sqrt{\langle \delta \rangle} - 1} \right] T \quad (4.17)$$

Separando os custos que dependem da distância em custos associados à fibra e custos associados aos amplificadores temos:

$$C_{\text{TRANS}} \approx L \left( \gamma_{t0} + \gamma_{t1} \tau \langle w^k \rangle + \gamma_{t4} \langle s \rangle + \gamma_{t5} \left( \frac{\langle s \rangle}{\text{Span}} - 1 \right) \right). \quad (4.16)$$

onde SPAN corresponde à distância entre amplificadores.

Considerando a nossa rede exemplo

$$C_{\text{TRANS}} = \frac{1}{2} \left[ \gamma_{t0} + \frac{\gamma_{t2} \times 2.667 \times 6 \times \sqrt{50000}}{(\sqrt{6} - 1)} \right] + \gamma_{t1} \left[ \frac{\sqrt{50000} \times \left( 1 + \frac{2}{2.667} \right)}{\sqrt{2.667} - 1} \right] \times 35$$

$$C_{\text{TRANS}} = \frac{1}{2} [\gamma_{t0} + \gamma_{t2} \times 2468.562] + \gamma_{t1} \times 10607.182$$

Assumindo que

$$\gamma_{t0} = 30000\text{€} \quad \gamma_{t1} = 5000 \text{ €/Gbps} \quad \gamma_{t2} = 880 \text{ €/km},$$

obtemos

$$C_{\text{TRANS}} = \frac{1}{2} [30000 + 880 \times 2468.562] + 5000 \times 10607.182$$

$$C_{\text{TRANS}} = 54137077\text{€}$$

Os valores usados para  $\gamma_{t0}, \gamma_{t1}, \gamma_{t2}$ , foram assumidos com base no conhecimento empírico do autor. Este tema será discutido em detalhe no capítulo V.

## 4.2 Custos de gestão da largura de banda

Nesta secção vamos considerar duas formas de gestão da largura de banda, gestão exclusivamente eléctrica e gestão eléctrica e óptica.

### 4.2.1 Custos de gestão da largura de banda eléctrica

Na gestão de largura de banda eléctrica um EXC (“Electrical Cross Connect”) é usado para agregação de tráfego e para comutação de tráfego, ou seja

$$C_{BWM} = C_{EXC}. \quad a \quad (4.18)$$

Este custo pode também ser apresentado em função do custo médio por nó,

$$C_{EXC} = N \langle C_{EXC} \rangle. \quad (4.19)$$

#### 4.2.1.1 Primeira aproximação

Vamos considerar o custo de um comutador eléctrico proporcional ao tráfego, e vamos considerar o valor seguinte, de acordo com [4], é considerando novamente que 1\$ é igual a 1€,

$$\gamma_{ep} \approx 1000\text{€} / \text{Gbps}. \quad (4.20)$$

em que  $\gamma_{ep}$  é o custo de referência.

Considerando o tráfego total nos comutadores podemos formular o custo do comutador eléctrico como sendo

$$C_{EXC} = \gamma_{ep} \tau P, \quad (4.21)$$

em que  $\tau$  é a largura de banda por canal óptico,  $P$  é o número total de portas, logo  $\tau P$  é o tráfego processado em todos os nós.

O valor médio do custo dos comutadores eléctricos pode ser obtido de

$$\langle C_{EXC} \rangle = \gamma_{ep} \tau \langle P \rangle, \quad (4.22)$$

ou usando as expressões (2.14) e (3.23),

$$\langle C_{EXC} \rangle = \gamma_{ep} T \frac{2}{N(N-1)} \langle d \rangle [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]. \quad (4.23)$$

Considerando um modelo de tráfego uniforme,  $\langle d \rangle = N-1$ , temos

$$\langle C_{EXC} \rangle = \gamma_{ep} T \frac{2}{N(N-1)} (N-1) [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle].$$

(4.24)

O custo total para gestão de largura de banda utilizando um comutador eléctrico é assim obtido por

$$C_{\text{EXC}} = N \langle C_{\text{EXC}} \rangle = 2\gamma_{\text{ep}} T [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \quad (4.25)$$

Tendo em conta a nossa rede exemplo, o valor médio para custos associados ao comutador eléctrico, não considerando portos para capacidade de restauro, é utilizando a expressão (4.22)

$$\langle C_{\text{EXC}} \rangle = 1000 \times 2.333 \times 12.666 = 29549\text{€},$$

ou considerando portos necessários para garantir capacidade de restauro

$$\langle C_{\text{EXC}} \rangle = 1000 \times 2.333 \times 21 = 48993\text{€}.$$

O custo total para gestão de largura de banda utilizando um comutador eléctrico, não considerando capacidade de restauro é

$$C_{\text{EXC}} = N \langle C_{\text{EXC}} \rangle = 29549 \times 6 = 177294\text{€},$$

e considerando capacidade de restauro

$$C_{\text{EXC}} = N \langle C_{\text{EXC}} \rangle = 48993 \times 6 = 293958\text{€}.$$

#### 4.2.1.2 Segunda aproximação, modelo mais refinado

Utilizando um modelo de custos mais refinado, ou seja, considerando que o custo dos comutadores eléctricos pode ser representado por dois termos, um referente ao custo base e outro proporcional ao tráfego podemos escrever

$$C_{\text{EXC}} = \gamma_{\text{e0}} + \gamma_{\text{e1}} \tau P. \quad (4.26)$$

O valor médio do custo dos comutadores eléctricos pode ser obtido fazendo

$$\langle C_{\text{EXC}} \rangle = \gamma_{\text{e0}} + \gamma_{\text{e1}} \tau \langle P \rangle, \quad (4.27)$$

ou usando as expressões (2.14) e (3.23),

$$\langle C_{\text{EXC}} \rangle = \gamma_{\text{e0}} + \gamma_{\text{e1}} T \frac{2}{N(N-1)} \langle d \rangle [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]. \quad (4.28)$$

Considerando um modelo de tráfego uniforme,  $\langle d \rangle = N-1$ , temos

$$\langle C_{\text{EXC}} \rangle = \gamma_{e0} + \gamma_{e1} T \frac{2}{N(N-1)} (N-1) [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]. \quad (4.29)$$

O custo total para gestão de largura de banda é assim obtido

$$\begin{aligned} C_{\text{EXC}} &= \langle C_{\text{EXC}} \rangle N = (\gamma_{e0} + \gamma_{e1} T P) N \\ C_{\text{EXC}} &= \gamma_{e0} N + \gamma_{e1} T \frac{2}{N(N-1)} (N-1) [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] N \\ C_{\text{EXC}} &= \gamma_{e0} N + \gamma_{e1} 2T [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \end{aligned} \quad (4.30)$$

Considerando a nossa rede exemplo e utilizando a expressão (4.30) obtemos

$$\begin{aligned} C_{\text{EXC}} &= \gamma_{e0} \times 6 + \gamma_{e1} \times 2 \times 35 \times [1 + (1 + 0,75) \times 1,533] \\ C_{\text{EXC}} &= \gamma_{e0} \times 6 + \gamma_{e1} \times 257.793 \end{aligned}$$

Assumindo que

$$\gamma_{e0} = 10000\text{€} \quad \text{e} \quad \gamma_{e1} = 500 \text{€/Gbps}$$

obtemos

$$C_{\text{EXC}} = 10000 \times 6 + 500 \times 257.793 = 188896\text{€}.$$

Os valores usados para  $\gamma_{e0}$ ,  $\gamma_{e1}$ , foram assumidos com base no conhecimento empírico do autor. Este tema será discutido em detalhe no capítulo V.

## 4.2.2 Custos de gestão da largura de banda eléctrica e óptica

Quando utilizamos uma gestão de largura de banda eléctrica e óptica, todo o tráfego passa pelo comutador óptico e só o tráfego terminal passa pelo comutador eléctrico.

$$C_{\text{BWM}} = C_{\text{EXC}} + C_{\text{OXC}} \quad (4.31)$$

### 4.2.2.1 Primeira aproximação

Como neste caso apenas o tráfego terminal passa pelo EXC, podemos escrever que o valor médio do custo dos EXCs é

$$\langle C_{\text{EXC}} \rangle = \gamma_{ep} \tau \langle P_{\text{ADD}} + P_{\text{DROP}} \rangle = \gamma_{ep} 2\tau \langle P_{\text{ADD}} \rangle, \quad (4.32)$$

ou utilizando as expressões (2.9), (2.13) e (3.29)

$$\langle C_{\text{EXC}} \rangle = 2\gamma_{\text{ep}} \frac{2T}{N\langle d \rangle} \langle d \rangle = 4\gamma_{\text{ep}} \frac{T}{N}. \quad (4.33)$$

O custo total dos EXCs considerando gestão de largura de banda eléctrica e óptica pode ser obtido por

$$C_{\text{EXC}} = N\langle C_{\text{EXC}} \rangle = 4\gamma_{\text{ep}} T. \quad (4.34)$$

O custo total dos OXC's pode ser descrito como

$$C_{\text{OXC}} = \langle C_{\text{OXC}} \rangle N \quad (4.35)$$

Podemos considerar, segundo [4] como valor referência para o custo de um comutador óptico, é considerado novamente que 1\$ é igual a 1€,

$$\gamma_{\text{op}} \approx 2500\text{€} / \text{port} \quad (4.36)$$

Considerando o tráfego nos comutadores podemos apresentar o custo do comutador óptico como sendo

$$C_{\text{OXC}} = \gamma_{\text{op}} P, \quad (4.37)$$

o valor médio dos custos referentes aos comutadores ópticos é

$$\langle C_{\text{OXC}} \rangle = \gamma_{\text{op}} \langle P \rangle, \quad (4.38)$$

substituindo as variáveis pelas expressões apresentadas anteriormente temos

$$\langle C_{\text{OXC}} \rangle = \gamma_{\text{op}} \langle d \rangle [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \quad (4.39)$$

O custo total para gestão de largura de banda utilizando um comutador óptico é obtido considerando as expressões (4.35) e (4.39), e pode ser apresentado como

$$C_{\text{OXC}}(N) = \langle C_{\text{OXC}} \rangle N = 2\gamma_{\text{op}} D [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \quad (4.40)$$

O custo total para gestão da largura de banda eléctrica e óptica é assim obtido por

$$C_{\text{BWM}_{\text{eo}}} = C_{\text{EXC}} + C_{\text{OXC}} = 4\gamma_{\text{ep}} T + 2\gamma_{\text{op}} D [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \quad (4.41)$$

Considerando a rede exemplo temos que o custo dos EXC é

$$C_{\text{EXC}} = 4\gamma_{\text{ep}} T = 4 \times 1000 \times 35 = 140000\text{€},$$

e dos OXC's é

$$\begin{aligned} C_{\text{OXC}} &= 2\gamma_{\text{op}} D [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] = 2 \times 2500 \times 15 [1 + (1 + 0.75) \times 1.533] \\ C_{\text{OXC}} &= 276206\text{€}, \end{aligned}$$

sendo o custo total

$$C_{BWM_{eo}} = C_{EXC} + C_{OXC} = 416206€.$$

#### 4.2.2.2 Segunda aproximação, modelo mais refinado

Como neste caso apenas o tráfego terminal passa pelo EXC, podemos escrever que o valor médio do custo do EXCs é

$$\langle C_{EXC} \rangle = \gamma_{e0} + \gamma_{e1} \tau \langle P_{ADD} + P_{DROP} \rangle = \gamma_{e0} + \gamma_{e1} 2\tau \langle P_{ADD} \rangle, \quad (4.42)$$

ou utilizando as expressões (2.9), (2.13) e (3.29)

$$\langle C_{EXC} \rangle = \gamma_{e0} + 2\gamma_{e1} \frac{2T}{N \langle d \rangle} \langle d \rangle = \gamma_{e0} + 4\gamma_{e1} \frac{T}{N}. \quad (4.43)$$

O custo total dos EXC considerando gestão de largura de banda eléctrica e óptica pode ser obtido por

$$C_{EXC} = \langle C_{EXC} \rangle N = \gamma_{e0} N + 4\gamma_{e1} T. \quad (4.44)$$

Vamos considerar um modelo mais refinado para os custos do OXC onde temos em atenção custos iniciais e os custos de crescimento, isto é

$$C_{OXC} = \gamma_{o0} + \gamma_{o1} P, \quad (4.45)$$

e

$$\langle C_{OXC} \rangle = \gamma_{o0} + \gamma_{o1} \langle P \rangle = \gamma_{o0} + \gamma_{o1} \langle d \rangle [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \quad (4.46)$$

Notemos que no comutador eléctrico consideramos os custos de crescimento proporcionais ao tráfego enquanto no comutador óptico consideramo-los proporcionais aos portos.

Para este modelo o custo total associado aos comutadores ópticos é

$$C_{OXC} = \langle C_{OXC} \rangle N = \gamma_{o0} N + 2\gamma_{o1} D [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \quad (4.47)$$

O custo total para gestão da largura de banda eléctrica e óptica é assim

$$C_{BWM_{eo}} = C_{EXC} + C_{OXC} = \gamma_{e0} N + 4\gamma_{e1} T + \gamma_{o0} N + 2\gamma_{o1} D [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] \quad (4.48)$$

Considerando a rede exemplo temos que o custo dos EXC é

$$C_{EXC} = \gamma_{e0} N + 4\gamma_{e1} T = 10000 \times 6 + 4 \times 500 \times 35 = 130000€,$$

e dos OXCs é

$$C_{OXC} = \gamma_{o0} N + 2\gamma_{o1} D [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle] = 20000 \times 6 + 2 \times 2500 \times 15 [1 + (1 + 0.75) \times 1.533]$$

$$C_{OXC} = 396206€,$$



sendo o custo total

$$C_{BWM_{eo}} = C_{EXC} + C_{OXC} = 526206\text{€}.$$

Assumindo que

$$\begin{aligned} \gamma_{e0} &= 10000\text{€} & \text{e} & \quad \gamma_{e1} = 500 \text{ €/Gbps} \\ \gamma_{o0} &= 20000\text{€} & \text{e} & \quad \gamma_{o1} = 2500 \text{ €/port} \end{aligned}$$

Os valores usados para  $\gamma_{e0}$ ,  $\gamma_{e1}$ ,  $\gamma_{o1}$ ,  $\gamma_{o1}$ , foram assumidos com base no conhecimento empírico do autor. Este tema será discutido em detalhe no capítulo V.

### 4.3 Comparação dos custos - solução eléctrica ou solução eléctrica e óptica

Nesta secção vamos comparar o custo das duas arquitecturas consideradas para os nós, isto é arquitectura EXC+ OXC e a arquitectura EXC.

Para podermos analisar a diferença de custos entre as duas arquitecturas consideradas vamos usar as expressões para o modelo mais refinado, isto é a expressão (4.30) para a arquitectura EXC,

$$C_{EXC} = \gamma_{e0}N + \gamma_{e1}2T[1 + (1 + \langle k \rangle)(h)],$$

e as expressões (4.44) e (4.47) para a arquitectura EXC+OXC,

$$C_{EXC} = \gamma_{e0}N + 4\gamma_{e1}T,$$

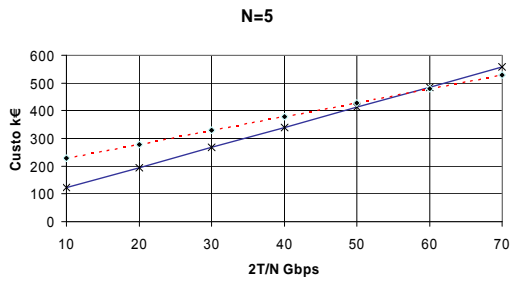
$$C_{OXC} = \gamma_{o0}N + 2\gamma_{o1}D[1 + (1 + \langle k \rangle)(h)].$$

Podemos verificar que o custo associado ao comutador óptico é independente do tráfego, enquanto que o custo associado ao comutador eléctrico é directamente proporcional ao tráfego.

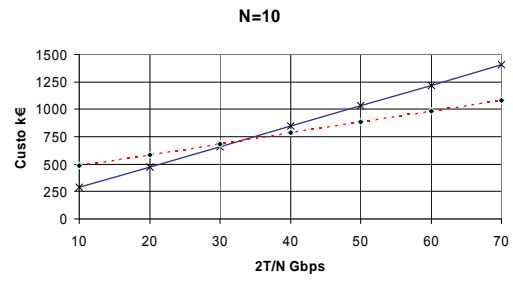
Considerámos oito redes em que o grau médio do nó é 3.6 e fizemos variar o tráfego.

Calculamos os custos associados para os diferentes valores de tráfego.

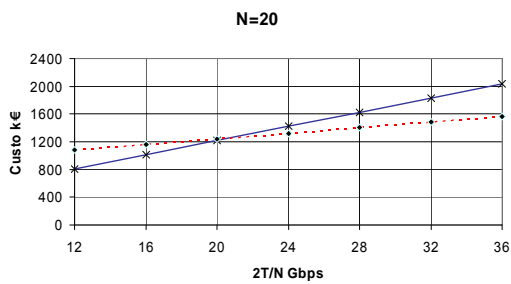
Na figura 4.2 podemos observar os resultados obtidos, considerando o tráfego por nó. A tracejado está representado os custos da arquitectura EXC+OXC, e a linha continua representa os custos da arquitectura EXC.



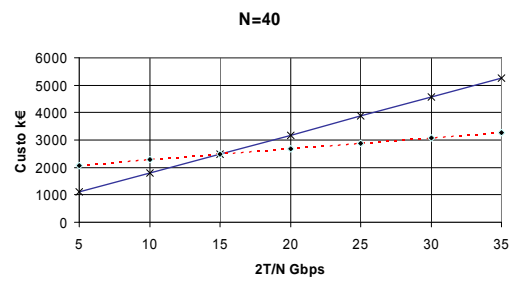
a)



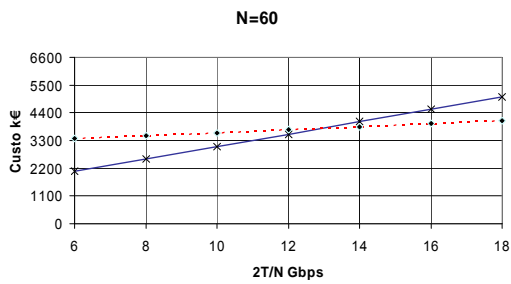
b)



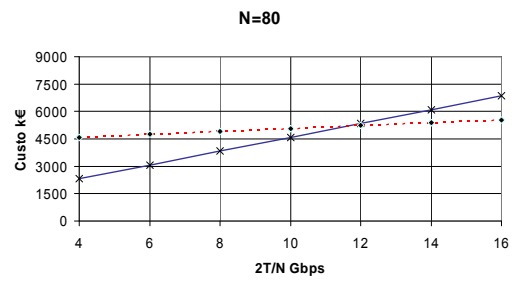
c)



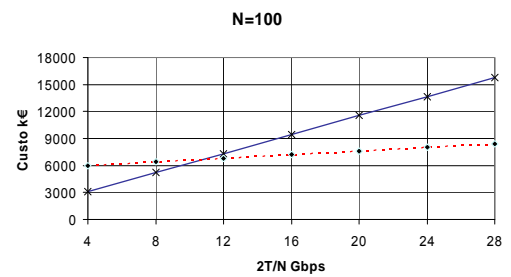
d)



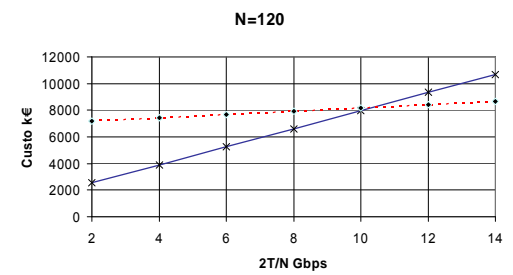
e)



f)



g)



h)

Fig. 4.2 Variação custo gestão largura de banda com o tráfego por nó a)N=5 b)N=10 c) N=20 d) N=40 e) N=60 f) N=80g) N=100 h) N=120.

Podemos verificar que os custos associados à arquitectura EXC+OXC são superiores aos custos associados à arquitectura EXC para tráfegos mais baixos, com o crescimento do tráfego a arquitectura OXC+EXC torna-se mais vantajosa. Verifica-se também que o valor de tráfego para o qual os custos das duas arquitecturas é igual é dado por, ver tabela 4.3,

| Rede  | Tráfego $C_{EXC}=C_{EXC+OXC}$ | Tráfego/Nó<br>$C_{EXC}=C_{EXC+OXC}$ | Largura de Banda por<br>pedido |
|-------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| N=5   | 150 Gbps                      | 60 Gbps                             | 15 Gbps                        |
| N=10  | 157 Gbps                      | 31.4 Gbps                           | 3.488 Gbps                     |
| N=20  | 220 Gbps                      | 22 Gbps                             | 1.157 Gbps                     |
| N=40  | 300 Gbps                      | 15 Gbps                             | 0.384 Gbps                     |
| N=60  | 390 Gbps                      | 13 Gbps                             | 0.220 Gbps                     |
| N=80  | 465 Gbps                      | 11.626 Gbps                         | 0.147 Gbps                     |
| N=100 | 540 Gbps                      | 10.8 Gbps                           | 0.109 Gbps                     |
| N=120 | 620 Gbps                      | 10.334 Gbps                         | 0.086 Gbps                     |

Tabela 4.3 Tráfego para  $C_{EXC}=C_{OXC+EXC}$

ou em forma de gráfico, ver figura 4.3 e 4.4.

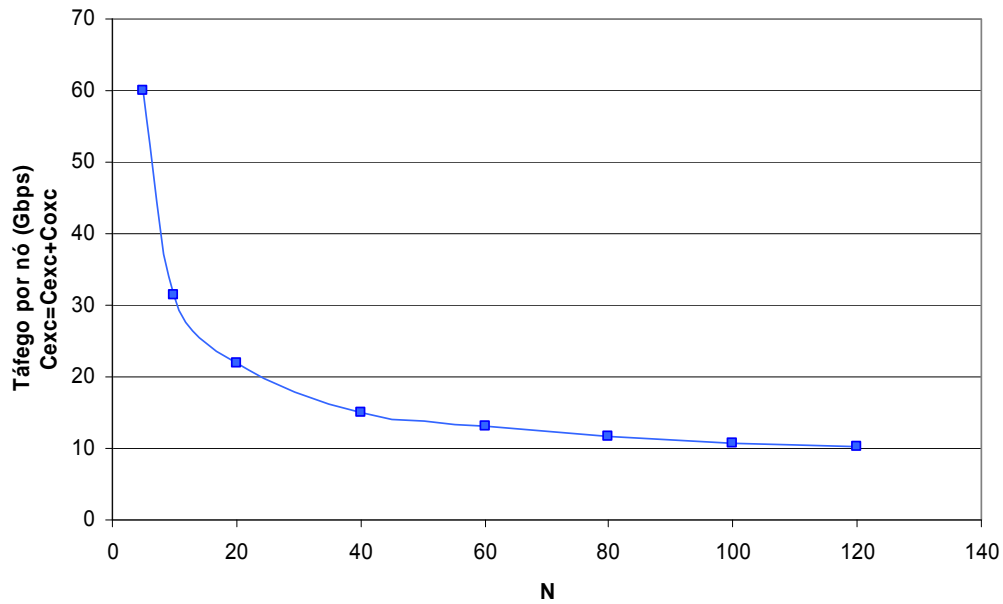


Fig. 4.3 Variação tráfego por nó para que  $C_{exc}=C_{exc+oxc}$

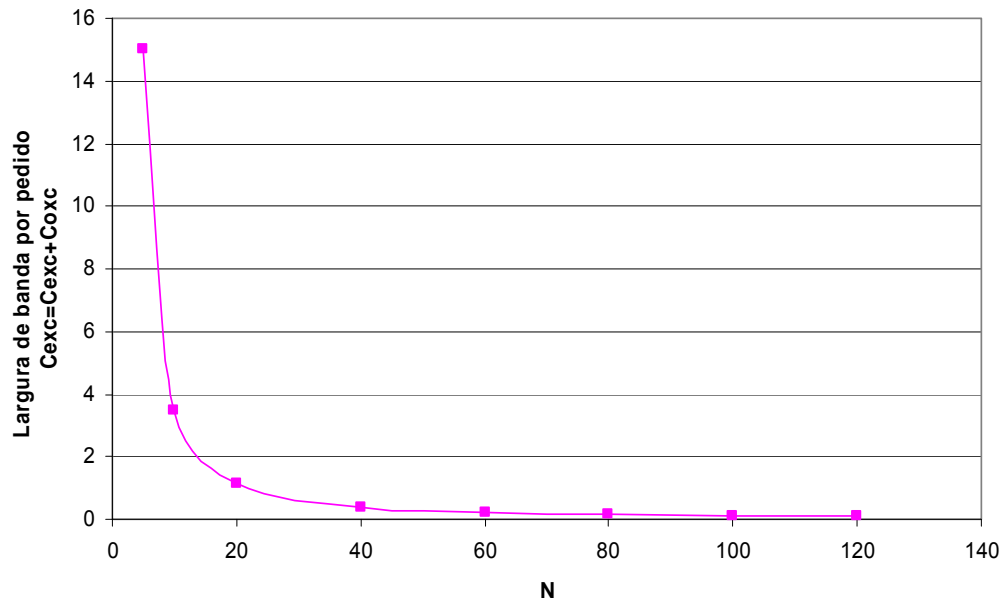


Fig. 4.3 Variação largura de banda por pedido para que  $C_{exc}=C_{exc+oxc}$

Podemos verificar que a necessidade de muito tráfego de passagem favorece a arquitectura EXC+OXC. Para um país grande, por exemplo EUA rede com muitos nós, o tráfego por nó necessário para ser mais rentável implementar uma solução EXC+OXC é pequeno se compararmos com um país mais pequeno, por exemplo Portugal rede com poucos nós.

## 4.4 Resumo

Neste capítulo especificámos conceitos fundamentais sobre o modelo de custos e necessidades de uma rede de transporte. Apresentámos expressões para cálculo dos custos de transmissão e para o calculo dos custos de gestão de largura de banda.

Na tabela 4.4 é apresentado um resumo das relações consideradas.

| Variáveis                               | Expressão   | Tipo                    | Observações                                     |
|---|---|-------------------------|---|
| Custo médio por ligação                 | (4.3) $\langle c_1 \rangle = \gamma_{B-s} \langle \beta \rangle \langle s \rangle$  | Aprox.                  | Considerando tráfego independente da distância. |
| Valor médio comprimento ligações        | (4.5) $\langle s \rangle \approx \frac{\sqrt{A}}{(\sqrt{N}-1)}$   | Aprox.                  |   |
| Custo Transmissão 1                     | (4.11) $C_{\text{TRANS}} \approx \gamma_{B-s} T \sqrt{A}$   | Aprox.                  | Para $N \gg 1$ e $3 \ll \delta \ll 4$           |
| Custos Transmissão 2                    | (4.17) $C_{\text{TRANS}} \approx \frac{1}{2} \left[ \gamma_{t0} + \frac{\gamma_{t2} \langle \delta \rangle N \sqrt{A}}{(\sqrt{N}-1)} \right] + \gamma_{t1} \left[ \frac{\sqrt{A} \left( 1 + \frac{2}{\langle \delta \rangle} \right)}{\sqrt{\langle \delta \rangle} - 1} \right] T$ | Aprox.                  |   |
| Custo gestão de LB eléctrica 1          | (4.25) $C_{\text{EXC}} = 2\gamma_{ep} T [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]$  | Exacta tráfego uniforme |   |
| Custo gestão de LB eléctrica 2          | (4.30) $C_{\text{EXC}} = \gamma_{e0} N + \gamma_{e1} 2T [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]$  | Exacta tráfego uniforme |   |
| Custo gestão de LB eléctrica e óptica 1 | (4.41) $C_{\text{BWM}_0} = 4\gamma_{ep} T + 2\gamma_{op} D [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]$   | Exacta tráfego uniforme |   |
| Custo gestão de LB eléctrica e óptica 1 | (4.48) $C_{\text{BWM}_0} = \gamma_{e0} N + 4\gamma_{e1} T + \gamma_{o0} N + 2\gamma_{o1} D [1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle]$   | Exacta tráfego uniforme |   |

Tabela 4.4 Resumo variáveis apresentadas Capítulo IV.

## 4.5 Referências

- [1] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Lista\\_de\\_pa%C3%ADses\\_e\\_territ%C3%B3rios\\_por\\_%C3%A1rea](http://pt.wikipedia.org/wiki/Lista_de_pa%C3%ADses_e_territ%C3%B3rios_por_%C3%A1rea)
- [2] J. Pedro, A. Teixeira, P. Monteiro, J. Pires, “ On a Portuguese backbone network of reference”, in SEON 2005, Aveiro, Portugal, June 2005.
- [3] M. J. O’Mahony, “The Design of a European Optical Network”, IEEE of Lightwave Technology, vol.13, NO. 5, May 1995.
- [4] S. K. Korotky, “Network Global Expectation Model: A Statistical Formalism for Quickly Quantifying Network Needs and Costs,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.22, NO. 3, pp. 703-22, March 2004.
- [5] Stefano Baroni, Polina Bayvel, “ Wavelength Requirements in Arbitrarily Connected Wavelength-Routed Optical Networks”, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.15, NO. 2, February 1997.

# Capítulo 5

## Aplicação do Modelo – Redes de Referência

Neste capítulo vamos aplicar o modelo apresentado às oito redes de referência, ver anexo A1. É ainda feita uma comparação com resultados obtidos através de uma ferramenta comercial de dimensionamento, “OPNET- WDM GURU”, versão 11.5, produzido e comercializado pela empresa OPNET Technologies, Inc.

A secção 5.1 é dedicada ao cálculo das variáveis apresentadas nos capítulos anteriores. Nos casos em que existem várias aproximações é feita uma análise comparativa entre estas.

Na secção 5.2 calculamos o custo total das 8 redes de referência. Utilizando a separação já efectuada no capítulo anterior entre custos de transmissão e custos de gestão de largura de banda.

Na secção 5.3 apresentamos um conjunto de conclusões obtidas após a análise dos resultados.

Neste capítulo não são introduzidas expressões novas. Assim, a numeração usada nas expressões apresentadas corresponde à numeração atribuída inicialmente à expressão. Permitindo assim ao leitor facilmente localizar o sitio onde a expressão é derivada ou discutida.

## 5.1 Cálculo das variáveis em 8 redes de referência

Nesta secção é aplicado o modelo apresentado às oito redes de referência. Como parâmetros de entrada temos os valores apresentados na tabela 5.1.

| REDE                          | Nós (N) | Ligações (L) |
|-------------------------------|---------|--------------|
| Portugal                      | 26      | 36           |
| European Optical Network(EON) | 20      | 39           |
| Itália                        | 14      | 29           |
| Newnet (EUA)                  | 26      | 31           |
| NFSnet (EUA)                  | 14      | 21           |
| vBNS (EUA)                    | 12      | 17           |
| Arpanet (EUA)                 | 20      | 32           |
| Korotky (EUA)                 | 100     | 171          |

Tabela 5.1 Parâmetros iniciais das oito redes referência.

Assumindo que cada pedido corresponde a um STM-16,  $\tau = 2.48832$ , na hierarquia de multiplexagem SDH e considerando o modelo de pedidos uniforme,  $\langle d \rangle = N-1$ , obtemos os valores para o tráfego apresentados na tabela 5.2.

$$\langle d \rangle = N - 1 \quad (2.10)$$

$$D = \frac{N \langle d \rangle}{2} \quad (2.9)$$

$$\tau \equiv \frac{T}{D} \quad (2.13)$$

| REDE                     | $\langle d \rangle$ | D     | $\tau$<br>Gbps | T<br>Gbps |
|--------------------------|---------------------|-------|----------------|-----------|
|                          | (2.10)              | (2.9) |                | (2.13)    |
| Portugal                 | 25                  | 325   | 2.48832        | 37.3248   |
| European optical network | 19                  | 190   | 2.48832        | 808.7040  |
| Itália                   | 13                  | 91    | 2.48832        | 472.7808  |
| Newnet (EUA)             | 25                  | 325   | 2.48832        | 226.4371  |
| NFSnet (EUA)             | 13                  | 91    | 2.48832        | 808.7040  |
| vBNS (EUA)               | 11                  | 66    | 2.48832        | 226.4371  |
| Arpanet (EUA)            | 19                  | 190   | 2.48832        | 164.2291  |
| Korotky (EUA)            | 99                  | 4950  | 2.48832        | 472.7808  |

Tabela 5.2 Tráfego total das oito redes referência.

O grau médio do nó para as oito redes consideradas é apresentado na tabela 5.3.

$$\langle \delta \rangle = \frac{2L}{N} \quad (2.17)$$



| REDE                          | $\langle \delta \rangle$ |
|-------------------------------|--------------------------|
|                               | (2.17)                   |
| Portugal                      | 2.77                     |
| European Optical Network(EON) | 3.90                     |
| Itália                        | 4.14                     |
| Newnet (EUA)                  | 2.38                     |
| NFSnet (EUA)                  | 3.00                     |
| vBNS (EUA)                    | 2.83                     |
| Arpanet (EUA)                 | 3.20                     |
| Korotky (EUA)                 | 3.42                     |

Tabela 5.3 Média grau nó das oito redes referência.

Podemos verificar que o grau médio está compreendido entre 2.38 e 4.14 o que reforça a restrição usada na secção 2.3.4, quando se assumiu que o grau estava compreendido entre 2.5 e 4.5.

Até este momento todas as variáveis calculadas são exactas, para o cálculo do número médio de saltos vamos considerar as cinco aproximações apresentadas no Capítulo 2, assim como o valor exacto obtido utilizando a ferramenta comercial de dimensionamento, “OPNET- WDM GURU”. Os resultados obtidos podem ser observados na tabela 5.4 e na figura 5.1.

$$\langle h \rangle = 0.94 \sqrt{\frac{N-1}{\langle \delta \rangle}} \quad (2.26)$$

$$\langle h \rangle \approx 1.12 \sqrt{\frac{N}{\langle \delta \rangle}} \quad (2.27)$$

$$\langle h \rangle \approx \sqrt{\frac{(N-2)}{\langle \delta \rangle - 1}} \quad (2.28)$$

$$\langle h \rangle \approx \frac{\ln \left[ \frac{(N-1)(\langle \delta \rangle - 2)}{\langle \delta \rangle} + 1 \right]}{\ln(\langle \delta \rangle - 1)} \quad (2.32)$$

$$\langle h \rangle \cong \begin{cases} 0.66 - 0.011N + \frac{1.23 + 0.31N - 0.002N^2}{\langle \delta \rangle}, & N < 60 \\ 0.31 - 0.006N + \frac{-9.67 + 5.37 \ln(N)}{\langle \delta \rangle}, & N \geq 60 \end{cases} \quad (2.37)$$

|                               | Exacto  | Aprox.  | Aprox.  | Aprox.  | Aprox.   | Aprox.  |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
|                               | OPNET   | Korotky | Korotky | Korotky | Labourd. | Prop.   |
| <h>                           | exacto  | (2.26)  | (2.27)  | (2.28)  | (2.32)   | (2.37)  |
|                               | <h>     | <h>     | <h>     | <h>     | <h>      | <h>     |
| <b>REDE</b>                   |         |         |         |         |          |         |
| Portugal                      | 3.71690 | 2.82435 | 3.43182 | 3.68310 | 3.63245  | 3.24050 |
| European Optical Network(EON) | 2.36320 | 2.07478 | 2.53630 | 2.49136 | 2.18642  | 2.14000 |
| Itália                        | 1.87910 | 1.66514 | 2.05888 | 1.95402 | 1.78525  | 1.75586 |
| Newnet (EUA)                  | 4.23690 | 3.04361 | 3.69824 | 4.16333 | 4.96545  | 3.70284 |
| NFSnet (EUA)                  | 2.14286 | 1.95677 | 2.41948 | 2.44949 | 2.41504  | 2.23200 |
| vBNS (EUA)                    | 2.40910 | 1.85215 | 2.30494 | 2.33550 | 2.38140  | 2.17341 |
| Arpanet (EUA)                 | 2.75790 | 2.29050 | 2.80000 | 2.86039 | 2.65702  | 2.51188 |
| Korotky (EUA)                 | 6.67515 | 5.05746 | 6.05627 | 6.36364 | 4.23208  | 4.11344 |

Tabela 5.4 Média do número de saltos por pedido (diferentes aproximações).

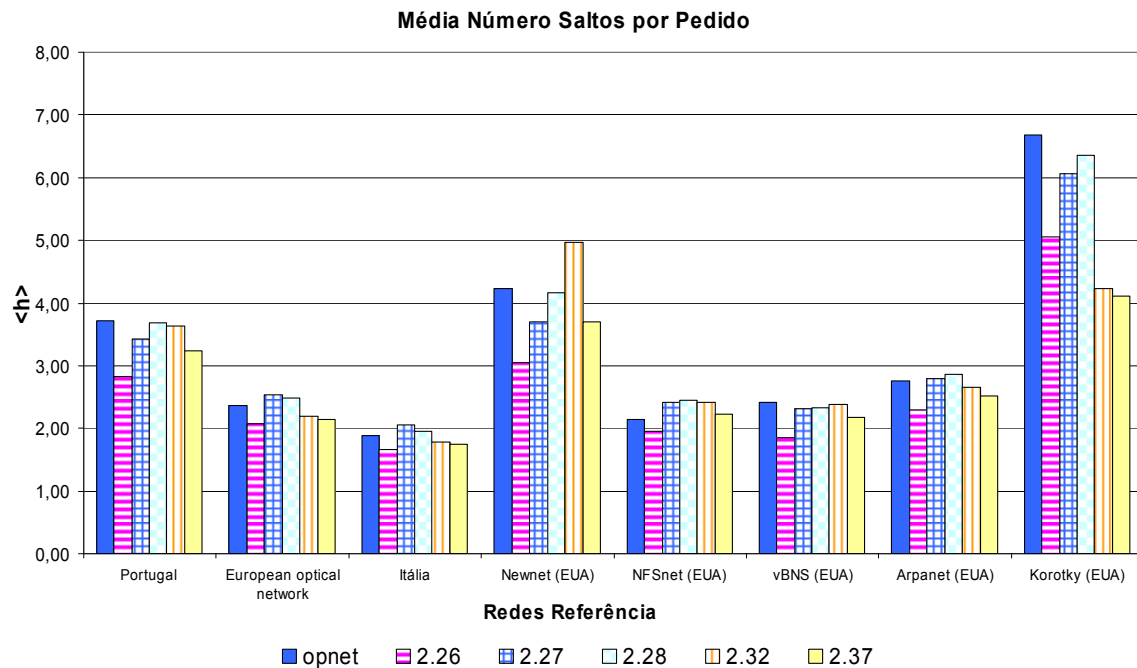


Fig. 5.1 Média do número de saltos por pedido (diferentes aproximações).

Comparando os resultados obtidos podemos concluir que para as 8 redes de referência temos o seguinte erro, ver tabela 5.5, sendo o erro médio apresentado na tabela 5.6.

|                          | Aprox.<br>Korotky | Aprox.<br>Korotky | Aprox.<br>Korotky | Aprox.<br>Labourd. | Aprox.<br>Prop. |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| <b>&lt;h&gt;</b>         | (2.26)            | (2.27)            | (2.28)            | (2.32)             | (2.37)          |
|                          | <b>Erro</b>       | <b>Erro</b>       | <b>Erro</b>       | <b>Erro</b>        | <b>Erro</b>     |
| <b>REDE</b>              |                   |                   |                   |                    |                 |
| Portugal                 | 24%               | 8%                | 1%                | 2%                 | 13%             |
| European optical network | 12%               | 7%                | 5%                | 7%                 | 9%              |
| Itália                   | 11%               | 10%               | 4%                | 5%                 | 7%              |
| Newnet (EUA)             | 28%               | 13%               | 2%                | 17%                | 13%             |
| NFSnet (EUA)             | 9%                | 13%               | 14%               | 13%                | 4%              |
| vBNS (EUA)               | 23%               | 4%                | 3%                | 1%                 | 10%             |
| Arpanet (EUA)            | 17%               | 2%                | 4%                | 4%                 | 9%              |
| Korotky (EUA)            | 24%               | 9%                | 5%                | 37%                | 38%             |

Tabela 5.5 Erro das aproximações para a média do número de saltos por pedido.

|                   | Aprox.<br>Korotky | Aprox.<br>Korotky | Aprox.<br>Korotky | Aprox.<br>Labourd. | Aprox.<br>Prop. |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| <b>&lt;h&gt;</b>  | (2.26)            | (2.27)            | (2.28)            | (2.32)             | (2.37)          |
|                   | <b>Erro</b>       | <b>Erro</b>       | <b>Erro</b>       | <b>Erro</b>        | <b>Erro</b>     |
| <b>Erro Médio</b> | 19%               | 8%                | 5%                | 11%                | 13%             |

Tabela 5.6 Erro médio das aproximações para a média do número de saltos por pedido.

Podemos assim concluir que a aproximação (2.28) é a que melhor se aproxima do valor exacto para as redes consideradas. Notemos que se não considerarmos a rede Korotky (EUA) o erro médio entre as aproximações (2.27), (2.28), (2.32) e (2.37) é semelhante, ver tabela 5.7.

|                   | Aprox.<br>Korotky | Aprox.<br>Korotky | Aprox.<br>Labourd. | Aprox.<br>Prop. |
|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| <b>&lt;h&gt;</b>  | (2.27)            | (2.28)            | (2.32)             | (2.37)          |
|                   | <b>Erro</b>       | <b>Erro</b>       | <b>Erro</b>        | <b>Erro</b>     |
| <b>Erro Médio</b> | 8%                | 5%                | 7%                 | 9%              |

Tabela 5.7 Erro médio das aproximações para a média do n.º saltos por pedido não considerando a rede Korotky (EUA).

O facto das expressões (2.32) e (2.37) apresentarem maus resultados para a rede Korotky (EUA) deve-se ao facto de na sua derivação se considerar que é possível interligar directamente qualquer par de nós. Numa rede com a extensão dos EUA e com muitos nós a interligação directa entre a costa oeste e este, na prática, não ocorre num único salto, ou seja, o pressuposto usado na derivação de (2.32) e (2.37) é claramente violado nesta rede.

O número médio de canais ópticos por ligação não considerando capacidade de restauro,  $\langle W^0 \rangle$ , é apresentado na tabela 5.8.

$$\langle W^0 \rangle = \frac{D\langle h \rangle}{L} \tag{2.38}$$

| Média de canais por ligação s/ restauro |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| (2.39)                                  |           |           |           |           |           |           |
| $\langle W^0 \rangle$                   |           |           |           |           |           |           |
| $\langle h \rangle$                     | exacto    | (2.26)    | (2.27)    | (2.28)    | (2.32)    | (2.37)    |
| REDE                                    |           |           |           |           |           |           |
| Portugal                                | 33.55535  | 25.49759  | 30.98175  | 33.25020  | 32.79291  | 29.25451  |
| European Optical Network(EON)           | 11.51303  | 10.10791  | 12.35634  | 12.13742  | 10.65178  | 10.42564  |
| Itália                                  | 5.89649   | 5.22508   | 6.46064   | 6.13157   | 5.60200   | 5.50977   |
| Newnet (EUA)                            | 44.41911  | 31.90879  | 38.77191  | 43.64784  | 52.05714  | 38.82008  |
| NFSnet (EUA)                            | 9.28573   | 8.47932   | 10.48440  | 10.61446  | 10.46516  | 9.67200   |
| vBNS (EUA)                              | 9.35298   | 7.19069   | 8.94859   | 9.06722   | 9.24544   | 8.43795   |
| Arpanet (EUA)                           | 16.37503  | 13.59982  | 16.62500  | 16.98355  | 15.77605  | 14.91426  |
| Korotky (EUA)                           | 193.22803 | 146.40014 | 175.31297 | 184.21053 | 122.50751 | 119.07326 |

Tabela 5.8 Média do número de canais ópticos por ligação s/ capacidade de restauro.

O erro associado ao valor médio do número de canais ópticos é apresentado na tabela 5.9. Notemos que o erro médio associado ao valor médio do número de canais é igual ao erro médio do número de saltos, ver tabela 5.10.

| Média de canais por ligação s/ restauro |  |        |        |        |        |        |
|---|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| (2.39)                                  |  |        |        |        |        |        |
| $\langle W^0 \rangle$                   |  |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$                     |  | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| REDE                                    |  | Erro   | Erro   | Erro   | Erro   | Erro   |
| Portugal                                |  | 24%    | 8%     | 1%     | 2%     | 13%    |
| European Optical Network(EON)           |  | 12%    | 7%     | 5%     | 7%     | 9%     |
| Itália                                  |  | 11%    | 10%    | 4%     | 5%     | 7%     |
| Newnet (EUA)                            |  | 28%    | 13%    | 2%     | 17%    | 13%    |
| NFSnet (EUA)                            |  | 9%     | 13%    | 14%    | 13%    | 4%     |
| vBNS (EUA)                              |  | 23%    | 4%     | 3%     | 1%     | 10%    |
| Arpanet (EUA)                           |  | 17%    | 2%     | 4%     | 4%     | 9%     |
| Korotky (EUA)                           |  | 24%    | 9%     | 5%     | 37%    | 38%    |

Tabela 5.9 Erro das aproximações para o valor médio de canais ópticos.

| $\langle h \rangle$ | $\langle W^0 \rangle$ | $\langle W^0 \rangle$ | $\langle W^0 \rangle$ | $\langle W^0 \rangle$ | $\langle W^0 \rangle$ |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                     | (2.26)                | (2.27)                | (2.28)                | (2.32)                | (2.37)                |
|                     | Erro                  | Erro                  | Erro                  | Erro                  | Erro                  |
| Erro Médio          | 19%                   | 8%                    | 5%                    | 11%                   | 13%                   |

Tabela 5.10 Erro médio das aproximações para o valor médio de canais ópticos.

Notemos que o erro médio associado ao número médio de canais é igual ao erro médio associado ao número médio de saltos, como seria de esperar.

O valor médio do número de canais ópticos por ligação considerando capacidade de restauro é dado por:

$$\langle W^k \rangle = \langle W^0 \rangle (1 + \langle k \rangle) \tag{3.5}$$

Para o cálculo do coeficiente de restauro foram apresentadas duas aproximações, iremos compara-las com o resultado obtido através do OPNET. Na tabela 5.11 e na figura 5.2 podemos observar os resultados obtidos. Notemos que o erro médio das duas aproximações para as 8 redes consideradas é igual, e igual a 23%.

$$\langle k \rangle \approx \frac{2}{\langle \delta \rangle} \tag{3.14}$$

$$\langle k \rangle \cong \begin{cases} 0.35 - 0.016N - 0.0001N^2 + \frac{1.85 + 0.024N - 0.0002N^2}{\langle \delta \rangle}, & N < 60 \\ 6 - 2.4\langle \delta \rangle + 0.28\langle \delta \rangle^2 - e^{-1.7 + \frac{4}{\langle \delta \rangle}}, & N \geq 60 \end{cases} \tag{3.20}$$

|                               | OPNET               | Korotky             |      | Proposto            |      |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|------|---------------------|------|
|                               | Exacto              | (3.14)              |      | (3.20)              |      |
|                               | $\langle k \rangle$ | $\langle k \rangle$ | Erro | $\langle k \rangle$ | Erro |
| REDE                          |                     |                     |      |                     |      |
| Portugal                      | 0.79801             | 0.72222             | 9%   | 0.71097             | 11%  |
| European Optical Network(EON) | 0.78396             | 0.51282             | 35%  | 0.56692             | 28%  |
| Itália                        | 0.86550             | 0.48276             | 44%  | 0.62459             | 28%  |
| Newnet (EUA)                  | 1.18083             | 0.83871             | 29%  | 0.84719             | 28%  |
| NFSnet (EUA)                  | 0.65128             | 0.66667             | 2%   | 0.82200             | 26%  |
| vBNS (EUA)                    | 1.11950             | 0.70588             | 37%  | 0.88802             | 21%  |
| Arpanet (EUA)                 | 0.66030             | 0.62500             | 5%   | 0.69313             | 5%   |
| Korotky (EUA)                 | 0.74914             | 0.58480             | 22%  | 0.47863             | 36%  |

Tabela 5.11 Coeficiente de restauro.

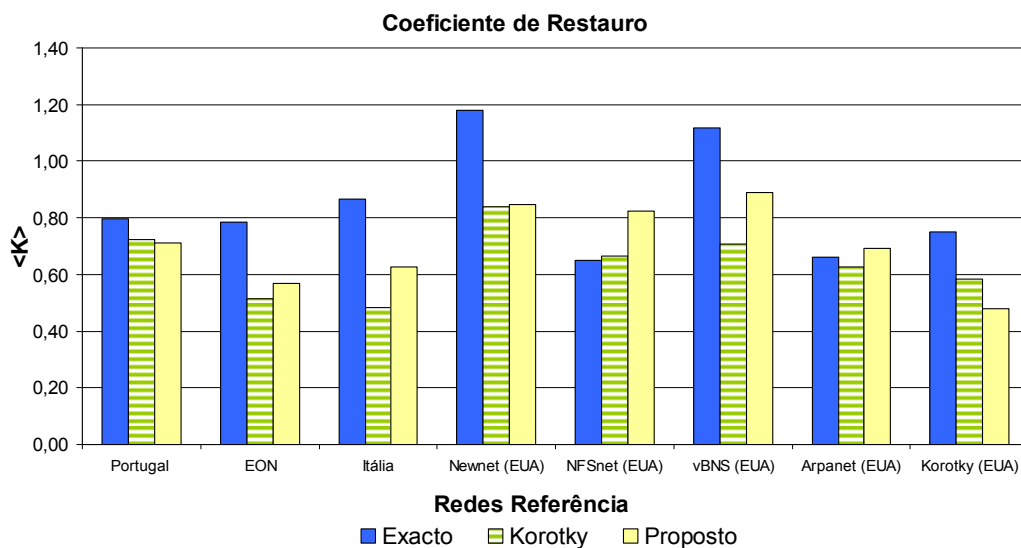


Fig. 5.2 Coeficiente de restauro.

Podemos apresentar dezoito resultados diferentes para o valor médio de canais numa ligação considerando restauro, ou seja, utilizando os seis resultados para o número médio de saltos, um exacto e cinco aproximações, e os três valores, um exacto e duas aproximações para o coeficiente de restauro.

| Média de canais por ligação c/ restauro (3.5) |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <k> exacto                                    |           |           |           |           |           |           |
| <W <sup>k</sup> >                             |           |           |           |           |           |           |
| <h>   | exacto    | (2.26)    | (2.27)    | (2.28)    | (2.32)    | (2.37)    |
| REDE  |           |           |           |           |           |           |
| Portugal                                      | 60.33296  | 45.84501  | 55.70560  | 59.78430  | 58.96208  | 52.60000  |
| European Optical Network(EON)                 | 20.53883  | 18.03215  | 22.04326  | 21.65272  | 19.00240  | 18.59897  |
| Itália  | 10.99988  | 9.74737   | 12.05230  | 11.43843  | 10.45051  | 10.27847  |
| Newnet (EUA)                                  | 96.87044  | 69.58758  | 84.55486  | 95.18842  | 113.52767 | 84.65992  |
| NFSnet (EUA)                                  | 15.33335  | 14.00175  | 17.31270  | 17.52746  | 17.28093  | 15.97120  |
| vBNS (EUA)                                    | 19.82360  | 15.24064  | 18.96652  | 19.21795  | 19.59568  | 17.88421  |
| Arpanet (EUA)                                 | 27.18746  | 22.57979  | 27.60249  | 28.19779  | 26.19297  | 24.76214  |
| Korotky (EUA)                                 | 337.98238 | 256.07397 | 306.64649 | 322.20953 | 214.28247 | 208.27549 |

Tabela 5.12 Média do número de canais ópticos por ligação considerando coeficiente de restauro exacto.

| Média de canais por ligação c/ restauro (3.5) |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <k> (3.14)                                    |           |           |           |           |           |           |
| <W <sup>k</sup> >                             |           |           |           |           |           |           |
| <h>   | exacto    | (2.26)    | (2.27)    | (2.28)    | (2.32)    | (2.37)    |
| REDE  |           |           |           |           |           |           |
| Portugal                                      | 57.78976  | 43.91252  | 53.35746  | 57.26423  | 56.47667  | 50.38277  |
| European Optical Network(EON)                 | 17.41714  | 15.29145  | 18.69292  | 18.36173  | 16.11423  | 15.77212  |
| Itália  | 8.74307   | 7.74753   | 9.57957   | 9.09164   | 8.30641   | 8.16967   |
| Newnet (EUA)                                  | 81.67385  | 58.67100  | 71.29029  | 80.25570  | 95.71797  | 71.37886  |
| NFSnet (EUA)                                  | 15.47621  | 14.13220  | 17.47400  | 17.69076  | 17.44194  | 16.12000  |
| vBNS (EUA)                                    | 15.95508  | 12.26647  | 15.26525  | 15.46762  | 15.77164  | 14.39415  |
| Arpanet (EUA)                                 | 26.60943  | 22.09971  | 27.01563  | 27.59827  | 25.63608  | 24.23567  |
| Korotky (EUA)                                 | 306.22687 | 232.01425 | 277.83518 | 291.93598 | 194.14932 | 188.70674 |

Tabela 5.13 Média do número de canais ópticos por ligação considerando aproximação (3.14) para o coeficiente de restauro.

| Média de canais por ligação c/ restauro (3.5) |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\langle k \rangle$ (3.20)                    |           |           |           |           |           |           |
| $\langle W^k \rangle$                         |           |           |           |           |           |           |
| $\langle h \rangle$                           | exacto    | (2.26)    | (2.27)    | (2.28)    | (2.32)    | (2.37)    |
| REDE  |           |           |           |           |           |           |
| Portugal                                      | 57.41208  | 43.62553  | 53.00875  | 56.88998  | 56.10757  | 50.05350  |
| European Optical Network(EON)                 | 18.04003  | 15.83832  | 19.36143  | 19.01840  | 16.69052  | 16.33618  |
| Itália  | 9.57939   | 8.48863   | 10.49591  | 9.96131   | 9.10097   | 8.95114   |
| Newnet (EUA)                                  | 82.05041  | 58.94151  | 71.61897  | 80.62572  | 96.15928  | 71.70796  |
| NFSnet (EUA)                                  | 16.91859  | 15.44932  | 19.10257  | 19.33954  | 19.06753  | 17.62238  |
| vBNS (EUA)                                    | 17.65864  | 13.57619  | 16.89516  | 17.11913  | 17.45561  | 15.93105  |
| Arpanet (EUA)                                 | 27.72497  | 23.02620  | 28.14820  | 28.75528  | 26.71082  | 25.25170  |
| Korotky (EUA)                                 | 285.71236 | 216.47133 | 259.22266 | 272.37883 | 181.14302 | 176.06504 |

Tabela 5.14 Média do número de canais ópticos por ligação considerando aproximação (3.20) para o coeficiente de restauro.

Na figura 5.3 podemos observar o número médio de canais considerando capacidade de restauro e o valor exacto para  $\langle h \rangle$ . Notemos que o erro médio das duas aproximações é 11%, ver tabela 5.15.

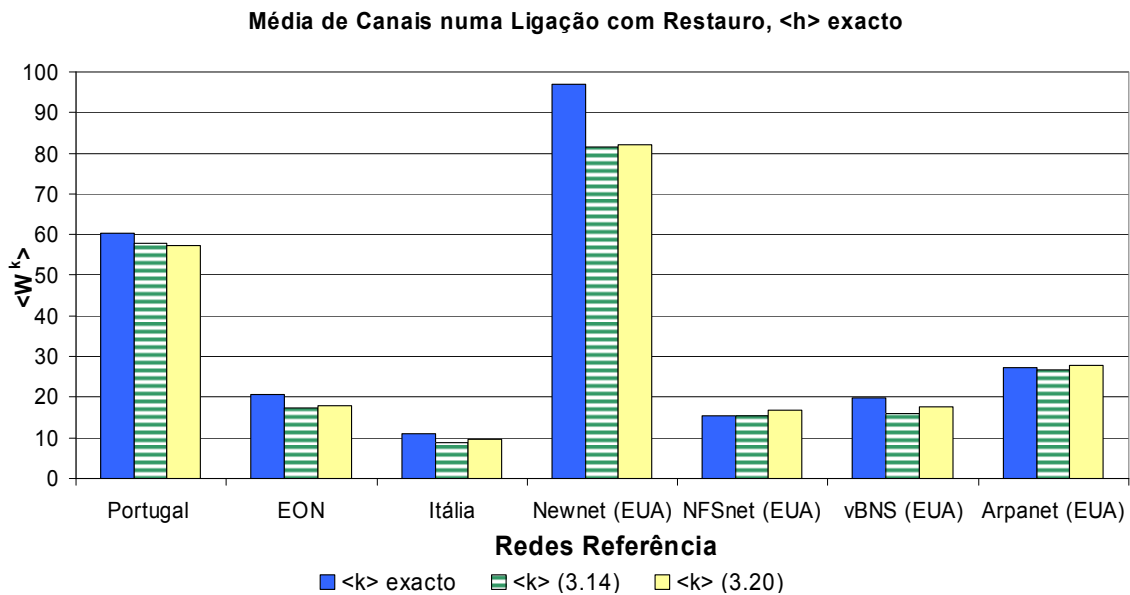


Fig. 5.3 Média do número de canais considerando o valor exacto de  $\langle h \rangle$  e capacidade de restauro.

**Média de Canais numa Ligação com Restauro,  $\langle h \rangle$  exacto**

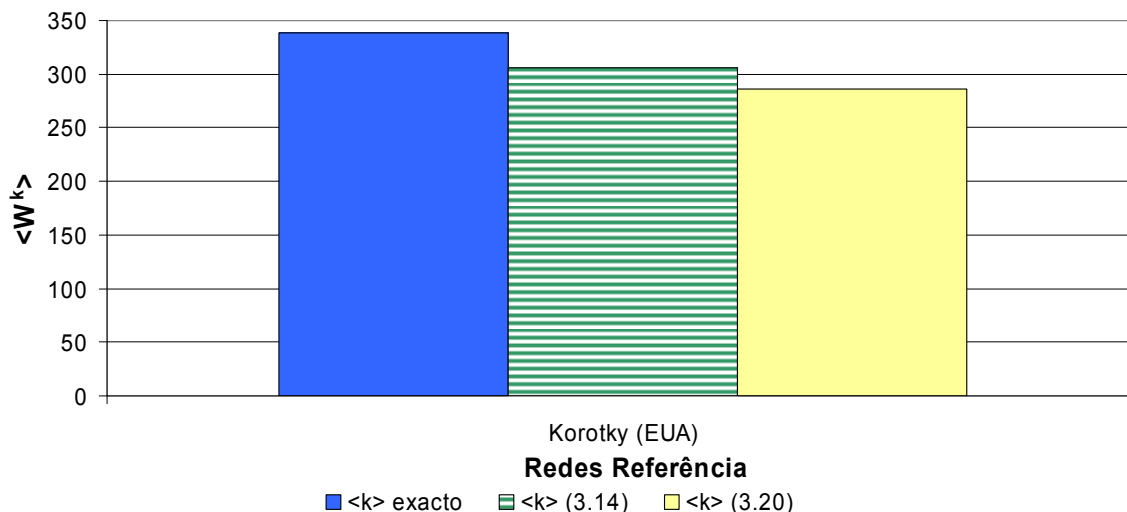


Fig. 5.4 Média do número de canais considerando o valor exacto de  $\langle h \rangle$  e capacidade de restauro.

Os resultados relativos à rede Korotky (EUA) foram apresentados num gráfico diferente atendendo a que os valores são muito superiores aos das restantes redes. Isto deve-se ao facto desta rede ter um número de nós muito superior ao das restantes redes.

| $\langle h \rangle$           | exacto                |                       |      |                       |      |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|------|
|                               | exacto                | (3.14)                | Erro | (3.20)                | Erro |
| $\langle k \rangle$           | $\langle W^k \rangle$ | $\langle W^k \rangle$ |      | $\langle W^k \rangle$ |      |
| Portugal                      | 60.33296              | 57.78976              | 4%   | 57.41208              | 5%   |
| European Optical Network(EON) | 20.53883              | 17.41714              | 15%  | 18.04003              | 12%  |
| Itália                        | 10.99988              | 8.74307               | 21%  | 9.57939               | 13%  |
| Newnet (EUA)                  | 96.87044              | 81.67385              | 16%  | 82.05041              | 15%  |
| NFSnet (EUA)                  | 15.33335              | 15.47621              | 1%   | 16.91859              | 10%  |
| vBNS (EUA)                    | 19.82360              | 15.95508              | 20%  | 17.65864              | 11%  |
| Arpanet (EUA)                 | 27.18746              | 26.60943              | 2%   | 27.72497              | 2%   |
| Korotky (EUA)                 | 337.98238             | 306.22687             | 9%   | 285.71236             | 15%  |

Tabela 5.15 Erro associado ao número de canais considerando capacidade de restauro, utilizando o valor exacto de  $\langle h \rangle$  e as duas aproximações para  $\langle k \rangle$ .

Considerando o valor exacto para o número médio de saltos e a aproximação (3.14) para o coeficiente de restauro obtivemos um erro médio de 11%, quando utilizamos a aproximação (3.20) nas mesmas circunstâncias obtivemos um erro médio de 10%.

Considerando as aproximações para  $\langle h \rangle$ , ver figuras 5.5 a 5.10, obtemos um erro médio, ver tabelas 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19.



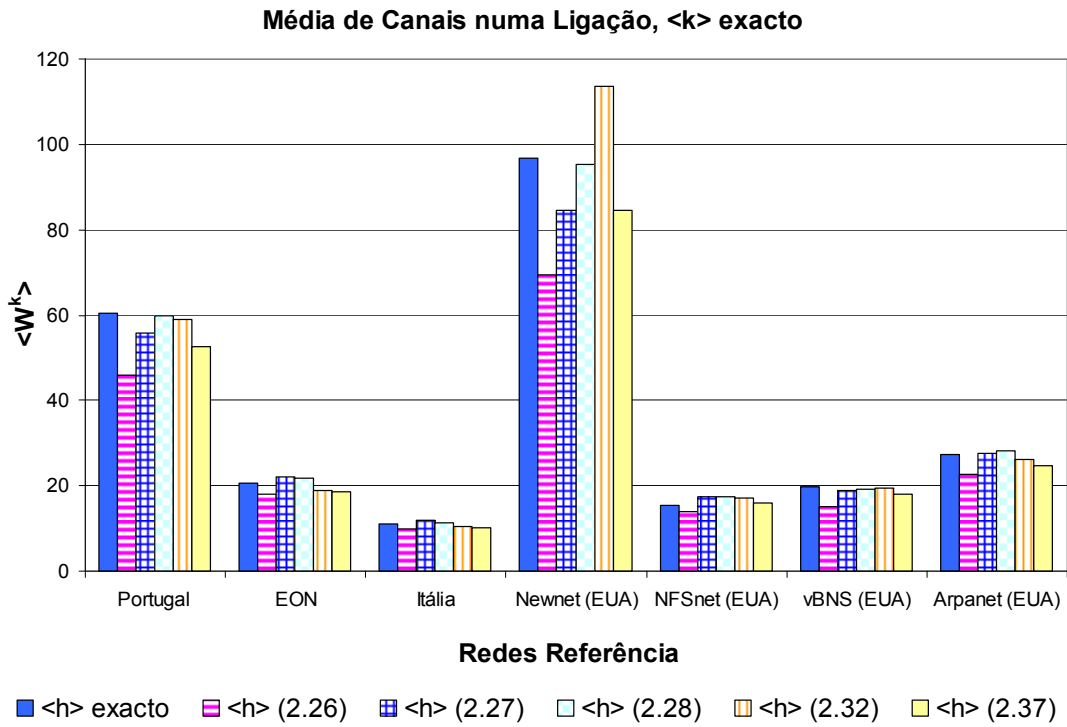


Fig. 5.5 Média do número de canais considerando  $\langle k \rangle$  exacto e as aproximações para  $\langle h \rangle$ .

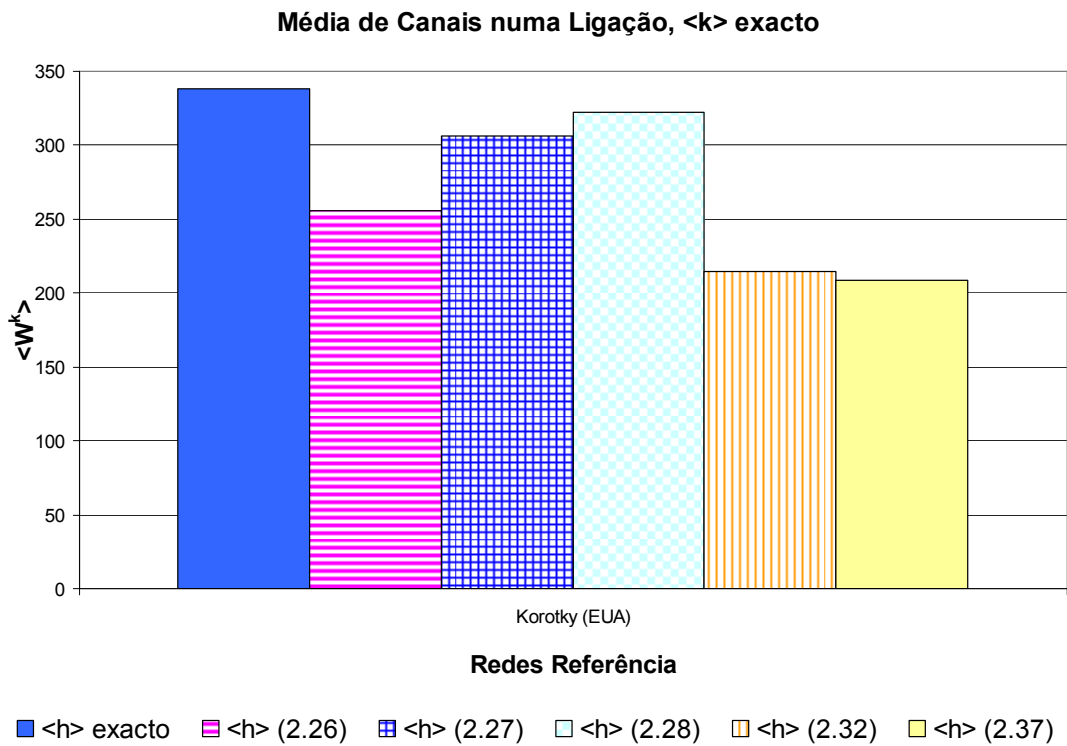


Fig. 5.6 Média do número de canais considerando  $\langle k \rangle$  exacto e as aproximações para  $\langle h \rangle$ .

Média de Canais numa Ligação, <k> Korotky (3.14)

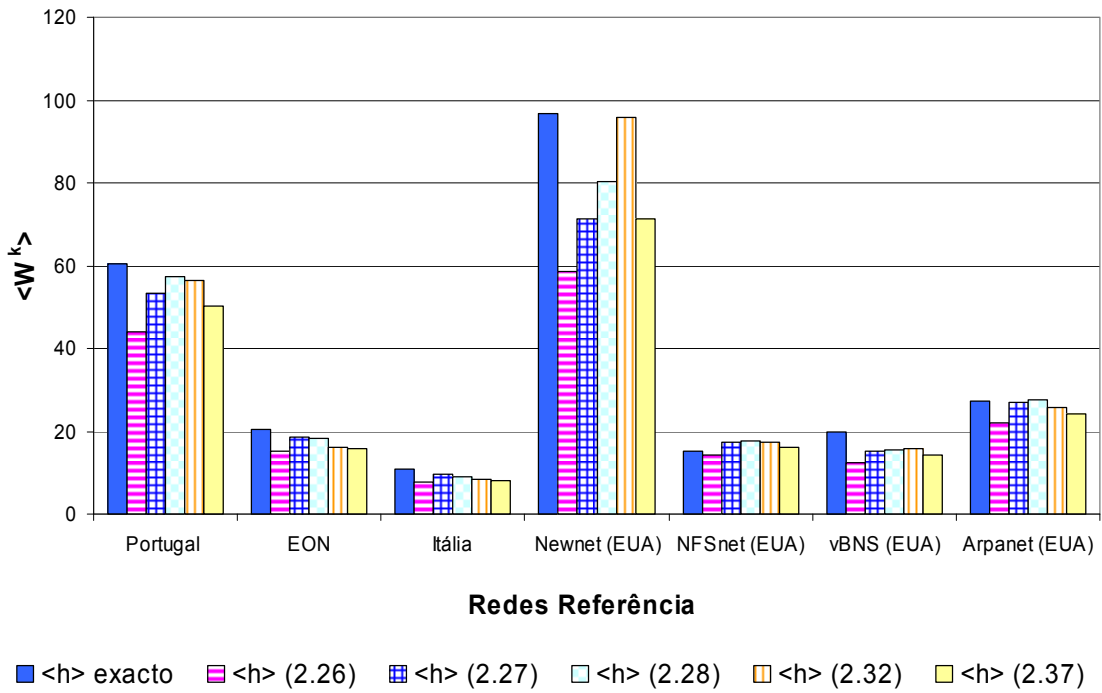


Fig. 5.7 Média do número de canais considerando aproximação (3.14) para <k> exacto e as aproximações para <h>.

Média de Canais numa Ligação, <k> Korotky (3.14)

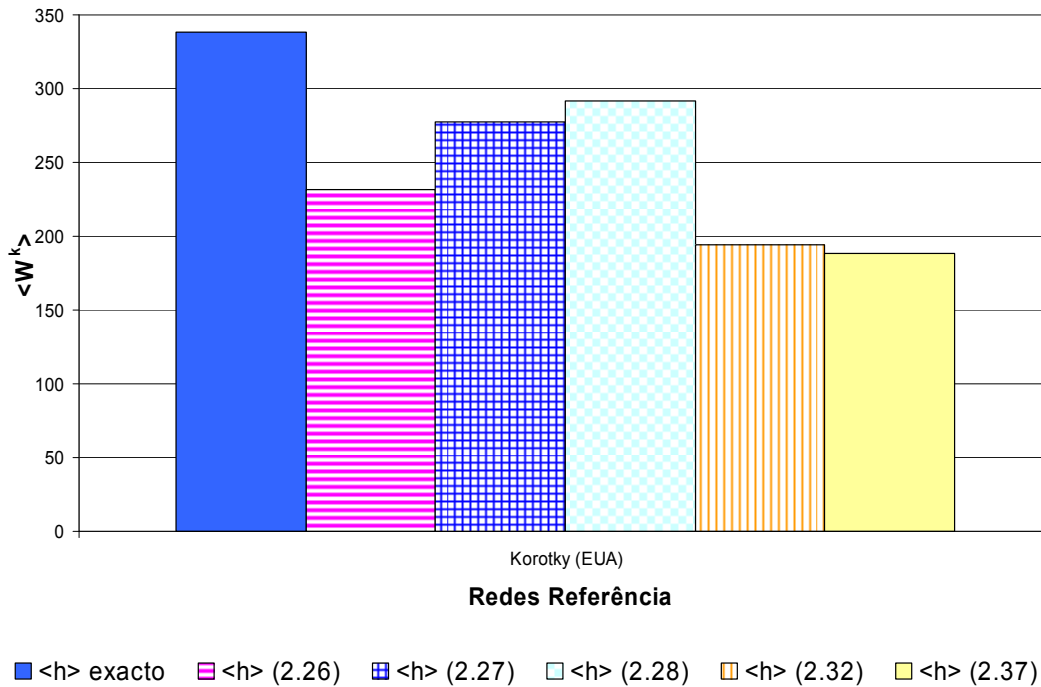


Fig. 5.8 Média do número de canais considerando aproximação (3.14) para <k> exacto e as aproximações para <h>.

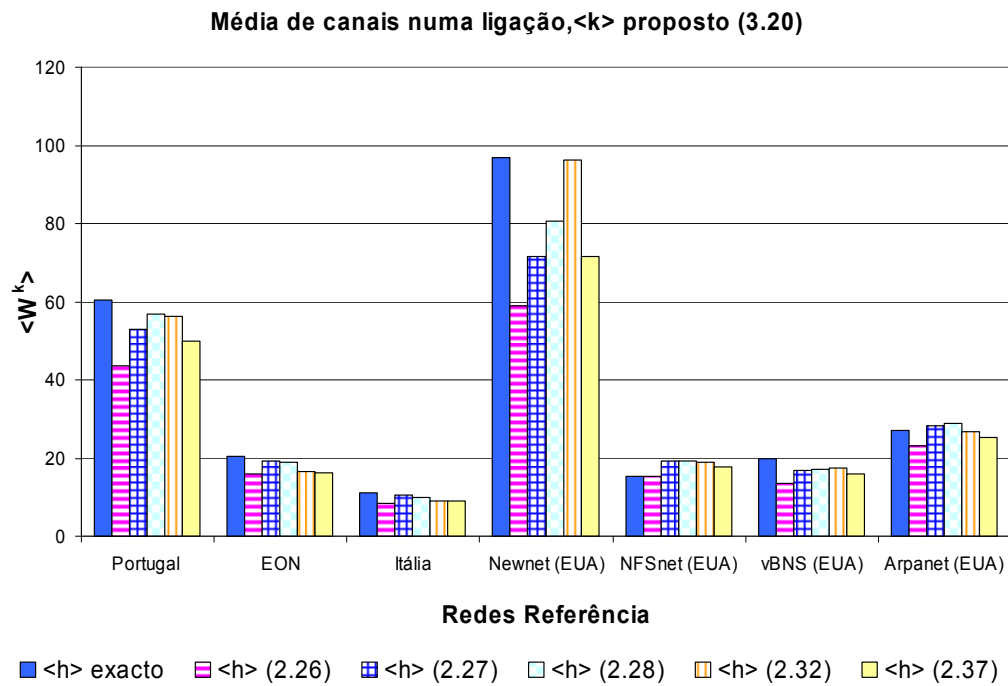


Fig. 5.9 Média do número de canais considerando aproximação (3.20) para <math>\langle k \rangle</math> exacto e as aproximações para <math>\langle h \rangle</math>.

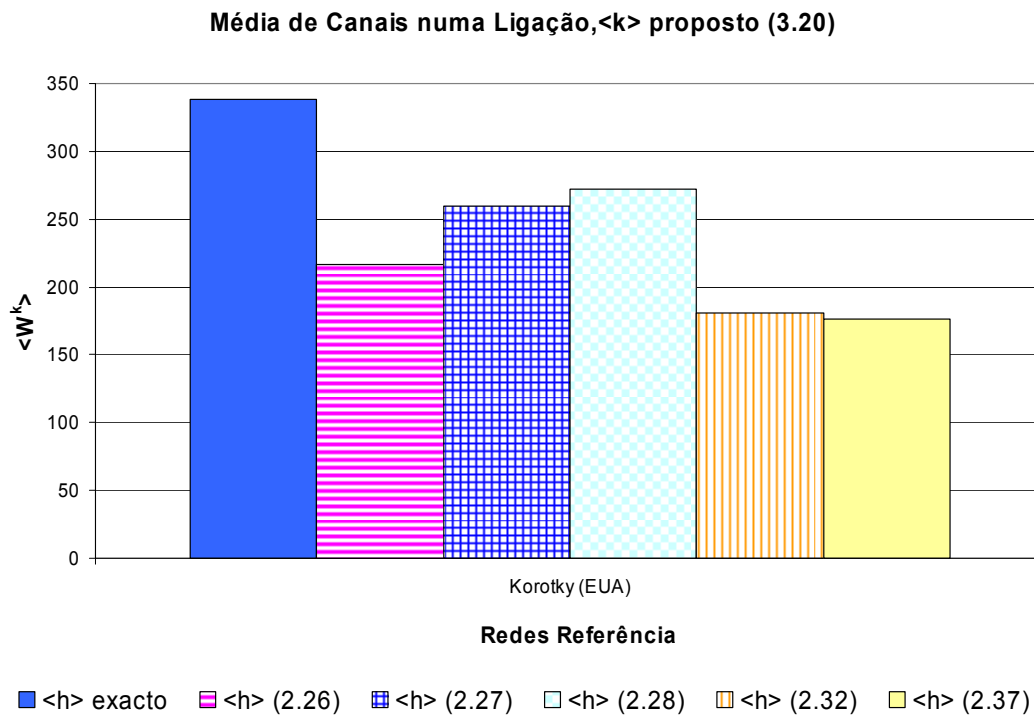


Fig. 5.10 Média do número de canais considerando aproximação (3.20) para <math>\langle k \rangle</math> exacto e as aproximações para <math>\langle h \rangle</math>.

|                               | $\langle W^k \rangle$ |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$           | exacto                |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$           | exacto                | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>REDE</b>                   |                       |        |        |        |        |        |
| Portugal                      | $\langle W^k \rangle$ | 24%    | 8%     | 1%     | 2%     | 13%    |
| European Optical Network(EON) |                       | 12%    | 7%     | 5%     | 7%     | 9%     |
| Itália                        |                       | 11%    | 10%    | 4%     | 5%     | 7%     |
| Newnet (EUA)                  |                       | 28%    | 13%    | 2%     | 17%    | 13%    |
| NFSnet (EUA)                  |                       | 9%     | 13%    | 14%    | 13%    | 4%     |
| vBNS (EUA)                    |                       | 23%    | 4%     | 3%     | 1%     | 10%    |
| Arpanet (EUA)                 |                       | 17%    | 2%     | 4%     | 4%     | 9%     |
| Korotky (EUA)                 |                       | 24%    | 9%     | 5%     | 37%    | 38%    |

Tabela 5.16 Erro associado ao número de canais considerando  $\langle k \rangle$  exacto e as aproximações para  $\langle h \rangle$ .

|                     | $\langle W^k \rangle$ |        |        |        |        |        |
|---------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$ | exacto                |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$ | exacto                | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>Erro Médio</b>   |                       | 19%    | 8%     | 5%     | 11%    | 13%    |

Tabela 5.17 Erro médio para o número de canais considerando  $\langle k \rangle$  exacto e as aproximações para  $\langle h \rangle$ .

|                               | $\langle W^k \rangle$ |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$           | (3.14)                |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$           | exacto                | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>Rede</b>                   |                       |        |        |        |        |        |
| Portugal                      | 4%                    | 27%    | 12%    | 5%     | 6%     | 16%    |
| European Optical Network(EON) | 15%                   | 26%    | 9%     | 11%    | 22%    | 23%    |
| Itália                        | 21%                   | 30%    | 13%    | 17%    | 24%    | 26%    |
| Newnet (EUA)                  | 16%                   | 39%    | 26%    | 17%    | 1%     | 26%    |
| NFSnet (EUA)                  | 1%                    | 8%     | 14%    | 15%    | 14%    | 5%     |
| vBNS (EUA)                    | 20%                   | 38%    | 23%    | 22%    | 20%    | 27%    |
| Arpanet (EUA)                 | 2%                    | 19%    | 1%     | 2%     | 6%     | 11%    |
| Korotky (EUA)                 | 9%                    | 31%    | 18%    | 14%    | 43%    | 44%    |

Tabela 5.18 Erro associado ao número de canais considerando a aprox. (3.14) para  $\langle k \rangle$  e as aproximações para  $\langle h \rangle$ .

|                     | $\langle W^k \rangle$ |        |        |        |        |        |
|---------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$ | (3.14)                |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$ | exacto                | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>Erro médio</b>   | 11%                   | 27%    | 14%    | 13%    | 17%    | 22%    |

Tabela 5.19 Erro médio para o número de canais considerando aprox. (3.14) para  $\langle k \rangle$  e as aproximações para  $\langle h \rangle$ .

| <k>                      | <W <sup>k</sup> > |        |        |        |        |        |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                          | (3.20)            |        |        |        |        |        |
| <h>                      | exacto            | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>REDE</b>              |                   |        |        |        |        |        |
| Portugal                 | 5%                | 28%    | 12%    | 6%     | 7%     | 17%    |
| European Optical Network | 12%               | 23%    | 6%     | 7%     | 19%    | 20%    |
| Itália                   | 13%               | 23%    | 5%     | 9%     | 17%    | 19%    |
| Newnet (EUA)             | 15%               | 39%    | 26%    | 17%    | 1%     | 26%    |
| NFSnet (EUA)             | 10%               | 1%     | 25%    | 26%    | 24%    | 15%    |
| vBNS (EUA)               | 11%               | 32%    | 15%    | 14%    | 12%    | 20%    |
| Arpanet (EUA)            | 2%                | 15%    | 4%     | 6%     | 2%     | 7%     |
| Korotky (EUA)            | 15%               | 36%    | 23%    | 19%    | 46%    | 48%    |

Tabela 5.20 Erro associado ao número de canais considerando a aprox. (3.20) para &lt;k&gt; e as aproximações para &lt;h&gt;.

| <k>        | <W <sup>k</sup> > |        |        |        |        |        |
|------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|            | (3.20)            |        |        |        |        |        |
| <h>        | exacto            | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| Erro médio | 10%               | 25%    | 14%    | 13%    | 16%    | 21%    |

Tabela 5.21 Erro médio para o número de canais considerando a aprox. (3.20) para &lt;k&gt; e as aproximações para &lt;h&gt;.

Podemos verificar que o erro associado ao número médio de canais considerando restauro utilizando as duas aproximações para <k> e <h> exacto é 11% e 10% para a aproximação (3.14) e aproximação (3.20) respectivamente. Para o calculo de <h> verificamos que utilizando a aproximação (2.28) obtemos os melhores resultados. Assim usando a aproximação (2.28) para <h> e independente da expressão usada para <k> obtemos um erro médio de 13%.

O valor médio de tráfego por ligação é dado por,

$$\langle \beta \rangle = \langle h \rangle \frac{T}{L}. \quad (3.22)$$

Na tabela 5.22 são apresentados os valores para o tráfego médio por ligação. Notemos que a melhor aproximação, erro igual a 5% ver tabela 5.23, é conseguida utilizando a aproximação (2.28) para <h>.

|                               | $\langle \beta \rangle$<br>(Gbps) |           |           |           |           |           |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| REDE                          |                                   |           |           |           |           |           |
| $\langle h \rangle$           | Exacto                            | (2.26)    | (2.27)    | (2.28)    | (2.32)    | (2.37)    |
| Portugal                      | 83.49644                          | 63.44616  | 77.09251  | 82.73713  | 81.59925  | 72.79459  |
| European Optical Network(EON) | 28.64809                          | 25.15171  | 30.74652  | 30.20178  | 26.50504  | 25.94233  |
| Itália                        | 14.67234                          | 13.00167  | 16.07614  | 15.25731  | 13.93957  | 13.71008  |
| Newnet (EUA)                  | 110.52897                         | 79.39928  | 96.47692  | 108.60978 | 129.53483 | 96.59679  |
| NFSnet (EUA)                  | 23.10586                          | 21.09926  | 26.08854  | 26.41216  | 26.04067  | 24.06703  |
| vBNS (EUA)                    | 23.27320                          | 17.89273  | 22.26697  | 22.56215  | 23.00562  | 20.99632  |
| Arpanet (EUA)                 | 40.74632                          | 33.84071  | 41.36832  | 42.26051  | 39.25585  | 37.11145  |
| Korotky (EUA)                 | 480.81316                         | 364.29039 | 436.23478 | 458.37474 | 304.83788 | 296.29236 |

Tabela 5.22 Média do tráfego numa ligação.

|                     | $\langle \beta \rangle$ |        |        |        |        |        |
|---------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\langle h \rangle$ | Exacto                  | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>Erro Médio</b>   |                         | 19%    | 8%     | 5%     | 11%    | 13%    |

Tabela 5.23 Erro médio tráfego por ligação considerando as diferentes aproximações para  $\langle h \rangle$ .

O erro médio para o tráfego por ligação é igual ao erro médio associado ao número médio de saltos.

O valor médio do número de portos por nó é dado por (3.26), ver tabela 5.22. Este valor pode também ser obtido somando os portos de “ADD”, portos de “DROP” e portos de passagem.

$$\langle P \rangle = \langle d \rangle (1 + \langle h \rangle) \tag{3.25}$$

$$\langle P_{ADD} \rangle = \langle P_{DROP} \rangle = \langle d \rangle \tag{3.31}$$

$$\langle P_{THRU} \rangle = \langle d \rangle (\langle h \rangle - 1) \tag{3.32}$$

|                                | $\langle P \rangle$<br>(3.25) | $\langle P_{ADD} \rangle$<br>(3.31) | $\langle P_{DROP} \rangle$<br>(3.31) | $\langle P_{THRU} \rangle$<br>(3.32) |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>REDE</b>                    |                               |                                     |                                      |                                      |
| Portugal                       | 117.92                        | 25                                  | 25                                   | 67.92                                |
| European Optical Network (EON) | 63.90                         | 19                                  | 19                                   | 25.90                                |
| Itália                         | 37.43                         | 13                                  | 13                                   | 11.43                                |
| Newnet (EUA)                   | 130.92                        | 25                                  | 25                                   | 80.92                                |
| NFSnet (EUA)                   | 40.86                         | 13                                  | 13                                   | 14.86                                |
| vBNS (EUA)                     | 37.50                         | 11                                  | 11                                   | 15.50                                |
| Arpanet (EUA)                  | 71.40                         | 19                                  | 19                                   | 33.40                                |
| Korotky (EUA)                  | 759.84                        | 99                                  | 99                                   | 561.84                               |

Tabela 5.24 Média do número de portos, portos “ADD”, portos “DROP”, portos de passagem.

Os valores obtidos na tabela 5.24 foram obtidos considerando o  $\langle h \rangle$  exacto. Vamos agora considerar as diferentes aproximações para  $\langle h \rangle$ . Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.25 e figura 5.11. O erro associado a cada aproximação é apresentado na tabela 5.26. Notemos que o melhor erro médio 3% é obtido quando utilizamos a aproximação (2.28), ver tabela 5.27.

| $\langle h \rangle$            | $\langle P \rangle$ |         |         |         |         |         |
|--------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                | exacto              | (2.26)  | (2.27)  | (2.28)  | (2.32)  | (2.37)  |
| <b>REDE</b>                    |                     |         |         |         |         |         |
| Portugal                       | 117,923             | 95,609  | 110,796 | 117,077 | 115,811 | 106,013 |
| European Optical Network (EON) | 63,901              | 58,421  | 67,190  | 66,336  | 60,542  | 59,660  |
| Itália                         | 37,428              | 34,647  | 39,766  | 38,402  | 36,208  | 35,826  |
| Newnet (EUA)                   | 130,923             | 101,090 | 117,456 | 129,083 | 149,136 | 117,571 |
| NFSnet (EUA)                   | 40,857              | 38,438  | 44,453  | 44,843  | 44,395  | 42,016  |
| vBNS (EUA)                     | 37,500              | 31,374  | 36,354  | 36,690  | 37,195  | 34,908  |
| Arpanet (EUA)                  | 71,400              | 62,519  | 72,200  | 73,347  | 69,483  | 66,726  |
| Korotky (EUA)                  | 759,840             | 599,688 | 698,570 | 729,000 | 517,976 | 506,231 |

Tabela 5.25 Média do número portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$ .

| $\langle h \rangle$            | $\langle P \rangle$ |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                | exacto              | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>REDE</b>                    | Erro                | Erro   | Erro   | Erro   | Erro   | Erro   |
| Portugal                       |                     | 19%    | 6%     | 1%     | 2%     | 10%    |
| European Optical Network (EON) |                     | 9%     | 5%     | 4%     | 5%     | 7%     |
| Itália                         |                     | 7%     | 6%     | 3%     | 3%     | 4%     |
| Newnet (EUA)                   |                     | 23%    | 10%    | 1%     | 14%    | 10%    |
| NFSnet (EUA)                   |                     | 6%     | 9%     | 10%    | 9%     | 3%     |
| vBNS (EUA)                     |                     | 16%    | 3%     | 2%     | 1%     | 7%     |
| Arpanet (EUA)                  |                     | 12%    | 1%     | 3%     | 3%     | 7%     |
| Korotky (EUA)                  |                     | 21%    | 8%     | 4%     | 32%    | 33%    |

Tabela 5.26 Erro associado ao número de portos considerando as diferentes aproximações para  $\langle h \rangle$ .

| $\langle h \rangle$ | $\langle P \rangle$ |        |        |        |        |        |
|---------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | Exacto              | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>Erro Médio</b>   |                     | 14%    | 6%     | 3%     | 8%     | 10%    |

Tabela 5.27 Erro médio do número de portos considerando as diferentes aproximações para  $\langle h \rangle$ .

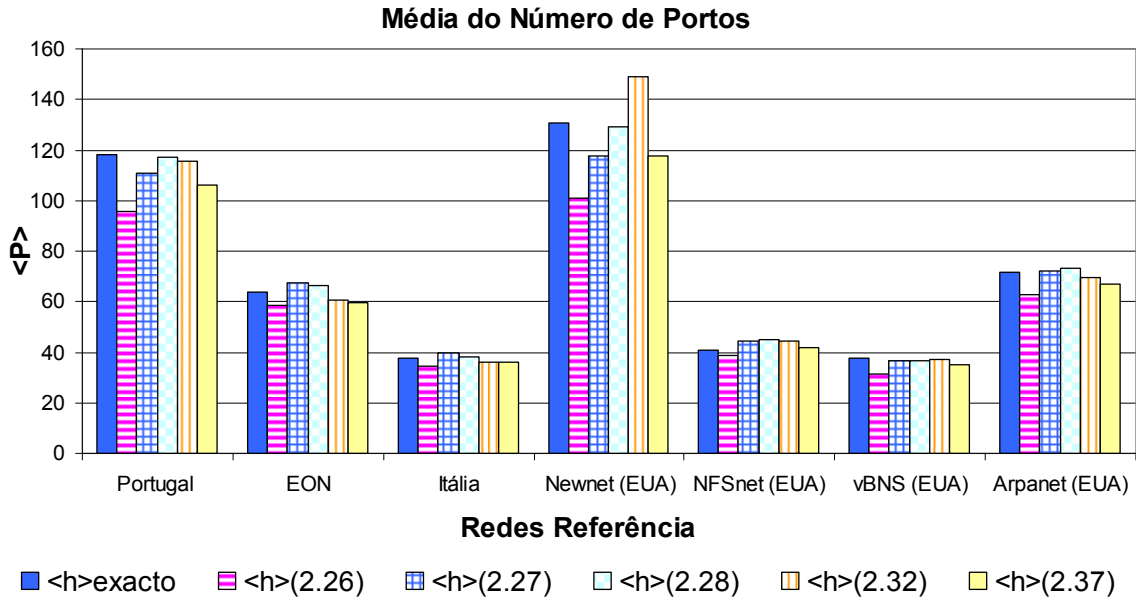


Fig. 5.11 Média do número de portos considerando as aproximações para  $\langle h \rangle$ .

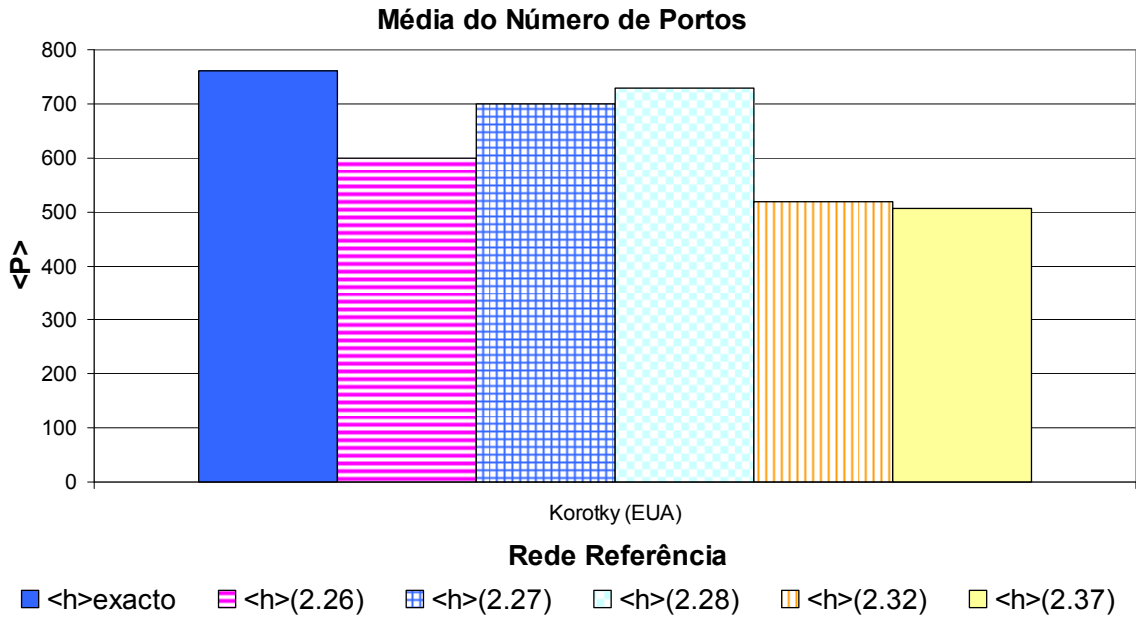


Fig. 5.12 Média do número de portos considerando as aproximações para  $\langle h \rangle$ , rede Korotky (EUA).

Podemos ainda dividir os portos em portos de linha e portos terminal, ver tabela 5.28.

$$\langle P_{\text{TERM}} \rangle = \langle d \rangle \tag{3.34}$$

$$\langle P_{\text{LINE}} \rangle = \langle d \rangle \langle h \rangle \tag{3.35}$$



|                                | $\langle P \rangle$ | $\langle P_{TERM} \rangle$ | $\langle P_{LINE} \rangle$ |
|--------------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|
|                                | (3.25)              | (3.34)                     | (3.35)                     |
| <b>REDE</b>                    |                     |                            |                            |
| Portugal                       | 117.9225            | 25                         | 92.9225                    |
| European Optical Network (EON) | 63.9008             | 19                         | 44.9008                    |
| Itália                         | 37.4283             | 13                         | 24.4283                    |
| Newnet (EUA)                   | 130.9225            | 25                         | 105.9225                   |
| NFSnet (EUA)                   | 40.8572             | 13                         | 27.8572                    |
| vBNS (EUA)                     | 37.5001             | 11                         | 26.5001                    |
| Arpanet (EUA)                  | 71.4001             | 19                         | 52.4001                    |
| Korotky (EUA)                  | 759.8399            | 99                         | 660.8399                   |

Tabela 5.28 Média do número de portos, portos de linha, portos de terminal.

Os valores obtidos na tabela 5.28 foram obtidos considerando o  $\langle h \rangle$  exacto. Vamos agora considerar as diferentes aproximações para  $\langle h \rangle$ . Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.29. Notemos que as aproximações para  $\langle h \rangle$ , só interferem nos portos de linha.

O erro associado as aproximações é apresentado na tabela 5.30, assim como o erro médio apresentado na tabela 5.31. Notemos que o erro médio associado aos portos de linha é igual ao erro associado ao número médio de saltos.

| $\langle h \rangle$      | $\langle P_{line} \rangle$<br>exacto | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
|--------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>REDE</b>              |                                      |        |        |        |        |        |
| Portugal                 | 92.92                                | 70.61  | 85.80  | 92.08  | 90.81  | 81.01  |
| European optical network | 44.90                                | 39.42  | 48.19  | 47.34  | 41.54  | 40.66  |
| Itália                   | 24.43                                | 21.65  | 26.77  | 25.40  | 23.21  | 22.83  |
| Newnet (EUA)             | 105.92                               | 76.09  | 92.46  | 104.08 | 124.14 | 92.57  |
| NFSnet (EUA)             | 27.86                                | 25.44  | 31.45  | 31.84  | 31.40  | 29.02  |
| vBNS (EUA)               | 26.50                                | 20.37  | 25.35  | 25.69  | 26.20  | 23.91  |
| Arpanet (EUA)            | 52.40                                | 43.52  | 53.20  | 54.35  | 50.48  | 47.73  |
| Korotky (EUA)            | 660.84                               | 500.69 | 599.57 | 630.00 | 418.98 | 407.23 |

Tabela 5.29 Média dos portos linha considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$ .

| $\langle h \rangle$      | $\langle P_{line} \rangle$<br>exacto | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
|--------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>REDE</b>              |                                      |        |        |        |        |        |
| Portugal                 |                                      | 24%    | 8%     | 1%     | 2%     | 13%    |
| European optical network |                                      | 12%    | 7%     | 5%     | 7%     | 9%     |
| Itália                   |                                      | 11%    | 10%    | 4%     | 5%     | 7%     |
| Newnet (EUA)             |                                      | 28%    | 13%    | 2%     | 17%    | 13%    |
| NFSnet (EUA)             |                                      | 9%     | 13%    | 14%    | 13%    | 4%     |
| vBNS (EUA)               |                                      | 23%    | 4%     | 3%     | 1%     | 10%    |
| Arpanet (EUA)            |                                      | 17%    | 2%     | 4%     | 4%     | 9%     |
| Korotky (EUA)            |                                      | 24%    | 9%     | 5%     | 37%    | 38%    |

Tabela 5.30 Erro associado à média dos portos linha considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$ .

|            |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <h>        | exacto | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| Erro Médio |        | 19%    | 8%     | 5%     | 11%    | 13%    |

Tabela 5.31 Erro médio associado à média dos portos de linha considerando as aproximações de <h>.

Considerando capacidade de restauro e a aproximação (3.40), obtemos os seguintes resultados para o número de portos, ver tabela 5.32 e figuras 5.13 e 5.14.

$$\langle P^{k_{TERM}} \rangle = \langle d \rangle \tag{3.37}$$

$$\langle P^{k_{LINE}} \rangle = \langle d \rangle \langle h \rangle + \langle d \rangle \langle h \rangle \langle k \rangle \tag{3.37}$$

$$\langle P^K \rangle = \langle d \rangle (1 + (1 + \langle k \rangle) \langle h \rangle) \tag{3.37}$$

$$\langle P^K \rangle \approx N^{3/2} \tag{3.41}$$

|                                | $\langle P^{k_{term}} \rangle$ | $\langle P^{k_{line}} \rangle$ | $\langle P^k \rangle$ | $\langle P^k \rangle$ | $\langle P^k \rangle$ |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                | (3.37)                         | (3.37)                         | exacto                | (3.37)                | (3.41)                |
| REDE                           |                                |                                |                       |                       |                       |
| Portugal                       | 25                             | 167.07589                      | 192.07589             | 192.07589             | 132.57451             |
| European Optical Network (EON) | 19                             | 80.10143                       | 99.101427             | 99.10143              | 89.44272              |
| Itália                         | 13                             | 45.57092                       | 58.570922             | 58.57092              | 52.38320              |
| Newnet (EUA)                   | 25                             | 230.99874                      | 255.99874             | 255.99874             | 132.57451             |
| NFSnet (EUA)                   | 13                             | 46.00006                       | 59.000061             | 59.00006              | 52.38320              |
| vBNS (EUA)                     | 11                             | 56.16688                       | 67.166879             | 67.16688              | 41.56922              |
| Arpanet (EUA)                  | 19                             | 86.99989                       | 105.99989             | 105.99989             | 89.44272              |
| Korotky (EUA)                  | 99                             | 1155.89974                     | 1254.8997             | 1254.89974            | 1000.00000            |

Tabela 5.32 Média de portos, portos de linha, portos de terminal considerando capacidade restauro.

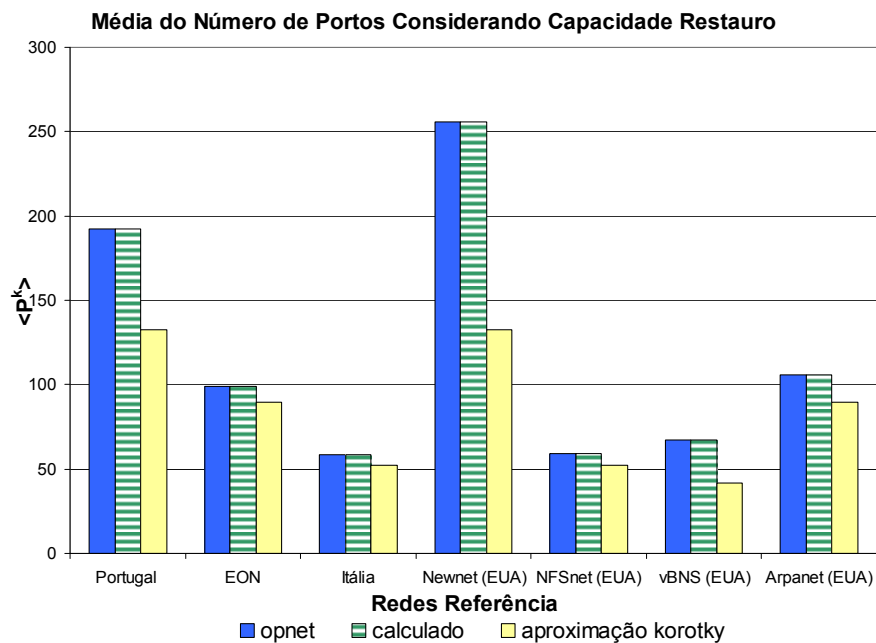


Fig. 5.13 Média de portos considerando capacidade restauro.

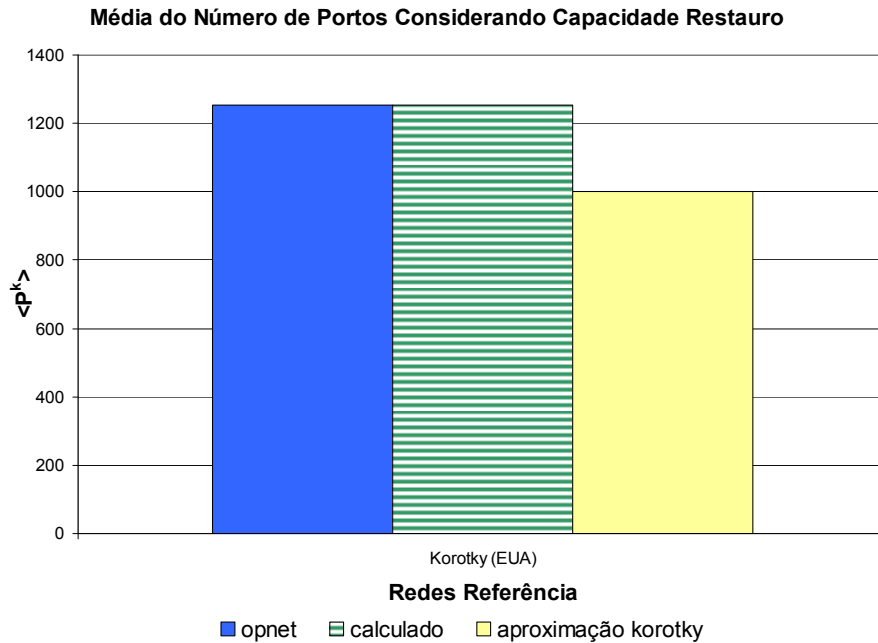


Fig. 5.14 Média de portos considerando capacidade restauro, rede Korotky (EUA).

O erro associado a aproximação (3.41) é apresentado na tabela 5.33 dando origem a um erro médio de 23%.

|                                | $\langle P^k \rangle$ |
|--------------------------------|-----------------------|
|                                | (3.41)                |
| <b>REDE</b>                    | <b>Erro</b>           |
| Portugal                       | 31%                   |
| European Optical Network (EON) | 10%                   |
| Itália                         | 11%                   |
| Newnet (EUA)                   | 48%                   |
| NFSnet (EUA)                   | 11%                   |
| vBNS (EUA)                     | 38%                   |
| Arpanet (EUA)                  | 16%                   |
| Korotky (EUA)                  | 20%                   |

O valores obtido na tabela 5.32 expressão (3.37) foi obtido considerando o  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$  exactos. Vamos agora considerar as diferentes aproximações para  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$ . Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas 5.33, 5.34 e 5.35. O erro associado as aproximações é apresentado nas tabelas 5.36, 5.37 e 5.38. O erro médio apresentado na tabela 5.37.

|                                | $\langle P^k \rangle$ |        |         |         |        |        |
|--------------------------------|-----------------------|--------|---------|---------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$            | exacto                |        |         |         |        |        |
| $\langle h \rangle$            | exacto                | (2.26) | (2.27)  | (2.28)  | (2.32) | (2.37) |
| <b>REDE</b>                    |                       |        |         |         |        |        |
| Portugal                       | 192.08                | 151.96 | 179.26  | 190.56  | 188.28 | 170.66 |
| European Optical Network (EON) | 99.10                 | 89.33  | 104.97  | 103.45  | 93.11  | 91.54  |
| Itália                         | 58.57                 | 53.38  | 62.93   | 60.39   | 56.29  | 55.58  |
| Newnet (EUA)                   | 256.00                | 190.94 | 226.63  | 251.99  | 295.72 | 226.88 |
| NFSnet (EUA)                   | 59.00                 | 55.01  | 64.94   | 65.58   | 64.84  | 60.91  |
| vBNS (EUA)                     | 67.17                 | 54.18  | 64.74   | 65.45   | 66.52  | 61.67  |
| Arpanet (EUA)                  | 106.00                | 91.26  | 107.33  | 109.23  | 102.82 | 98.24  |
| Korotky (EUA)                  | 1254.90               | 974.77 | 1147.73 | 1200.96 | 831.85 | 811.30 |

Tabela 5.33 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$  exacto.

|                                | $\langle P^k \rangle$ |        |         |         |        |        |
|--------------------------------|-----------------------|--------|---------|---------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$            | (3.14)                |        |         |         |        |        |
| $\langle h \rangle$            | Exacto                | (2.26) | (2.27)  | (2.28)  | (2.32) | (2.37) |
| <b>REDE</b>                    |                       |        |         |         |        |        |
| Portugal                       | 185.03                | 146.60 | 172.76  | 183.58  | 181.40 | 164.52 |
| European Optical Network (EON) | 86.93                 | 78.64  | 91.90   | 90.61   | 81.85  | 80.51  |
| Itália                         | 49.22                 | 45.10  | 52.69   | 50.67   | 47.41  | 46.85  |
| Newnet (EUA)                   | 219.76                | 164.91 | 195.00  | 216.38  | 253.25 | 195.21 |
| NFSnet (EUA)                   | 59.43                 | 55.40  | 65.42   | 66.07   | 65.33  | 61.36  |
| vBNS (EUA)                     | 56.21                 | 45.75  | 54.25   | 54.82   | 55.69  | 51.78  |
| Arpanet (EUA)                  | 104.15                | 89.72  | 105.45  | 107.31  | 101.04 | 96.55  |
| Korotky (EUA)                  | 1146.30               | 892.49 | 1049.20 | 1097.42 | 762.99 | 744.38 |

Tabela 5.34 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e aproximação (3.14) para  $\langle k \rangle$ .

|                                | $\langle P^k \rangle$ |        |        |         |        |        |
|--------------------------------|-----------------------|--------|--------|---------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$            | (3.20)                |        |        |         |        |        |
| $\langle h \rangle$            | exacto                | (2.26) | (2.27) | (2.28)  | (2.32) | (2.37) |
| <b>REDE</b>                    |                       |        |        |         |        |        |
| Portugal                       | 183.99                | 145.81 | 171.79 | 182.54  | 180.37 | 163.61 |
| European Optical Network (EON) | 89.36                 | 80.77  | 94.51  | 93.17   | 84.09  | 82.71  |
| Itália                         | 52.69                 | 48.17  | 56.48  | 54.27   | 50.70  | 50.08  |
| Newnet (EUA)                   | 220.66                | 165.55 | 195.78 | 217.26  | 254.30 | 196.00 |
| NFSnet (EUA)                   | 63.76                 | 59.35  | 70.31  | 71.02   | 70.20  | 65.87  |
| vBNS (EUA)                     | 61.03                 | 49.47  | 58.87  | 59.50   | 60.46  | 56.14  |
| Arpanet (EUA)                  | 107.72                | 92.68  | 109.07 | 111.02  | 104.47 | 99.81  |
| Korotky (EUA)                  | 1076.14               | 839.33 | 985.54 | 1030.54 | 718.51 | 701.14 |

Tabela 5.35 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e aproximação (3.20) para  $\langle k \rangle$ .

|                                | $\langle P^k \rangle$ |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$            | exacto                |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$            | exacto                | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>REDE</b>                    |                       |        |        |        |        |        |
| Portugal                       |                       | 21%    | 7%     | 1%     | 2%     | 11%    |
| European Optical Network (EON) |                       | 10%    | 6%     | 4%     | 6%     | 8%     |
| Itália                         |                       | 9%     | 7%     | 3%     | 4%     | 5%     |
| Newnet (EUA)                   |                       | 25%    | 11%    | 2%     | 16%    | 11%    |
| NFSnet (EUA)                   |                       | 7%     | 10%    | 11%    | 10%    | 3%     |
| vBNS (EUA)                     |                       | 19%    | 4%     | 3%     | 1%     | 8%     |
| Arpanet (EUA)                  |                       | 14%    | 1%     | 3%     | 3%     | 7%     |
| Korotky (EUA)                  |                       | 22%    | 9%     | 4%     | 34%    | 35%    |

Tabela 5.36 Erro associado a média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$  exacto.

|                                | $\langle P^k \rangle$ |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$            | (3.14)                |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$            | exacto                | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>REDE</b>                    |                       |        |        |        |        |        |
| Portugal                       | 4%                    | 24%    | 10%    | 4%     | 6%     | 14%    |
| European Optical Network (EON) | 12%                   | 21%    | 7%     | 9%     | 17%    | 19%    |
| Itália                         | 16%                   | 23%    | 10%    | 13%    | 19%    | 20%    |
| Newnet (EUA)                   | 14%                   | 36%    | 24%    | 15%    | 1%     | 24%    |
| NFSnet (EUA)                   | 1%                    | 6%     | 11%    | 12%    | 11%    | 4%     |
| vBNS (EUA)                     | 16%                   | 32%    | 19%    | 18%    | 17%    | 23%    |
| Arpanet (EUA)                  | 2%                    | 15%    | 1%     | 1%     | 5%     | 9%     |
| Korotky (EUA)                  | 9%                    | 29%    | 16%    | 13%    | 39%    | 41%    |

Tabela 5.37 Erro associado a média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e aproximação (3.14) para  $\langle k \rangle$ .

|                          | $\langle P^k \rangle$      |        |        |        |        |        |
|--------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>REDE</b>              | $\langle k \rangle$ (3.20) |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$      | Exacto                     | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| Portugal                 | 4%                         | 24%    | 11%    | 5%     | 6%     | 15%    |
| European optical network | 10%                        | 18%    | 5%     | 6%     | 15%    | 17%    |
| Itália                   | 10%                        | 18%    | 4%     | 7%     | 13%    | 14%    |
| Newnet (EUA)             | 14%                        | 35%    | 24%    | 15%    | 1%     | 23%    |
| NFSnet (EUA)             | 8%                         | 1%     | 19%    | 20%    | 19%    | 12%    |
| vBNS (EUA)               | 9%                         | 26%    | 12%    | 11%    | 10%    | 16%    |
| Arpanet (EUA)            | 2%                         | 13%    | 3%     | 5%     | 1%     | 6%     |
| Korotky (EUA)            | 14%                        | 33%    | 21%    | 18%    | 43%    | 44%    |

Tabela 5.38 Erro associado a média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e aproximação (3.20) para  $\langle k \rangle$ .

Verificamos assim que o melhor erro médio, ver tabela 5.30, é mais um vez obtido através da aproximação (2.28) para  $\langle h \rangle$  e que as duas aproximações para  $\langle k \rangle$  são igualmente boas. Este erro médio é de 11%.

| $\langle P^k \rangle$ |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\langle k \rangle$   | exacto |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$   | exacto | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>Erro Médio</b>     |        | 16%    | 7%     | 4%     | 9%     | 11%    |
| $\langle P_k \rangle$ |        |        |        |        |        |        |
| $\langle k \rangle$   | (3.14) |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$   | exacto | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>Erro Médio</b>     | 10%    | 23%    | 12%    | 11%    | 15%    | 19%    |
| $\langle P_k \rangle$ |        |        |        |        |        |        |
| $\langle k \rangle$   | (3.20) |        |        |        |        |        |
| $\langle h \rangle$   | exacto | (2.26) | (2.27) | (2.28) | (2.32) | (2.37) |
| <b>Erro Médio</b>     | 9%     | 21%    | 12%    | 11%    | 14%    | 19%    |

Tabela 5.39 Erro médio da média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e as aproximações para  $\langle k \rangle$ .

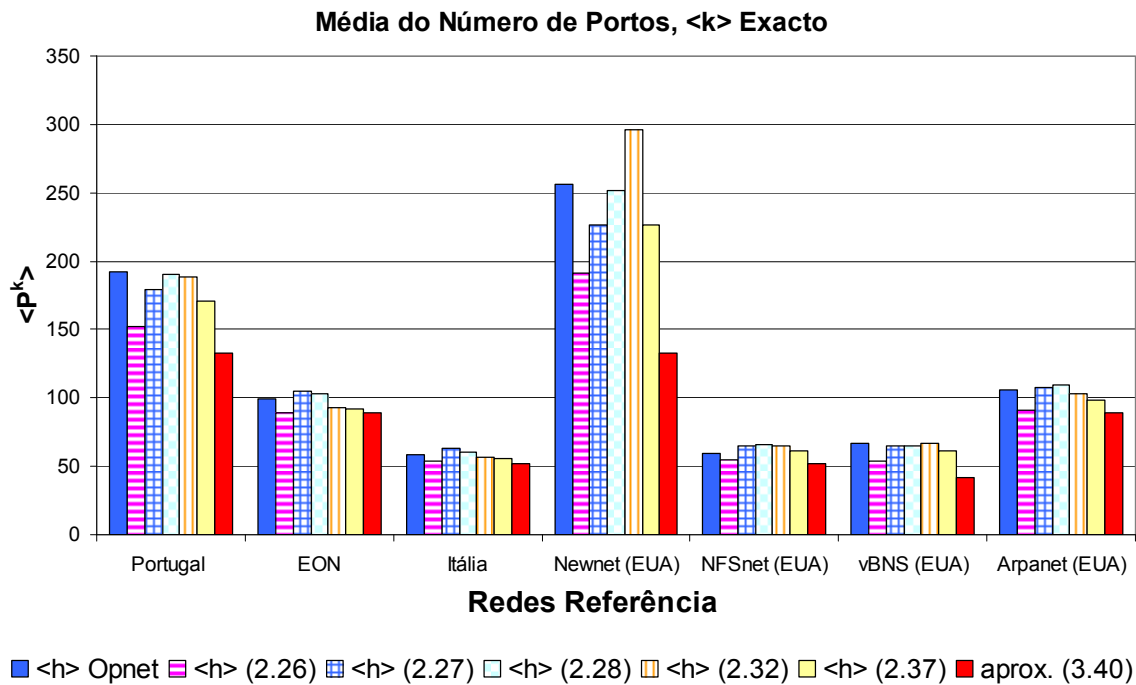


Fig. 5.15 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$  exacto.

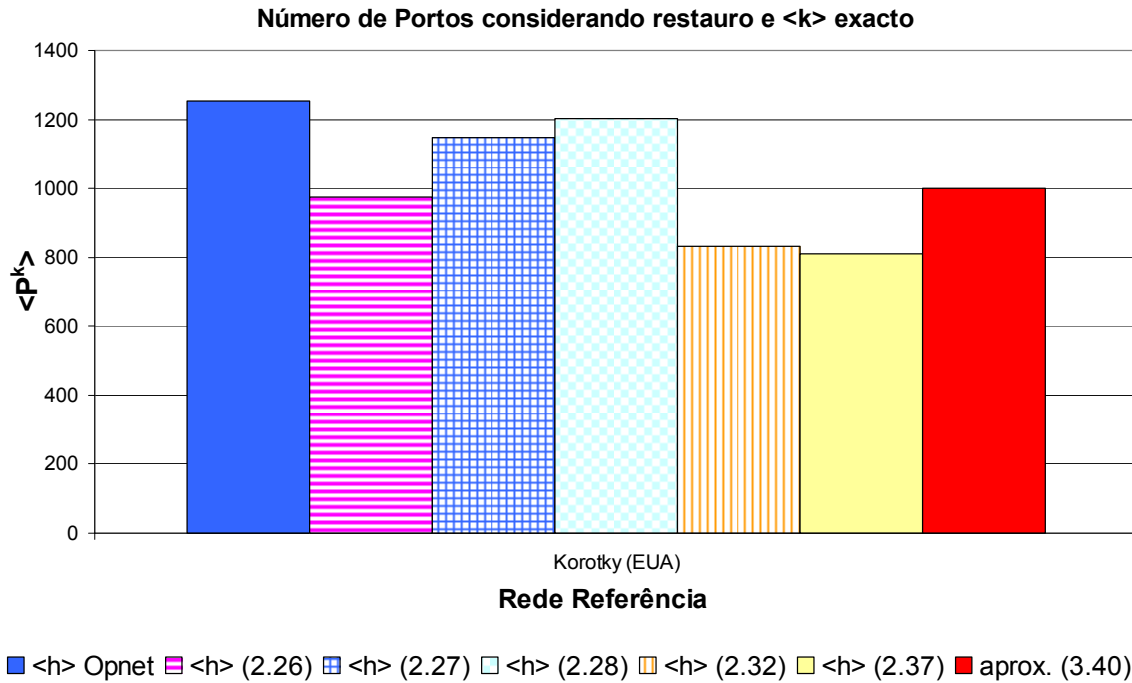


Fig. 5.16 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$  exacto, rede Korotky (EUA).

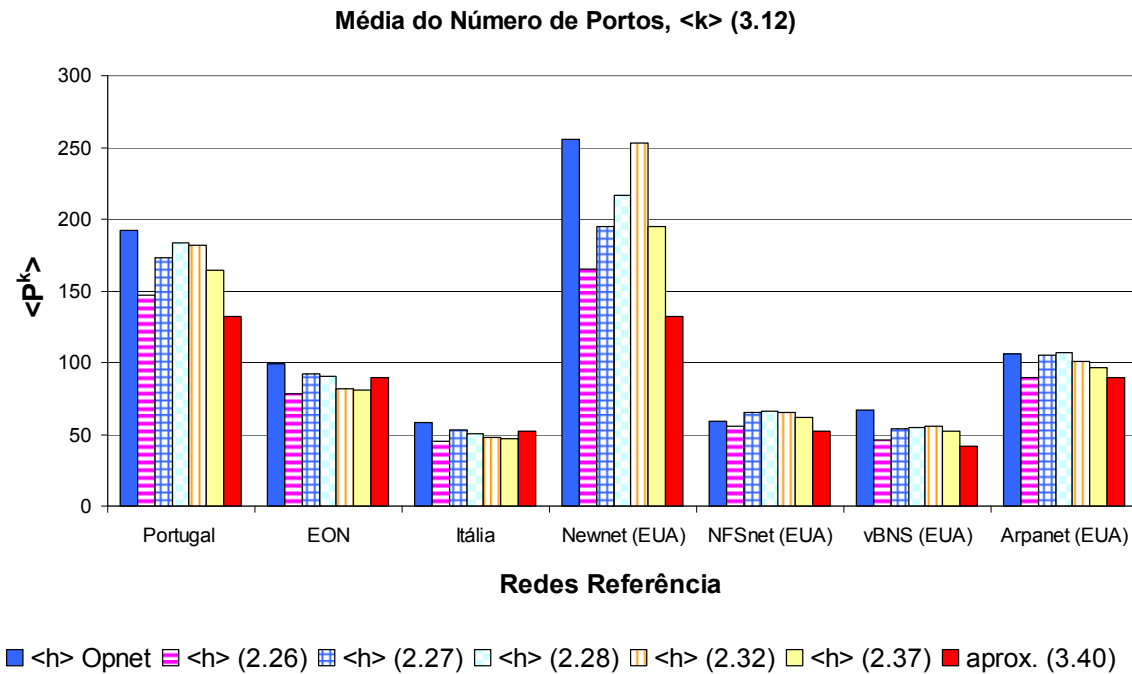


Fig. 5.17 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e a aproximação (3.14) para  $\langle k \rangle$ .

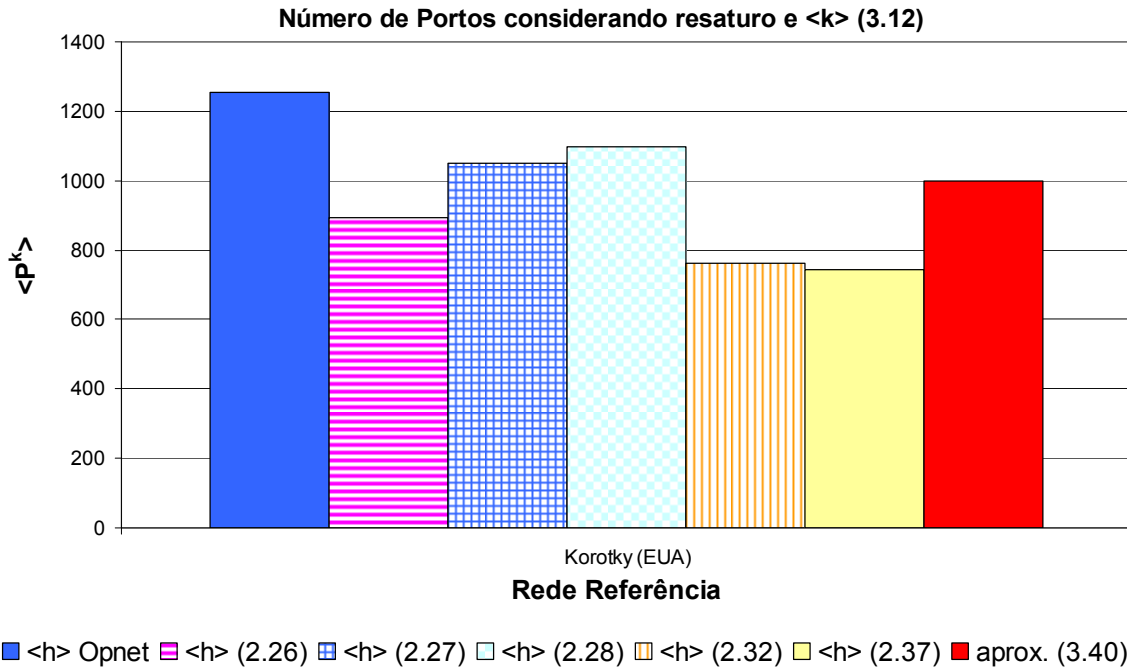


Fig. 5.18 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e a aproximação (3.14) para  $\langle k \rangle$ , rede Korotky (EUA).

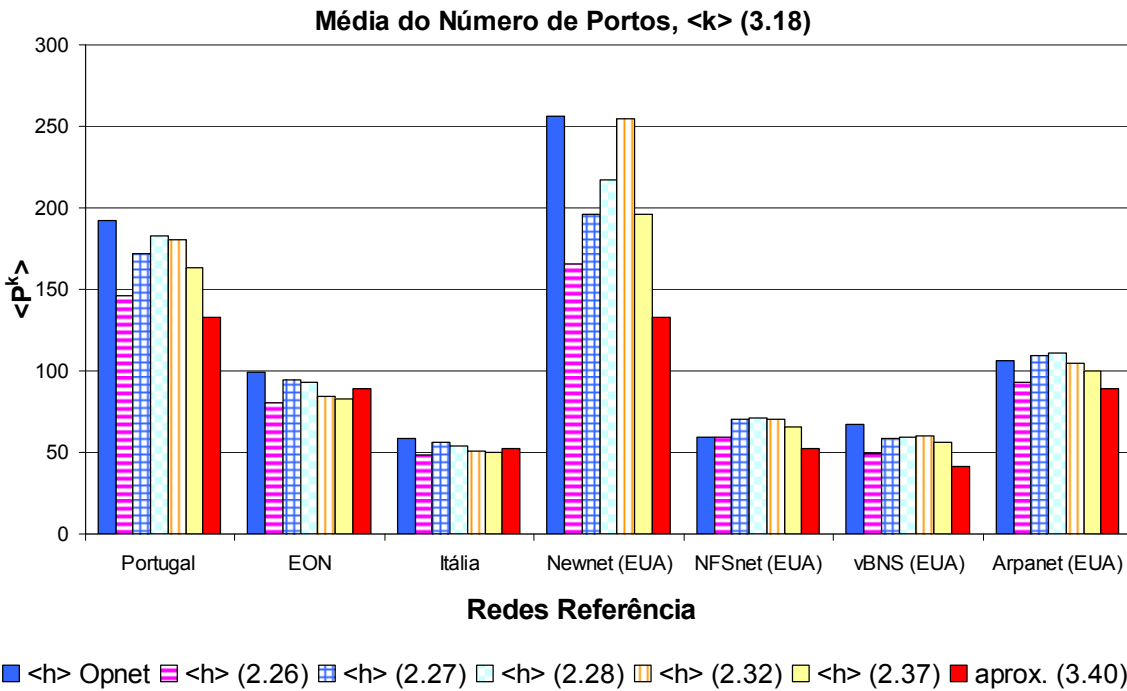


Fig. 5.19 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e a aproximação (3.20) para  $\langle k \rangle$ .



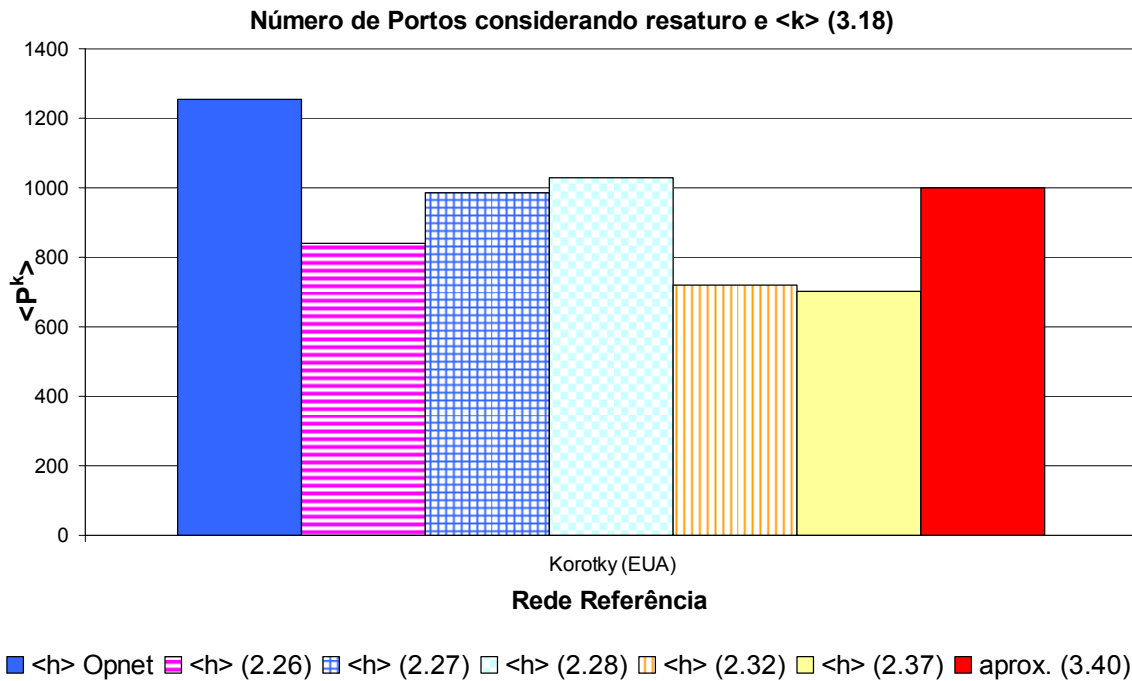


Fig. 5.20 Média do número de portos considerando as aproximações de  $\langle h \rangle$  e a aproximação (3.20) para  $\langle k \rangle$ , rede Korotky (EUA).

Após a análise efectuada nesta secção podemos concluir que a aproximação (2.28) é a que melhor aproxima a média do número de saltos por pedido nas oito redes referência. As duas aproximações estudadas para coeficiente de restauro são igualmente boas, mas pela simplicidade da expressão consideramos a expressão (3.14) melhor. Na secção seguinte iremos utilizar a aproximação (2.28) e (3.14) para aproximar o valor de  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$ , respectivamente.

## 5.2 Cálculo dos custos em 8 redes de referência

Nesta secção iremos calcular o custo total em 8 redes de referência, utilizando a separação já efectuada no capítulo anterior entre custos de transmissão e custos de gestão de largura de banda.

### 5.2.1 Custos de transmissão

O custo associado à transmissão pode ser calculado através da primeira aproximação (4.7).

$$C_{\text{TRANS}} = L \gamma_{B-s} \langle \beta \rangle \langle s \rangle \tag{4.7}$$

$$\gamma_{B-s} \approx 30 \text{ € / Gbps / km .}$$

Considerando a aproximação (4.5) para  $\langle s \rangle$  e considerando a aproximação para o cálculo do custo de transmissão (4.11) obtemos os resultados apresentados na tabela 5.40 e figuras 5.21 e 5.22. O valor usado para a área, A, que aparece na expressão (4.5) foi retirado da tabela 4.1. Notemos que foi considerado

$$\langle s \rangle \approx \frac{\sqrt{A}}{(\sqrt{N} - 1)} \tag{4.5}$$

$$C_{\text{TRANS}} \approx \gamma_{B-s} T \sqrt{A} \tag{4.11}$$

|                                | exacto             | (4.7)                            | (4.7)                           | (4.11)             |
|--------------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
|                                | OPNET              | $\langle s \rangle$ exacto (4.4) | $\langle s \rangle$ aprox.(4.5) |                    |
|                                | $C_{\text{TRANS}}$ | $C_{\text{TRANS}}$               | $C_{\text{TRANS}}$              | $C_{\text{TRANS}}$ |
| <b>REDE</b>                    |                    |                                  |                                 |                    |
| Portugal                       | 29.164.000 €       | 18.348.323 €                     | 18.057.136 €                    | 19.913.518 €       |
| European Optical Network (EON) | 34.116.808 €       | 24.434.817 €                     | 18.165.855 €                    | 26.690.216 €       |
| Itália                         | 11.358.105 €       | 3.678.473 €                      | 2.927.690 €                     | 4.271.578 €        |
| Newnet (EUA)                   | 45.252.229 €       | 54.082.437 €                     | 70.929.038 €                    | 68.620.810 €       |
| NFSnet (EUA)                   | 27.824.400 €       | 18.915.387 €                     | 15.017.391 €                    | 19.213.827 €       |
| vBNS (EUA)                     | 18.145.342 €       | 11.346.867 €                     | 13.624.251 €                    | 13.935.303 €       |
| Arpanet (EUA)                  | 32.521.514 €       | 31.883.831 €                     | 31.864.556 €                    | 40.116.781 €       |
| Korotky (EUA)                  | 630.039.385 €      | 765.599.135 €                    | 775.168.645 €                   | 1.045.147.720 €    |

Tabela 5.40 Custos de transmissão primeira aproximação, OPNET,  $\langle s \rangle$  exacto e  $\langle s \rangle$  aproximado.

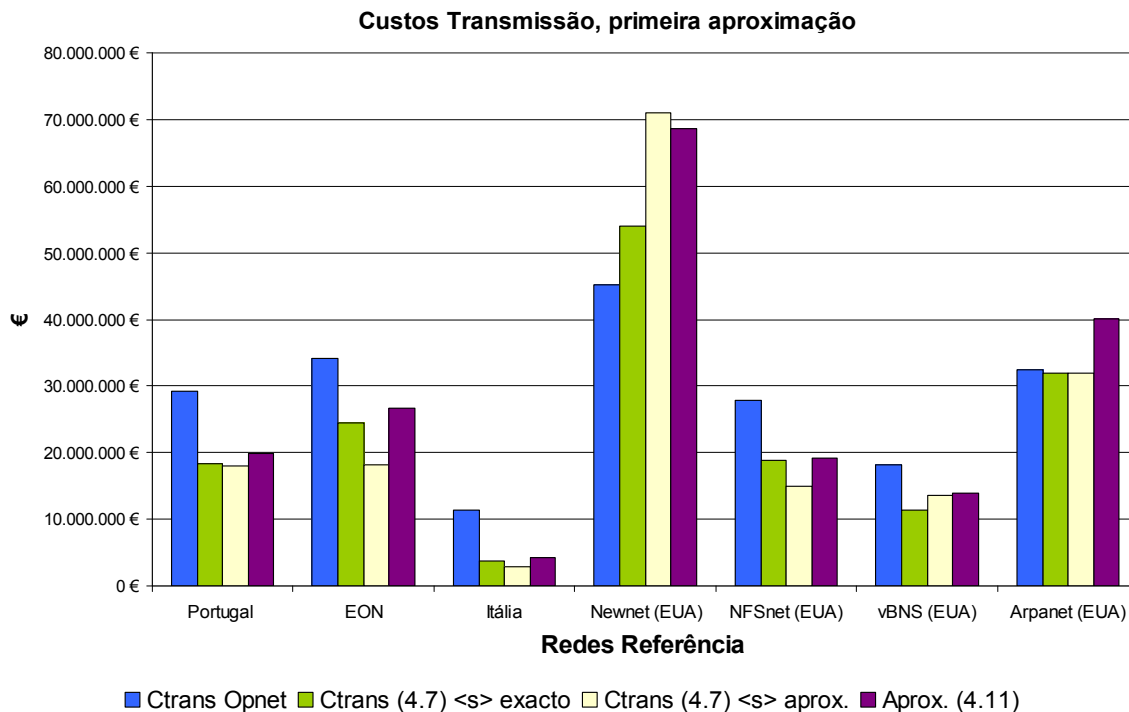


Fig. 5.21 Custos de transmissão primeira aproximação.

**Custos Transmissão, primeira aproximação**

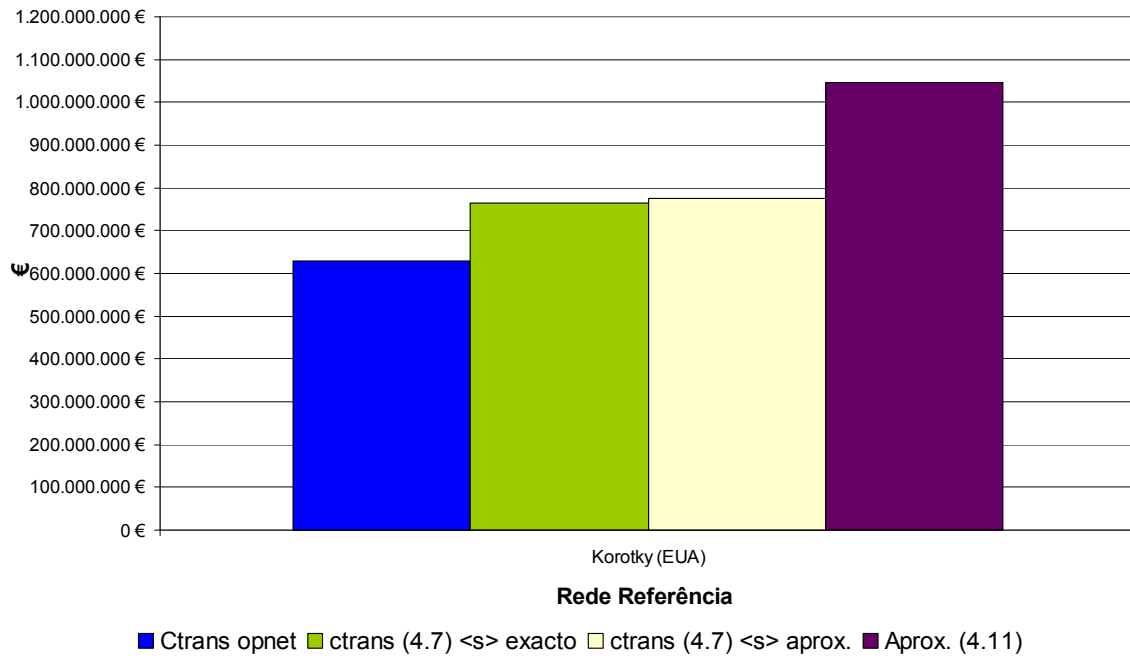


Fig. 5.22 Custos de transmissão primeira aproximação, rede Korotky (EUA).

Considerando o erro das diferentes aproximações, ver tabela 5.41, verifica-se que a aproximação para o comprimento médio das ligações é boa. Os valores obtidos por (4.7) e (4.11) são também muito próximos, o que indica que (4.11) é uma boa aproximação de (4.7).

Notemos que através da expressão (4.7) não é possível obter os valores para o custo de transmissão com exactidão elevada, erro médio 31%. Optimizando o valor de  $\gamma_{B-s}$  o melhor que conseguimos é reduzir o erro médio para 30%, o que indica que a aproximação (4.7) não é apropriada para o custo de transmissão

| REDE                           | $C_{TRANS}$     |                           |                          |        |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|--------|
|                                | exacto<br>OPNET | (4.7)<br><s> exacto (4.4) | (4.7)<br><s> aprox.(4.5) | (4.11) |
| Portugal                       |                 | 37%                       | 38%                      | 32%    |
| European Optical Network (EON) |                 | 28%                       | 47%                      | 22%    |
| Itália                         |                 | 68%                       | 74%                      | 62%    |
| Newnet (EUA)                   |                 | 20%                       | 57%                      | 52%    |
| NFSnet (EUA)                   |                 | 32%                       | 46%                      | 31%    |
| vBNS (EUA)                     |                 | 37%                       | 25%                      | 23%    |
| Arpanet (EUA)                  |                 | 2%                        | 2%                       | 23%    |
| Korotky (EUA)                  |                 | 22%                       | 23%                      | 66%    |

Tabela 5.41 Erro custos de transmissão primeira aproximação

| $C_{trans}$ |        |                  |                 |        |
|-------------|--------|------------------|-----------------|--------|
|             | exacto | (4.7)            | (4.7)           | (4.11) |
|             | OPNET  | <s> exacto (4.4) | <s> aprox.(4.5) |        |
| Erro Médio  |        | 31%              | 39%             | 39%    |

Tabela 5.42 Erro médio custos de transmissão primeira aproximação

O custo associado à transmissão nas redes referência pode também ser calculado através da segunda aproximação (4.16), ver tabela 5.43 e figuras 5.23 e 5.24. Notemos que através de (4.16) obtivemos três resultados diferentes, estes devem-se ao facto de considerarmos as aproximações para <s> e <W<sup>k</sup>>, isto é considerando os valores exactos para <s> e <W<sup>k</sup>>, considerando o valor exacto para <s> e aproximado para <W<sup>k</sup>> e considerando os valores aproximados para <s> e <W<sup>k</sup>>.

$$C_{TRANS} \approx L \left( \gamma_{t0} + \gamma_{t1} \langle W^k \rangle + \gamma_{t4} \langle s \rangle + \gamma_{t5} \left( \frac{\langle s \rangle}{Span} - 1 \right) \right) \quad (4.16)$$

| $C_{trans} (\text{€})$         |           |                                   |  |  |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------------|--|--|
|                                | exacto    | (4.16)                            | (4.16)                                 | (4.16)                                 |
|                                | OPNET     | <s>, <W <sup>k</sup> ><br>exactos | <s> exacto<br><W <sup>k</sup> > aprox. | <s> aprox.<br><W <sup>k</sup> > aprox. |
| <b>REDE</b>                    |           |                                   |  |  |
| Portugal                       | 29164000  | 29101858                          | 27997116                               | 27894818                               |
| European Optical Network (EON) | 34116808  | 34043423                          | 33194356                               | 26775444                               |
| Itália                         | 11358105  | 11298063                          | 10744674                               | 9243688                                |
| Newnet (EUA)                   | 45252229  | 45188799                          | 40038229                               | 44509156                               |
| NFSnet (EUA)                   | 27824400  | 27779452                          | 28274507                               | 23325926                               |
| vBNS (EUA)                     | 18145342  | 18113503                          | 17372985                               | 20243380                               |
| Arpanet (EUA)                  | 32521514  | 32485205                          | 32616663                               | 32602787                               |
| Korotky (EUA)                  | 630039385 | 629103356                         | 550364014                              | 550947828                              |

Tabela 5.43 Custos de transmissão segunda aproximação

Notemos que para aproximar <W<sup>k</sup>> utilizamos as aproximações (2.28) e (3.14) para <h> e <k> respectivamente.

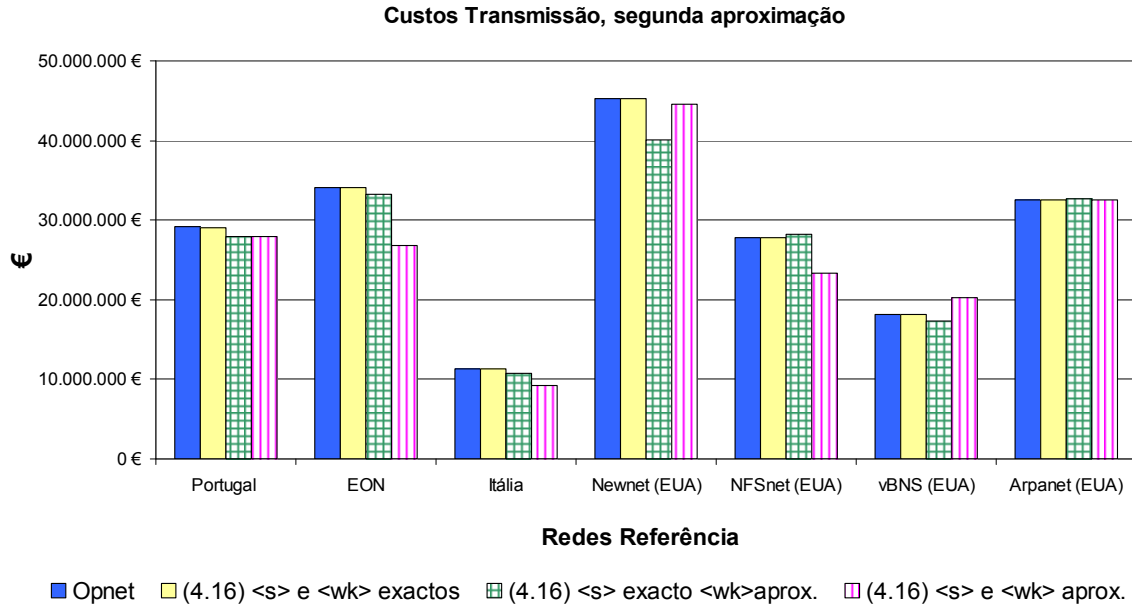


Fig. 5.23 Custos de transmissão segunda aproximação

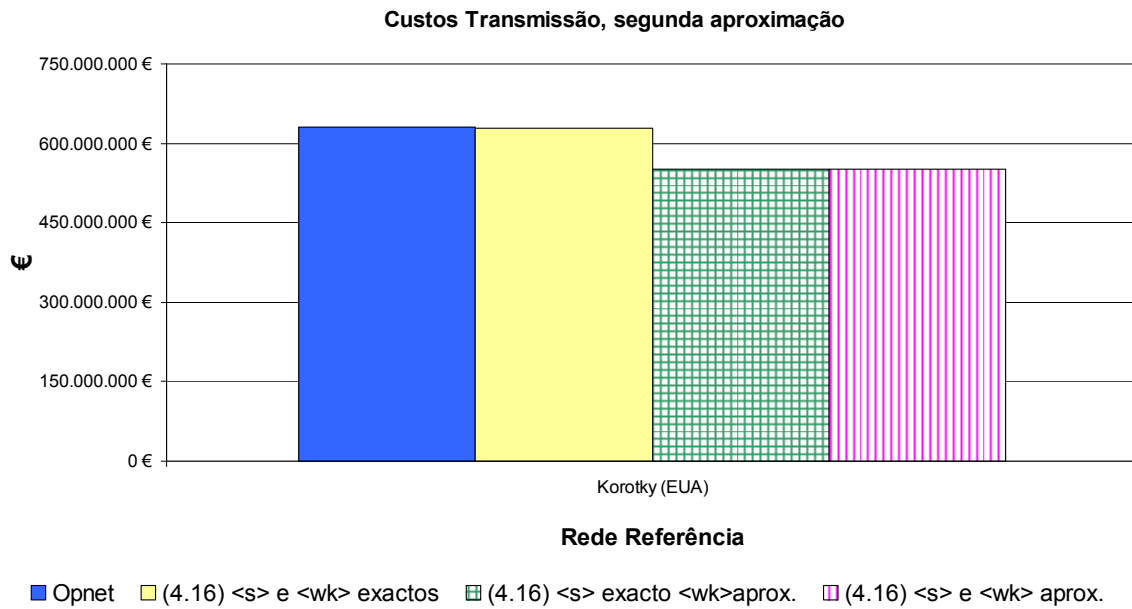


Fig. 5.24 Custos de transmissão segunda aproximação

Notemos que estamos a considerar,

$$\gamma_{t0} = 30000\text{€}, \quad \gamma_{t1} = 5000 \text{ €/Gbps}, \quad \gamma_{t4} = 800 \text{ €/km} \quad \text{e} \quad \gamma_{t5} = 4000 \text{ €}.$$

É apresentado na tabela 5.44 o erro associado as expressões (4.16) assim como na tabela 5.45 o erro médio.

|                                | $C_{\text{TRANS}}$ |   |  |  |
|--------------------------------|--------------------|---|--|--|
|                                | exacto             | (4.16)  | (4.16)   | (4.16)   |
|                                | OPNET              | $\langle s \rangle, \langle W^k \rangle$<br>exactos | $\langle s \rangle$ exacto<br>$\langle W^k \rangle$ aprox. | $\langle s \rangle$ aprox.<br>$\langle W^k \rangle$ aprox. |
| <b>REDE</b>                    |                    |   |  |  |
| Portugal                       |                    | 0%  | 4%   | 4%   |
| European Optical Network (EON) |                    | 0%  | 3%   | 22%  |
| Itália                         |                    | 0%  | 5%   | 19%  |
| Newnet (EUA)                   |                    | 0%  | 12%  | 2%   |
| NFSnet (EUA)                   |                    | 0%  | 2%   | 16%  |
| vBNS (EUA)                     |                    | 0%  | 4%   | 12%  |
| Arpanet (EUA)                  |                    | 0%  | 0%   | 0%   |
| Korotky (EUA)                  |                    | 0%  | 13%  | 13%  |

Tabela 5.44 Erro associado aos custos de transmissão segunda aproximação

|             | $C_{\text{TRANS}}$ |   |  |  |
|-------------|--------------------|---|--|--|
|             | exacto             | (4.16)  | (4.16)   | (4.16)   |
|             | OPNET              | $\langle s \rangle, \langle W^k \rangle$<br>exactos | $\langle s \rangle$ exacto<br>$\langle W^k \rangle$ aprox. | $\langle s \rangle$ aprox.<br>$\langle W^k \rangle$ aprox. |
| <b>REDE</b> |                    |   |  |  |
| Erro Médio  |                    | 0%  | 5%   | 11%  |

Tabela 5.45 Erro médio dos custos de transmissão segunda aproximação

Verificamos que a expressão (4.16) é exacta quando utilizamos os valores exactos para  $\langle s \rangle$  e para  $\langle w^k \rangle$ . Quando conhecemos  $\langle s \rangle$  e utilizamos a aproximação de  $\langle w^k \rangle$  tendo por base as aproximações (2.38) e (3.14) para  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$  respectivamente obtemos um resultando bom, isto é um erro de 5%. Se necessário recorrer as aproximações de  $\langle s \rangle$  e de  $\langle w^k \rangle$  obtemos um erro médio de 11%. Nas figuras 5.25 e 5.26 é apresentado os resultados obtidos para os dois modelos bem como para as respectivas aproximações.

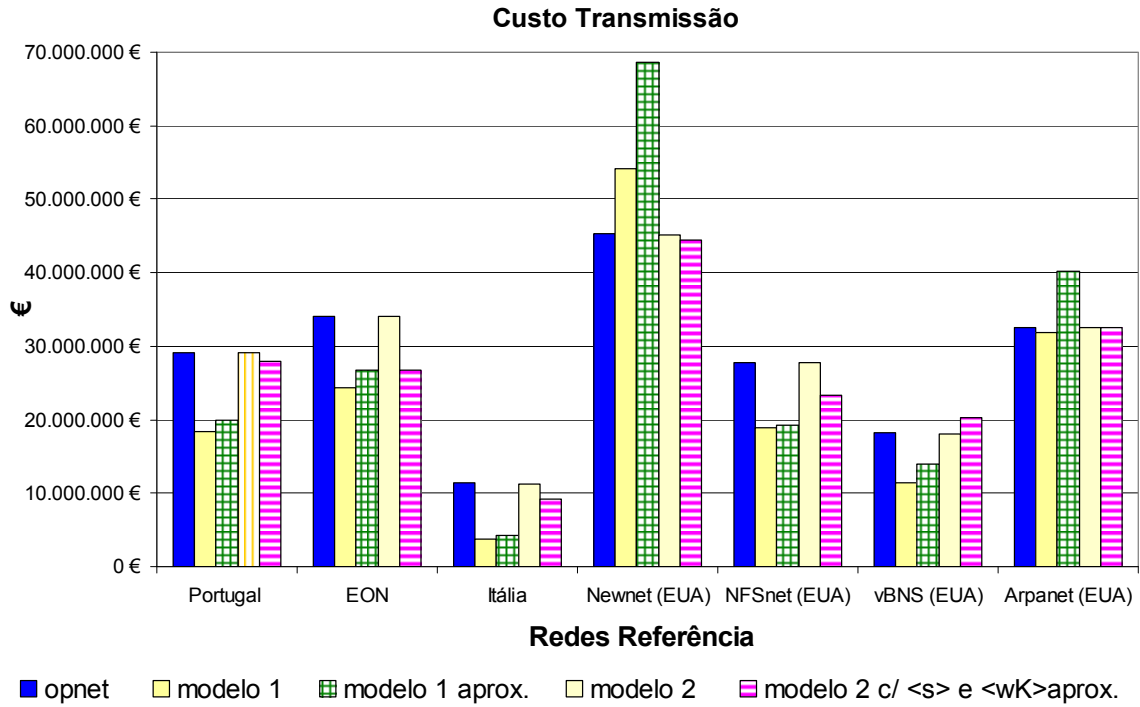


Fig. 5.25 Custos de transmissão dois modelos

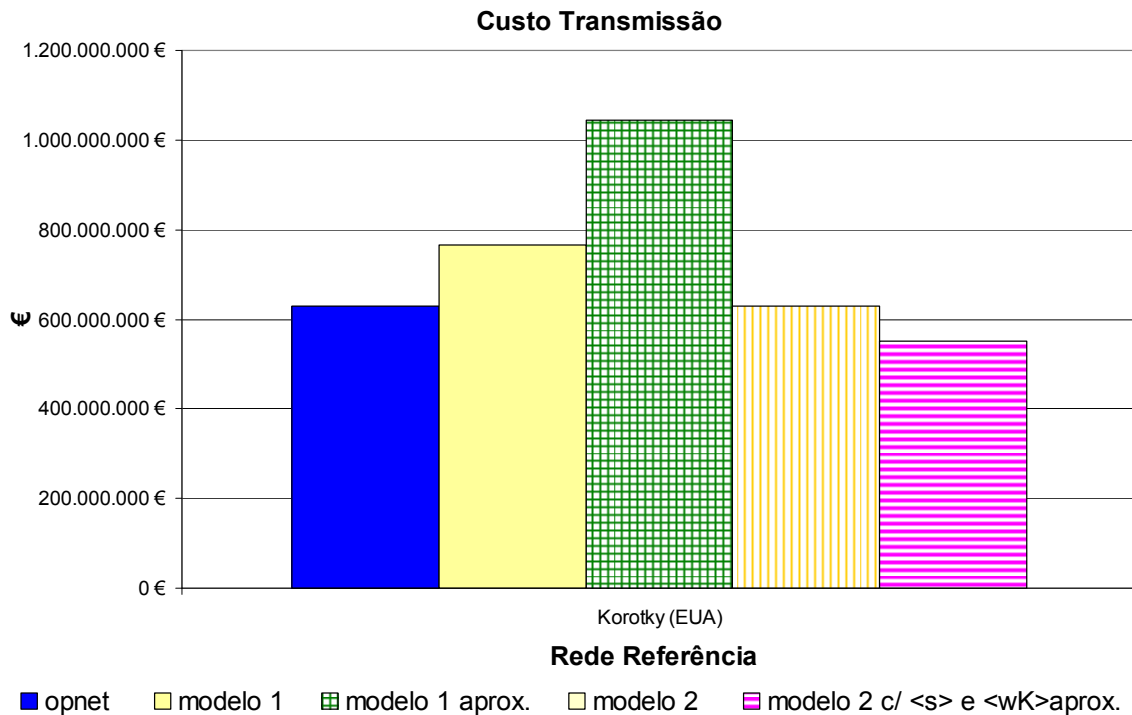


Fig. 5.26 Custos de transmissão dois modelos, rede Korotky (EUA)

### 5.2.2 Custos de gestão de largura de banda

O custo associado à gestão de largura de banda exclusivamente eléctrica nas redes referência pode ser calculado através da primeira aproximação (4.25) ou através da segunda aproximação (4.30), ver tabela 5.46, figura 5.27.

$$C_{EXC} = 2\gamma_{ep} T(1 + (1 + \langle k \rangle)(h)) \tag{4.25}$$

$$C_{EXC} = \gamma_{e0} N + \gamma_{e1} 2T(1 + (1 + \langle k \rangle)(h)) \tag{4.30}$$

| Cexc                           |               |               |
|--------------------------------|---------------|---------------|
|                                | (4.25)        | (4.30)        |
| <b>REDE</b>                    |               |               |
| Portugal                       | 12.648.776 €  | 6.547.395 €   |
| European Optical Network (EON) | 5.130.289 €   | 2.657.466 €   |
| Itália                         | 2.103.613 €   | 1.160.145 €   |
| Newnet (EUA)                   | 16.282.919 €  | 8.531.045 €   |
| NFSnet (EUA)                   | 2.278.829 €   | 1.165.050 €   |
| vBNS (EUA)                     | 1.952.011 €   | 1.121.561 €   |
| Arpanet (EUA)                  | 5.427.152 €   | 2.833.260 €   |
| Korotky (EUA)                  | 298.810.420 € | 157.117.049 € |

Tabela 5.46 Custos de gestão largura de banda exclusivamente eléctrica

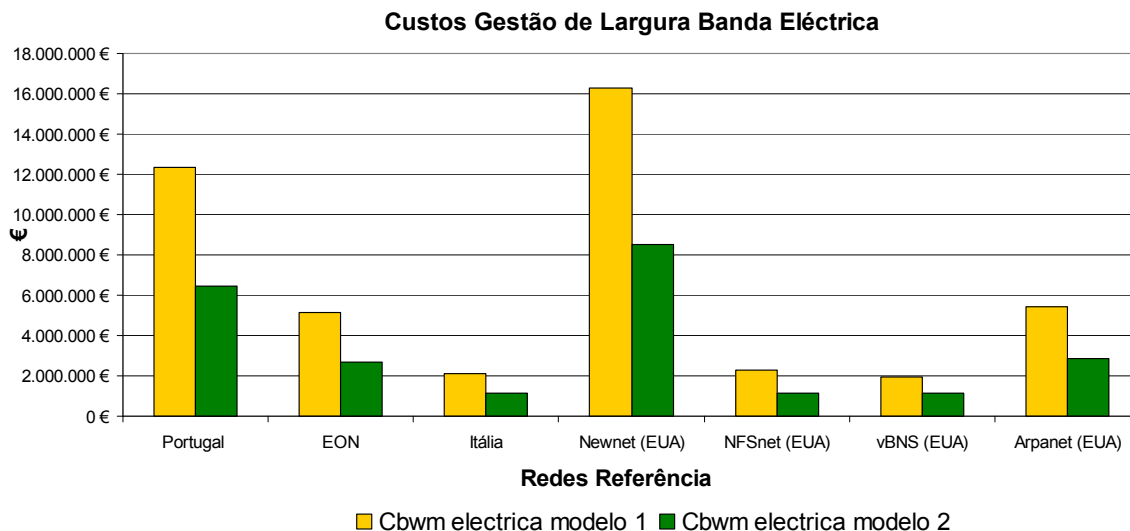


Fig. 5.27 Custos de gestão de largura de banda exclusivamente eléctrica – duas aproximações



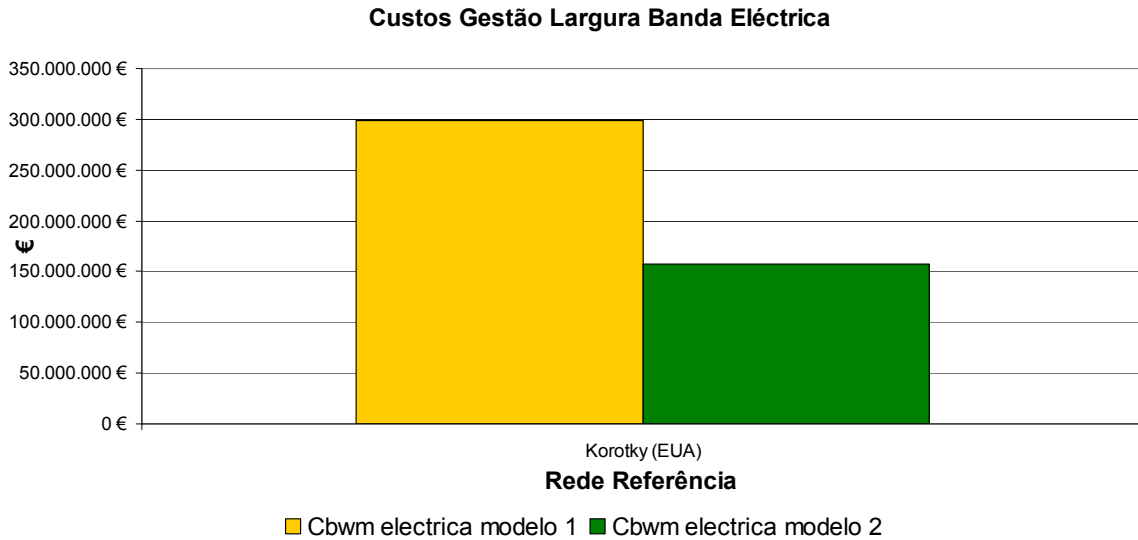


Fig. 5.28 Custos de gestão de largura de banda exclusivamente eléctrica – duas aproximações

Observamos alguma discrepância entre os dois modelos. Através do OPNET não foi possível determinar o valor exacto para o custo de transmissão usando nós exclusivamente eléctricos, isto deve-se ao facto da ferramenta OPNET considerar para os nós exclusivamente eléctricos a hierarquia SDH com protecção e no nosso trabalho assumimos sempre restauro. Assim não foi possível determinar o erro das duas aproximações.

Considerando a gestão de largura de banda eléctrica e óptica o custo associado é determinado através de (4.41) ou através de (4.48). Os resultados obtidos, considerando  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$  exactos são apresentados na tabela 5.47, figuras 5.29 e 5.30.

$$C_{BWM_{eo}} = C_{EXC} + C_{OXC} = 4\gamma_{ep}T + 2\gamma_{op}D[1 + (1 + \langle k \rangle)\langle h \rangle] \quad (4.41)$$

$$C_{BWM_{eo}} = C_{EXC} + C_{OXC} = \gamma_{e0}N + 4\gamma_{e1}T + \gamma_{o0}N + 2\gamma_{o1}D[1 + (1 + \langle k \rangle)\langle h \rangle] \quad (4.48)$$

Notemos que foram considerados os seguintes valores:

$$\gamma_{ep} \approx 1000\text{€} / \text{Gbps}, \quad \gamma_{op} \approx 2500\text{€} / \text{port},$$

$$\gamma_{e0} = 10000\text{€} \quad \text{e} \quad \gamma_{e1} = 500 \text{€} / \text{Gbps}.$$

$$\gamma_{o0} = 20000\text{€} \quad \text{e} \quad \gamma_{o1} = 2500 \text{€} / \text{Gbps}.$$

|                                | $C_{BWM}$   |                      |                      |
|--------------------------------|-------------|----------------------|----------------------|
|                                | exacto      | (4.41)               | (4.48)               |
|                                | OPNET       | <h> e <k><br>exactos | <h> e <k><br>exactos |
| <b>REDE</b>                    |             |                      |                      |
| Portugal                       | 14890000 €  | 15719749 €           | 14882341 €           |
| European Optical Network (EON) | 6505000 €   | 6846195 €            | 6500633 €            |
| Itália                         | 2925000 €   | 2955731 €            | 2922857 €            |
| Newnet (EUA)                   | 19045000 €  | 19874734 €           | 19037326 €           |
| NFSnet (EUA)                   | 2940000 €   | 2970751 €            | 2937876 €            |
| vBNS (EUA)                     | 2705000 €   | 2671923 €            | 2703465 €            |
| Arpanet (EUA)                  | 6835000 €   | 7191118 €            | 6845556 €            |
| Korotky (EUA)                  | 341475000 € | 362993670 €          | 341359302 €          |

Tabela 5.47 Custos de gestão largura de banda eléctrica óptica, &lt;h&gt; e &lt;k&gt; exactos

Os resultados obtidos, considerando as aproximações (2.28) e (3.14) respectivamente para <h> e <k> são apresentados na tabela 5.48, figuras 5.29 e 5.30.

|                                | $C_{BWM}$     |                     |                     |
|--------------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
|                                | exacto        | (4.41)              | (4.48)              |
|                                | OPNET         | <h> e <k><br>aprox. | <h> e <k><br>aprox. |
| <b>REDE</b>                    |               |                     |                     |
| Portugal                       | 14.890.000 €  | 15.167.377 €        | 14.329.969 €        |
| European Optical Network (EON) | 6.505.000 €   | 6.421.661 €         | 6.076.099 €         |
| Itália                         | 2.925.000 €   | 2.679.036 €         | 2.646.162 €         |
| Newnet (EUA)                   | 19.045.000 €  | 17.299.449 €        | 16.462.041 €        |
| NFSnet (EUA)                   | 2.940.000 €   | 3.218.278 €         | 3.185.404 €         |
| vBNS (EUA)                     | 2.705.000 €   | 2.301.664 €         | 2.333.206 €         |
| Arpanet (EUA)                  | 6.835.000 €   | 7.256.847 €         | 6.911.285 €         |
| Korotky (EUA)                  | 341.475.000 € | 323.623.999 €       | 301.989.631 €       |

Tabela 5.48 Custos de gestão largura de banda eléctrica óptica, &lt;h&gt; e &lt;k&gt; exactos

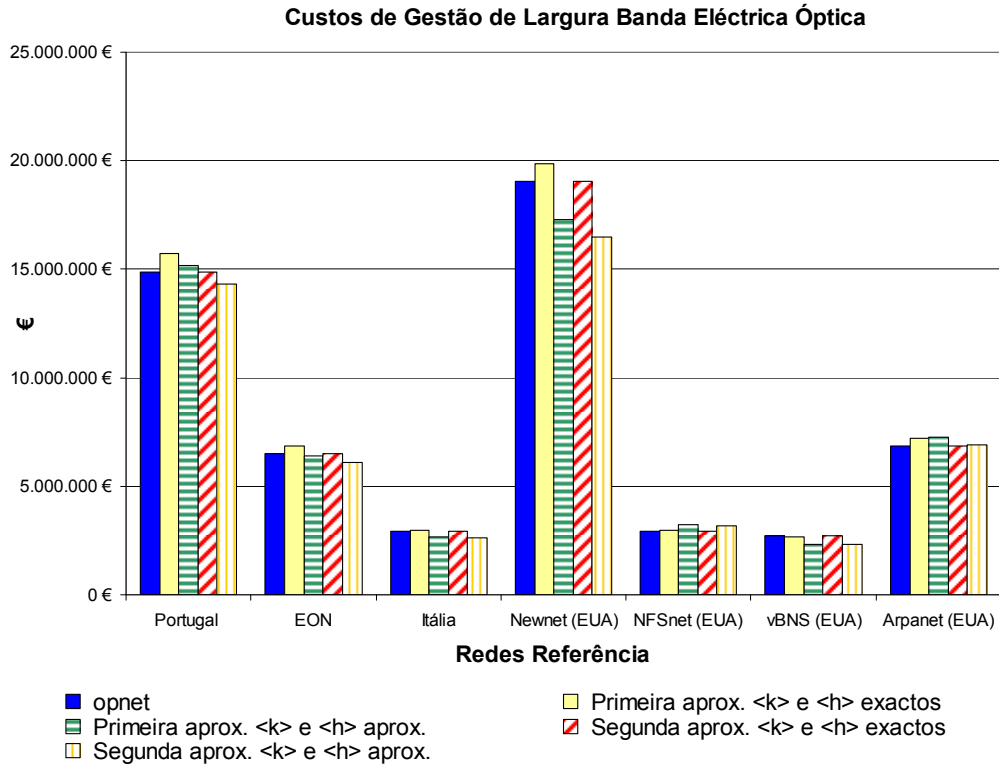


Fig. 5.29 Custos de gestão de largura de banda eléctrica e óptica – duas aproximações

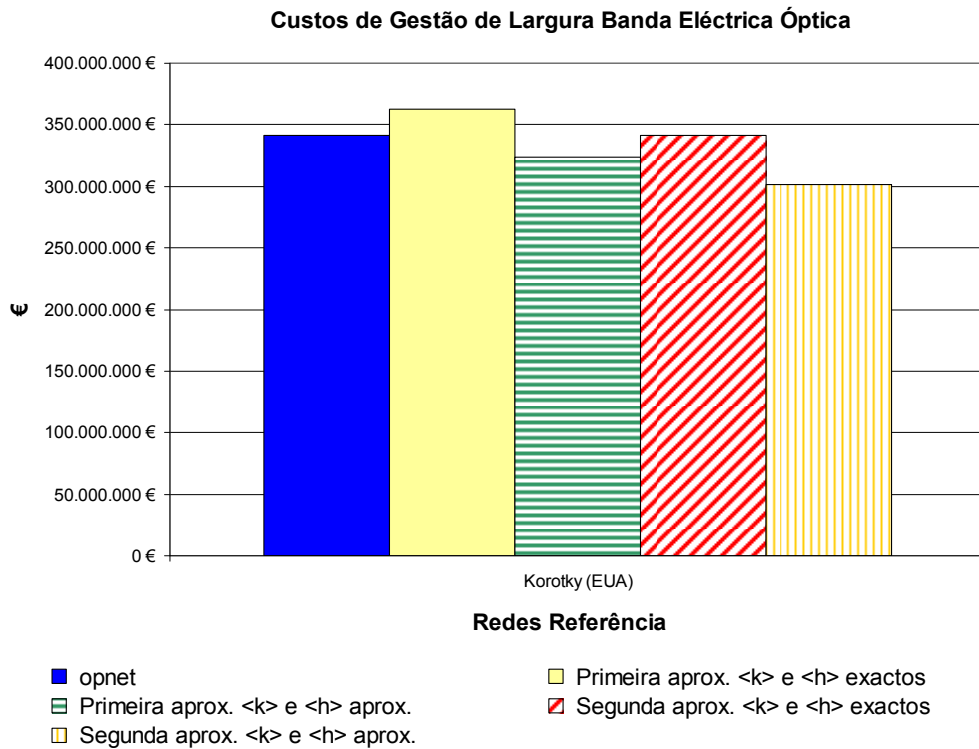


Fig. 5.30 Custos de gestão de largura de banda eléctrica e óptica – duas aproximações

O erro associado às aproximações é apresentado na tabela 5.49 e o erro médio é apresentado na tabela 5.50.

|                                | exacto | (4.41)               | (4.48)               | (4.41)              | (4.48)              |
|--------------------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
|                                | OPNET  | <h> e <k><br>exactos | <h> e <k><br>exactos | <h> e <k><br>aprox. | <h> e <k><br>aprox. |
| <b>REDE</b>                    |        |                      |                      |                     |                     |
| Portugal                       |        | 6%                   | 0%                   | 2%                  | 4%                  |
| European Optical Network (EON) |        | 5%                   | 0%                   | 1%                  | 7%                  |
| Itália                         |        | 1%                   | 0%                   | 8%                  | 10%                 |
| Newnet (EUA)                   |        | 4%                   | 0%                   | 9%                  | 14%                 |
| NFSnet (EUA)                   |        | 1%                   | 0%                   | 9%                  | 8%                  |
| vBNS (EUA)                     |        | 1%                   | 0%                   | 15%                 | 14%                 |
| Arpanet (EUA)                  |        | 5%                   | 0%                   | 6%                  | 1%                  |
| Korotky (EUA)                  |        | 6%                   | 0%                   | 5%                  | 12%                 |

Tabela 5.49 Erro associado aos custos de gestão largura de banda eléctrica óptica

|            | exacto | (4.41)               | (4.48)               | (4.41)              | (4.48)              |
|------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
|            | OPNET  | <h> e <k><br>exactos | <h> e <k><br>exactos | <h> e <k><br>aprox. | <h> e <k><br>aprox. |
|            |        |                      |                      | €                   | €                   |
| Erro Médio |        | 4%                   | 0%                   | 7%                  | 9%                  |

Tabela 5.50 Erro médio dos custos de gestão largura de banda eléctrica óptica

Verificamos que os dois modelos são boas aproximações para o custo de gestão de largura de banda eléctrica óptica, a expressão (4.41) é exacta quando consideramos <h> e <k> exactos. Verifica-se, ainda, que embora a expressão (4.48) seja uma aproximação o erro resultante quando <h> e <k> são aproximados é maior em (4.48), o que revela uma maior sensibilidade ao erro destes parâmetros na expressão (4.48).

### 5.2.3 Custo total

O custo total é obtido somando o custo de transmissão com o custo de gestão de largura de banda. Considerando os melhores modelos, isto é (4.16) para o custo de transmissão e (4.48) para o de gestão de largura de banda obtemos, os resultados apresentados na tabela 5.51 e figura 5.31 e figura 5.32. Notemos que é apresentado também o resultado considerando as melhores aproximações para <h>, <k> e <s>.

| Custo Total (€)                |               |  |  |  |
|--------------------------------|---------------|--|--|--|
| <h>                            | exacto        | exacto                                     | aproximado                                 | aproximado                                 |
| <k>                            | exacto        | exacto                                     | aproximado                                 | aproximado                                 |
| <s>                            | exacto        | exacto                                     | exacto                                     | aproximado                                 |
|                                | OPNET         | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ |
| REDE                           |               |  |  |  |
| Portugal                       | 44.054.000 €  | 43.984.199 €                               | 42.327.085 €                               | 42.224.788 €                               |
| European Optical Network (EON) | 40.621.808 €  | 40.544.056 €                               | 39.270.455 €                               | 32.851.544 €                               |
| Itália                         | 14.283.105 €  | 14.220.919 €                               | 13.390.835 €                               | 11.889.850 €                               |
| Newnet (EUA)                   | 64.297.229 €  | 64.226.125 €                               | 56.500.270 €                               | 60.971.197 €                               |
| NFSnet (EUA)                   | 30.764.400 €  | 30.717.329 €                               | 31.459.911 €                               | 26.511.330 €                               |
| vBNS (EUA)                     | 20.850.342 €  | 20.816.968 €                               | 19.706.191 €                               | 22.576.585 €                               |
| Arpanet (EUA)                  | 39.356.514 €  | 39.330.761 €                               | 39.527.948 €                               | 39.514.073 €                               |
| Korotky (EUA)                  | 971.514.385 € | 970.462.658 €                              | 852.353.645 €                              | 852.937.459 €                              |

Tabela 5.51 Custo total redes referência

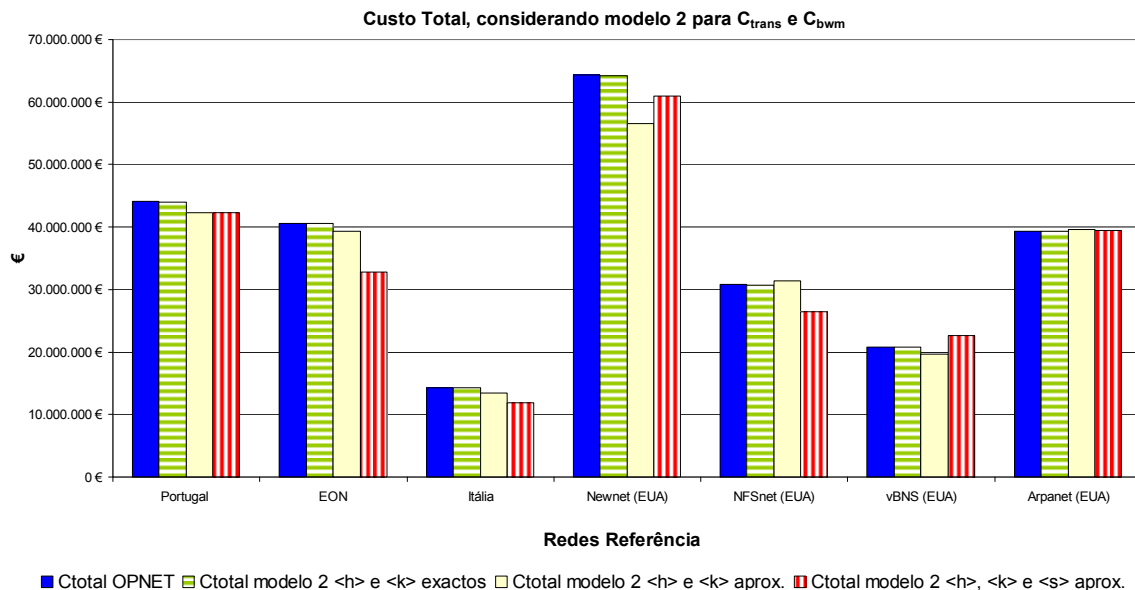


Fig. 5.31 Custo total redes referência

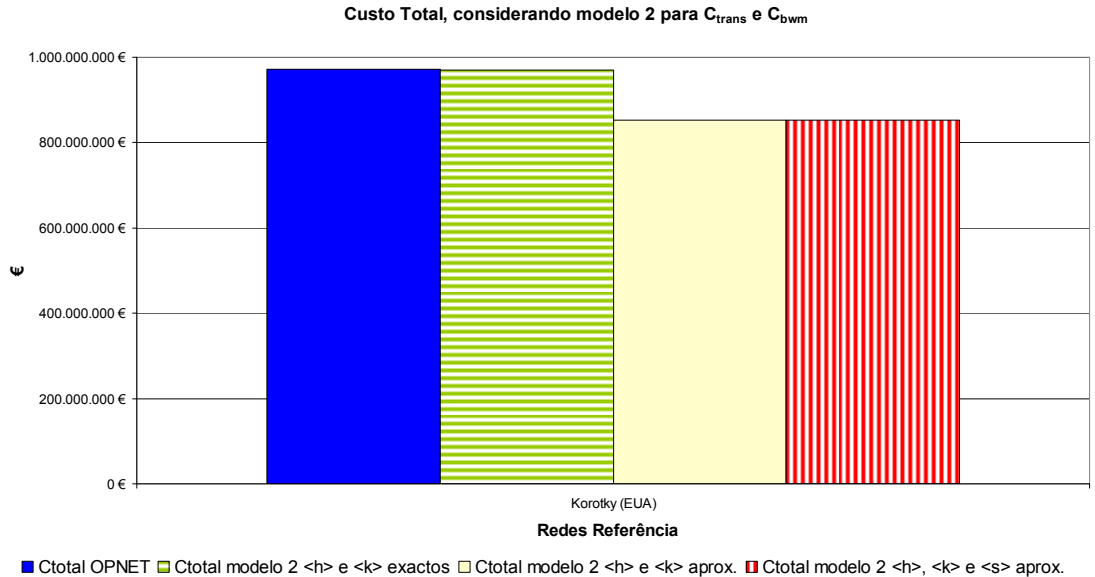


Fig. 5.32 Custo total redes referência, rede Korotky (EUA).

Apresentamos na tabela 5.52 o erro associado as aproximações consideradas.

| <b>Custo Total</b>             |        |  |  |  |
|--------------------------------|--------|--|--|--|
| <b>&lt;h&gt;</b>               | exacto | exacto                                     | aproximado                                 | aproximado                                 |
| <b>&lt;k&gt;</b>               | exacto | exacto                                     | aproximado                                 | aproximado                                 |
| <b>&lt;s&gt;</b>               | exacto | exacto                                     | exacto                                     | aproximado                                 |
|                                | OPNET  | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ |
| <b>REDE</b>                    |        |  |  |  |
| Portugal                       |        | 0%   | 4%   | 4%   |
| European Optical Network (EON) |        | 0%   | 3%   | 19%  |
| Itália                         |        | 0%   | 6%   | 17%  |
| Newnet (EUA)                   |        | 0%   | 12%  | 5%   |
| NFSnet (EUA)                   |        | 0%   | 2%   | 14%  |
| vBNS (EUA)                     |        | 0%   | 5%   | 8%   |
| Arpanet (EUA)                  |        | 0%   | 0%   | 0%   |
| Korotky (EUA)                  |        | 0%   | 12%  | 12%  |

Tabela 5.52 Erro custo total redes referência

O erro médio é apresentado na tabela 5.53.

| <b>Custo Total</b> |        |  |  |  |
|--------------------|--------|--|--|--|
| <b>&lt;h&gt;</b>   | exacto | exacto                                     | aproximado                                 | aproximado                                 |
| <b>&lt;k&gt;</b>   | exacto | exacto                                     | aproximado                                 | aproximado                                 |
| <b>&lt;s&gt;</b>   | exacto | exacto                                     | exacto                                     | aproximado                                 |
|                    | OPNET  | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ | modelo 2 $C_{TRANS}$<br>modelo 2 $C_{BWM}$ |
| <b>Erro Médio</b>  |        | 0%   | 6%   | 10%  |

Tabela 5.53 Erro médio Custo total redes referência

Verifica-se que utilizando (4.16) e (4.48) para o custo de transmissão e para o custo de gestão de largura de banda o custo total é exacto considerando  $\langle h \rangle$ ,  $\langle k \rangle$  e  $\langle s \rangle$  exactos. Considerando a aproximação (2.28) para o número médio de saltos por pedido,  $\langle h \rangle$ , e a aproximação (3.14) para o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ , obtemos um erro médio de 6% para as redes consideradas se necessitarmos também de utilizar a aproximação de  $\langle s \rangle$  obtemos um erro médio de 10%. Notemos que o erro associado à aproximação de  $\langle s \rangle$  se deve essencialmente ao rigor usado para determinar a área da rede.

### 5.3 Conclusões

Após analisar os resultados obtidos verificámos que para as oito redes de referência o grau médio,  $\langle \delta \rangle$ , está compreendido entre 2.38 e 4.14. Verificámos também que das cinco aproximações para o valor médio do número de saltos por pedido,  $\langle h \rangle$ , a que melhor se aproxima é a (2.28) à qual corresponde um erro médio de 5%. O valor médio de canais por ligação não considerando restauro apresenta um erro médio igual ao erro associado a  $\langle h \rangle$ .

As duas aproximações consideradas para o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ , apresentam resultados semelhantes, isto é um erro médio de 23%. Sendo a expressão (3.14) mais simples consideramos esta aproximação melhor do que (3.20).

O valor médio do número de canais por ligação,  $\langle W^k \rangle$ , considerando restauro está associado a  $\langle h \rangle$  e a  $\langle k \rangle$ , assim, conhecendo-se os seis valores de  $\langle h \rangle$  estudados (cinco aproximações e o valor exacto) e os três valores de  $\langle k \rangle$  (duas aproximações e o valor exacto) podemos obter dezoito valores de  $\langle W^k \rangle$ . A melhor aproximação de  $\langle W^k \rangle$  é obtida quando utilizamos a expressão (2.28) para  $\langle h \rangle$ , não dependendo da escolha da aproximação para  $\langle k \rangle$ . Obtemos um erro médio de 13%.

A melhor aproximação da média de tráfego por ligação origina um erro médio de 5% e é obtida quando utilizamos a aproximação (2.28) para  $\langle h \rangle$ , o mesmo se verifica para o valor médio do número de portos não considerando restauro sendo o erro médio essencial de 3%. A melhor aproximação para o número médio de portos de linha é também conseguida quando utilizamos a expressão (2.28) para  $\langle h \rangle$  e o erro médio é igual a 5%.

A aproximação (3.40) obtida por Korotky para a média dos portos considerando restauro apresenta um erro médio de 23%. Se utilizarmos a expressão exacta e as aproximações (2.28) e (3.14) para  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$ , respectivamente, obtemos um erro médio de 11%.

A primeira aproximação para o custo de transmissão, expressão (4.7) não é apropriada pois apresenta um erro médio de 31%. A segunda aproximação, expressão (4.16) é muito boa, se

considerarmos a melhor aproximação de  $\langle W^k \rangle$  obtemos um erro de 5%, se ainda considerarmos o valor de  $\langle s \rangle$  aproximado obtemos um erro de 11%.

Quando utilizamos as duas aproximações para o custo de gestão de largura de banda exclusivamente eléctrica, obtemos grande disparidade entre os valores. Não foi possível validar estes resultados utilizando o OPNET devido ao facto de no OPNET se considerar a hierarquia SDH sempre que se utiliza nós exclusivamente eléctricos e consequentemente um esquema de protecção, enquanto na dissertação se considera restauro.

As duas aproximações para o custo de gestão de largura de banda eléctrica e óptica são boas, a aproximação (4.41) apresenta um erro médio de 4% enquanto a aproximação (4.48) é quase exacta. Considerando as melhores aproximações de  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$  obtemos um erro de 7% para (4.41) e um erro de 9% para (4.48), assim podemos observar que (4.48) revela uma maior sensibilidade ao erro em  $\langle h \rangle$  e  $\langle k \rangle$ .

A aproximação para o custo total, isto é custo de transmissão mais o custo de gestão de largura de banda, apresenta um erro médio de 6% quando consideramos as melhores aproximações para  $\langle h \rangle$ , (2.28) e  $\langle k \rangle$ , (3.14). Se considerarmos também a aproximação para  $\langle s \rangle$  o erro médio é de 10%.



## 5.4 Referências

- [1] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Lista\\_de\\_pa%C3%ADses\\_e\\_territ%C3%B3rios\\_por\\_%C3%A1rea](http://pt.wikipedia.org/wiki/Lista_de_pa%C3%ADses_e_territ%C3%B3rios_por_%C3%A1rea)
- [2] J. Pedro, A. Teixeira, P. Monteiro, J. Pires, “ On a Portuguese backbone network of reference”, in SEON 2005, Aveiro, Portugal, June 2005.
- [3] M. J. O’Mahony, “The Design of a European Optical Network”, IEEE of Lightwave Technology, vol.13, NO. 5, May 1995.
- [4] S. K. Korotky, “Network Global Expectation Model: A Statistical Formalism for Quickly Quantifying Network Needs and Costs,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.22, NO. 3, pp. 703-22, March 2004.
- [5] Stefano Baroni, Polina Bayvel, “ Wavelength Requirements in Arbitrarily Connected Wavelength-Routed Optical Networks”, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.15, NO. 2, February 1997.

# Capítulo 6

## Conclusões

Nesta dissertação comprovamos a possibilidade de tratar o problema do dimensionamento em redes ópticas usando uma abordagem estatística. Comparando os resultados obtidos com a abordagem estatística e os alcançados usando uma ferramenta numérica de dimensionamento, verificámos que a abordagem estatística permite obter resultados com um erro na ordem dos 10%.

Identificamos como parâmetros críticos do dimensionamento o número médio de saltos,  $\langle h \rangle$ , e o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ .

No presente trabalho foi apresentada uma aproximação estatística, considerando 2 milhões de redes, para determinar o número médio de saltos por pedido,  $\langle h \rangle$ . Esta aproximação revela melhores resultados quando é feita uma comparação com outras aproximações publicadas na literatura. Quando restringimos a nossa análise a oito redes de referência verificámos que a aproximação perde qualidade. O que nos leva a concluir que a forma como geramos as topologias deve ser refinada de forma a aproximar as redes geradas das redes reais.

Verificamos, também, que a cada par  $N, L$  podem corresponder milhões de topologias diferentes, muito embora os valores para o número médio de saltos por pedido,  $\langle h \rangle$ , sejam reduzidos.

É apresentada uma aproximação estatística para determinar o coeficiente de restauro,  $\langle k \rangle$ , considerando 2 milhões de redes. Esta aproximação apresenta resultados mais favoráveis quando a comparamos com outra publicada na literatura considerando os 2 milhões de topologias geradas. Quando limitamos a nossa análise a oito redes de referência denotamos que a aproximação apresentada perde qualidade embora continue a ser melhor, em média. Concluimos, novamente, que a forma de gerar as topologias deve ser aperfeiçoada.

A abordagem por nós utilizada foi a criação de topologias de forma aleatória. Contudo, existem topologias mais prováveis de surgirem em redes reais. Acreditamos que o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de gerar estas topologias mais prováveis poderá permitir uma melhoria da precisão dos resultados obtidos com o modelo estatístico.

Para trabalho futuro, consideramos que é relevante resolver o problema da geração de topologias.

## Anexos

## Anexo A1

### Expressão para cálculo de $\langle h \rangle$ , evitando a aproximação (2.22)

Apresentamos neste anexo uma forma de cálculo das expressões (2.21) e (2.23) sem utilizar a aproximação de um somatório a um integral, isto é, o numero total de nós é dado por

$$N = 1 + \sum_{h=1}^{H_c} N_h = 1 + \sum_{h=1}^{H_c} \langle \delta \rangle h = 1 + \langle \delta \rangle \sum_{h=0}^{H_c} h = 1 + \frac{\langle \delta \rangle H_c (H_c + 1)}{2}, \quad (\text{A1.1})$$

o número total de saltos,  $h_T$ , para o nó central pode ser obtido por

$$h_T = \sum_{h=1}^{H_c} N_h h = \sum_{h=1}^{H_c} h^2 \langle \delta \rangle = \langle \delta \rangle \sum_{h=0}^{H_c} h^2 = \frac{\langle \delta \rangle H_c (H_c + 1) (2H_c + 1)}{6}, \quad (\text{A1.2})$$

considerando os  $N(N-1)$  pedidos unidireccionais, podemos obter o número médio de saltos

$$\langle h \rangle = \frac{N h_T}{N(N-1)} = \frac{\langle \delta \rangle H_c (H_c + 1) (2H_c + 1)}{\frac{6}{2} \langle \delta \rangle H_c (H_c + 1)} = \frac{2(2H_c + 1)}{6} = \frac{2H_c + 1}{3}. \quad (\text{A1.3})$$

Usando a fórmula resolvente para obtenção do  $H_c$  em função de  $N$  e  $\langle \delta \rangle$  em (2.24) e considerando,  $H > 0$ ,

$$H_c = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4 \left( \frac{2(N-1)}{\langle \delta \rangle} \right)}}{2} = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{8(N-1)}{\langle \delta \rangle}}}{2}. \quad (\text{A1.4})$$

Substituindo  $H_c$  em (A1.3),

$$\langle h \rangle = \frac{2H+1}{3} = \frac{2 \left( \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{8(N-1)}{\langle \delta \rangle}}}{2} \right) + 1}{3} = \frac{\sqrt{1 + \frac{8(N-1)}{\langle \delta \rangle}}}{3}. \quad (\text{A1.4})$$

Para a rede apresentada na Figura 2.2 considerando  $N=25$  temos que  $\langle h \rangle = 3.4$ , utilizando a expressão (2.26) e (A1.4) temos,  $\langle h \rangle = 3.66$  e  $\langle h \rangle = 2.74$ , respectivamente. Notemos que a expressão (A1.4) continua a dar um valor aproximado porque (2.24) é uma aproximação.

## **Anexo A2**

### **Cálculo de $\langle h \rangle$ considerando diferentes topologias**









































































## Anexo A3

### Referências:

- [1] João Pedro, A. Teixeira, P. Monteiro, J.Pires, "On a Portuguese Backbone Network of Reference",
- [2] M. J. O'Mahony, D. Simeonidou, A. Yu, J.Zhou, "The Design of a European Optical Network", Journal of Lightwave Technology, vol.13, NO. 5, May 1995.
- [3] D. Colle et al, "Data-centric optical networks and their survivability", IEEE J.Sel Areas Commum., vol 20, no.1, pp 6-20, Jan. 2002.
- [4] Newnet usa topology. [Online]. Disponível: <https://wiki.internet2.edu/confluence/display/l2RevDoc/Architecture>
- [5] [7] Stefano Baroni, Polina Bayvel, " Wavelength Requirements in Arbitrarily Connected Wavelength-Routed Optical Networks", Journal of Lightwave Technology, vol.15, NO.2, February 1997.
- [6] The very-high-performance backbone network service – vbns. [Online]. Disponível: <http://www.vbns.net>
- [8] S. K. Korotky, "Network Global Expectation Model: A Statistical Formalism for Quickly Quantifying Network Needs and Costs," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.22, NO. 3, pp. 703-22, March 2004.

# PORTUGAL

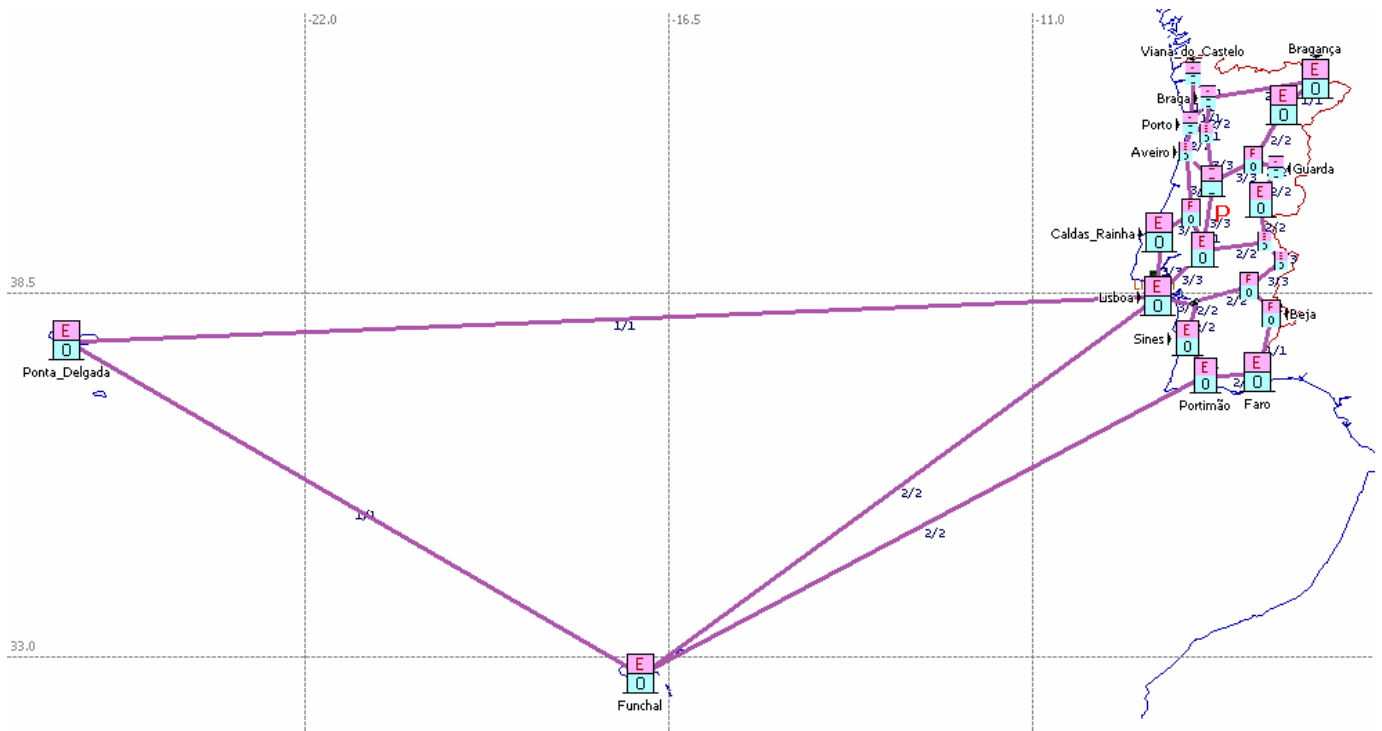
## Localização dos nós

| Id               | Lat   | Long   | Type |
|------------------|-------|--------|------|
| Alcácer_do_Sal   | 38.35 | -8.5   | EOCC |
| Aveiro           | 40.37 | -8.38  | EOCC |
| Beja             | 38.02 | -7.53  | EOCC |
| Braga            | 41.35 | -8.15  | EOCC |
| Bragança         | 41.48 | -6.5   | EOCC |
| Caldas_Rainha    | 39.24 | -9.08  | EOCC |
| Castelo_Branco   | 39.5  | -7.31  | EOCC |
| Coimbra          | 40.15 | -8.27  | EOCC |
| Elvas            | 38.5  | -7.1   | EOCC |
| Évora            | 38.33 | -7.57  | EOCC |
| Faro             | 37.02 | -7.55  | EOCC |
| Funchal          | 32.7  | -16.92 | EOCC |
| Guarda           | 40.32 | -7.2   | EOCC |
| Leiria           | 39.46 | -8.53  | EOCC |
| Lisboa           | 38.42 | -9.1   | EOCC |
| Ponta_Delgada    | 37.75 | -25.6  | EOCC |
| Portalegre       | 39.19 | -7.25  | EOCC |
| Portimão         | 37.08 | -8.32  | EOCC |
| Porto            | 41.08 | -8.4   | EOCC |
| Santarém         | 39.12 | -8.42  | EOCC |
| S_João_Madeira   | 40.54 | -8.3   | EOCC |
| Setúbal          | 38.3  | -8.58  | EOCC |
| Sines            | 37.58 | -8.53  | EOCC |
| Viana_do_Castelo | 41.5  | -8.5   | EOCC |
| Vila_Real        | 41.17 | -7.48  | EOCC |
| Viseu            | 40.4  | -7.55  | EOCC |

## Localização das ligações

| From             | To             | Length |
|------------------|----------------|--------|
| Lisboa           | Ponta_Delgada  | 1500   |
| Lisboa           | Funchal        | 1050   |
| Ponta_Delgada    | Funchal        | 1050   |
| Portimão         | Funchal        | 1010   |
| Braga            | Bragança       | 209    |
| Santarém         | Portalegre     | 144    |
| Beja             | Faro           | 140    |
| Portimão         | Sines          | 139    |
| Santarém         | Coimbra        | 136    |
| Bragança         | Vila_Real      | 118    |
| Aveiro           | Leiria         | 113    |
| Vila_Real        | Viseu          | 97     |
| Guarda           | Castelo_Branco | 94     |
| Lisboa           | Caldas_Rainha  | 88     |
| Braga            | S_João_Madeira | 85     |
| S_João_Madeira   | Coimbra        | 84     |
| Viseu            | Coimbra        | 84     |
| Elvas            | Évora          | 83     |
| Portalegre       | Castelo_Branco | 80     |
| Santarém         | Lisboa         | 76     |
| Beja             | Évora          | 76     |
| Viseu            | Guarda         | 73     |
| Viana_do_Castelo | Porto          | 70     |
| Leiria           | Santarém       | 70     |
| Alcácer_do_Sal   | Évora          | 68     |
| Porto            | Aveiro         | 67     |
| Alcácer_do_Sal   | Sines          | 65     |
| Portimão         | Faro           | 62     |
| Coimbra          | Aveiro         | 58     |
| Elvas            | Portalegre     | 56     |
| Leiria           | Caldas_Rainha  | 54     |
| Braga            | Porto          | 53     |
| Alcácer_do_Sal   | Setúbal        | 50     |
| Viana_do_Castelo | Braga          | 47     |
| Lisboa           | Setúbal        | 44     |
| Porto            | S_João_Madeira | 32     |

# Topologia da rede





# European Optical Network (EON)

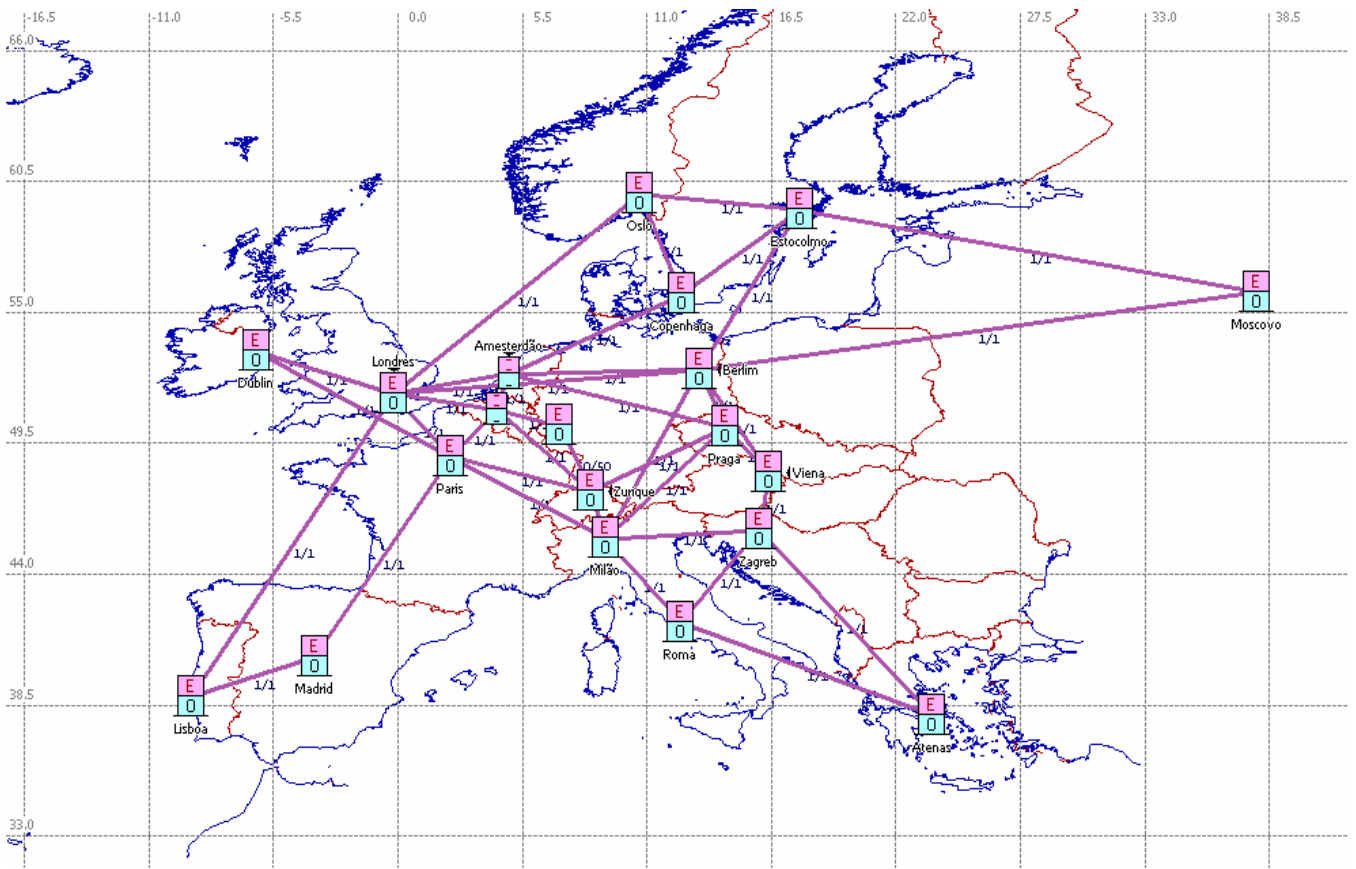
## Localização dos nós

| Id         | Lat    | Lon    | Type |
|------------|--------|--------|------|
| Lisboa     | 38.75  | -9.12  | EOCC |
| Madrid     | 40.44  | -3.69  | EOCC |
| Dublin     | 53.34  | -6.25  | EOCC |
| Paris      | 48.86  | 2.35   | EOCC |
| Londres    | 51.48  | -0.178 | EOCC |
| Bruxelas   | 50.84  | 4.36   | EOCC |
| Amesterdão | 52.373 | 4.894  | EOCC |
| Luxemburgo | 49.6   | 6.117  | EOCC |
| Milão      | 45.47  | 9.189  | EOCC |
| Zurique    | 47.4   | 8.534  | EOCC |
| Roma       | 41.89  | 12.49  | EOCC |
| Praga      | 50.1   | 14.46  | EOCC |
| Copenhaga  | 55.7   | 12.523 | EOCC |
| Oslo       | 59.93  | 10.712 | EOCC |
| Berlim     | 52.516 | 13.327 | EOCC |
| Viena      | 48.2   | 16.369 | EOCC |
| Zagreb     | 45.807 | 15.964 | EOCC |
| Estocolmo  | 59.255 | 17.794 | EOCC |
| Atenas     | 38.02  | 23.61  | EOCC |
| Moscovo    | 55.764 | 37.938 | EOCC |

## Localização das ligações

| From       | To         | Length |
|------------|------------|--------|
| Bruxelas   | Amesterdão | 206    |
| Bruxelas   | Luxemburgo | 214    |
| Zurique    | Milão      | 289    |
| Praga      | Viena      | 295    |
| Paris      | Bruxelas   | 305    |
| Londres    | Bruxelas   | 310    |
| Berlim     | Praga      | 351    |
| Viena      | Zagreb     | 375    |
| Londres    | Paris      | 392    |
| Dublin     | Londres    | 442    |
| Amesterdão | Londres    | 480    |
| Oslo       | Londres    | 520    |
| Estocolmo  | Oslo       | 531    |
| Milão      | Roma       | 575    |
| Paris      | Zurique    | 599    |
| Oslo       | Copenhaga  | 606    |
| Bruxelas   | Zurique    | 625    |
| Madrid     | Lisboa     | 632    |
| Milão      | Zagreb     | 636    |
| Viena      | Berlim     | 642    |
| Copenhaga  | Estocolmo  | 657    |
| Berlim     | Amesterdão | 666    |
| Zurique    | Praga      | 714    |
| Copenhaga  | Amesterdão | 777    |
| Roma       | Atenas     | 783    |
| Milão      | Paris      | 852    |
| Milão      | Praga      | 877    |
| Dublin     | Paris      | 878    |
| Amesterdão | Praga      | 884    |
| Roma       | Zagreb     | 892    |
| Berlim     | Estocolmo  | 1036   |
| Milão      | Berlim     | 1041   |
| Berlim     | Londres    | 1045   |
| Estocolmo  | Moscovo    | 1191   |
| Paris      | Madrid     | 1280   |
| Zagreb     | Atenas     | 1504   |
| Moscovo    | Berlim     | 1850   |
| Londres    | Lisboa     | 2151   |

# Topologia da rede



# ITÁLIA

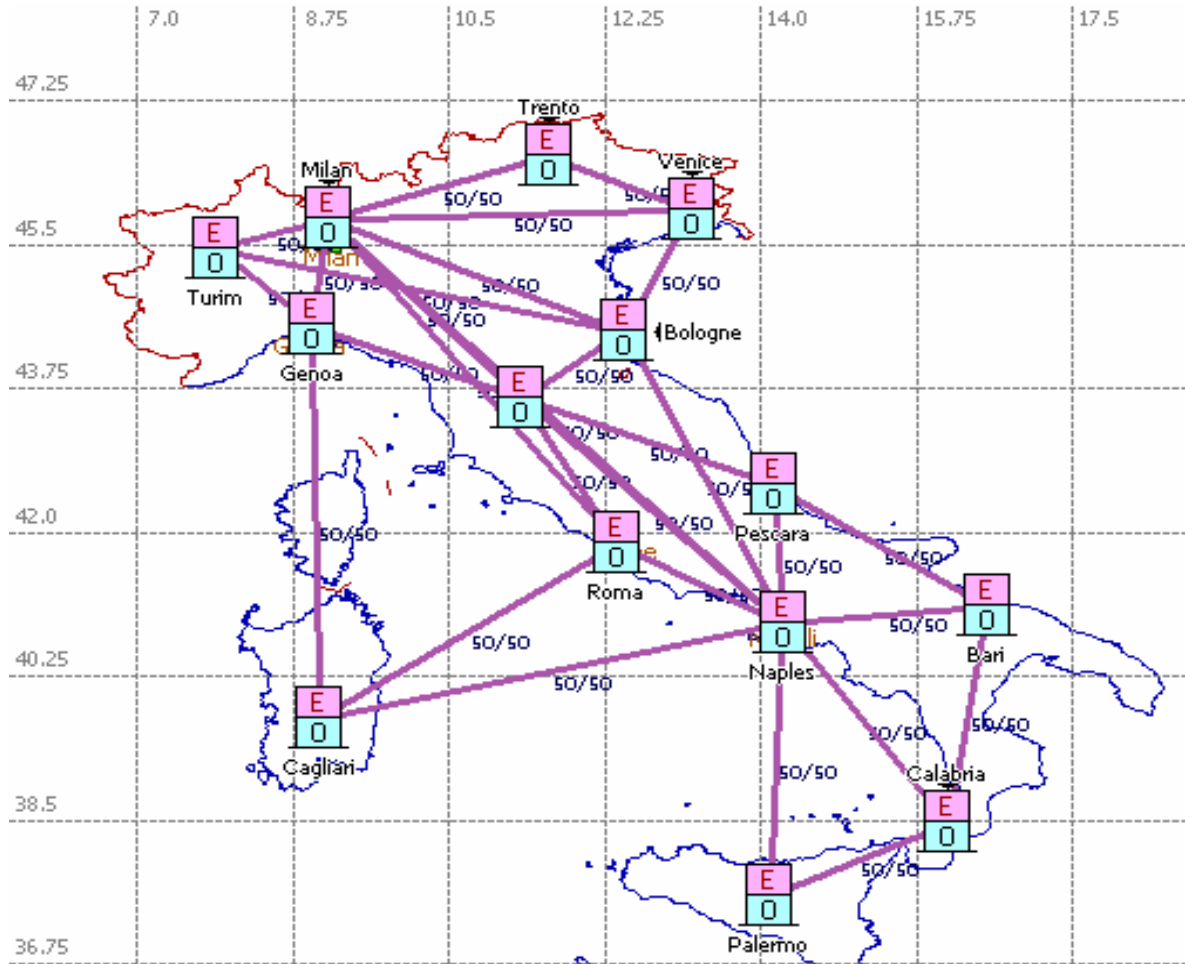
## Localização dos nós

| Id       | Lat   | Long  | Type |
|----------|-------|-------|------|
| Palermo  | 37.55 | 14.09 | EOCC |
| Calabria | 38.45 | 16.09 | EOCC |
| Bari     | 41.08 | 16.54 | EOCC |
| Naples   | 40.87 | 14.25 | EOCC |
| Pescara  | 42.55 | 14.15 | EOCC |
| Florence | 43.6  | 11.3  | EOCC |
| Roma     | 41.84 | 12.38 | EOCC |
| Cagliari | 39.7  | 9.04  | EOCC |
| Genoa    | 44.5  | 8.96  | EOCC |
| Turim    | 45.42 | 7.883 | EOCC |
| Milan    | 45.8  | 9.15  | EOCC |
| Trento   | 46.55 | 11.62 | EOCC |
| Venice   | 45.89 | 13.23 | EOCC |
| Bologne  | 44.42 | 12.46 | EOCC |

## Localização das ligações

| From     | To       | Length |
|----------|----------|--------|
| Palermo  | Calabria | 202    |
| Calabria | Bari     | 295    |
| Calabria | Naples   | 312    |
| Palermo  | Naples   | 369    |
| Bari     | Naples   | 193    |
| Pescara  | Bari     | 257    |
| Pescara  | Naples   | 187    |
| Naples   | Cagliari | 461    |
| Naples   | Roma     | 201    |
| Naples   | Florence | 235    |
| Bologne  | Naples   | 388    |
| Roma     | Florence | 106    |
| Roma     | Cagliari | 334    |
| Milan    | Roma     | 520    |
| Florence | Pescara  | 136    |
| Florence | Milan    | 451    |
| Florence | Bologne  | 159    |
| Bologne  | Venice   | 174    |
| Bologne  | Turim    | 397    |
| Bologne  | Milan    | 301    |
| Turim    | Milan    | 143    |
| Milan    | Trento   | 207    |
| Trento   | Venice   | 144    |
| Venice   | Milan    | 316    |
| Genoa    | Cagliari | 534    |
| Genoa    | Turim    | 135    |
| Genoa    | Milan    | 145    |
| Naples   | Milan    | 686    |
| Genoa    | Florence | 359    |

# Topologia da rede



# NewNet

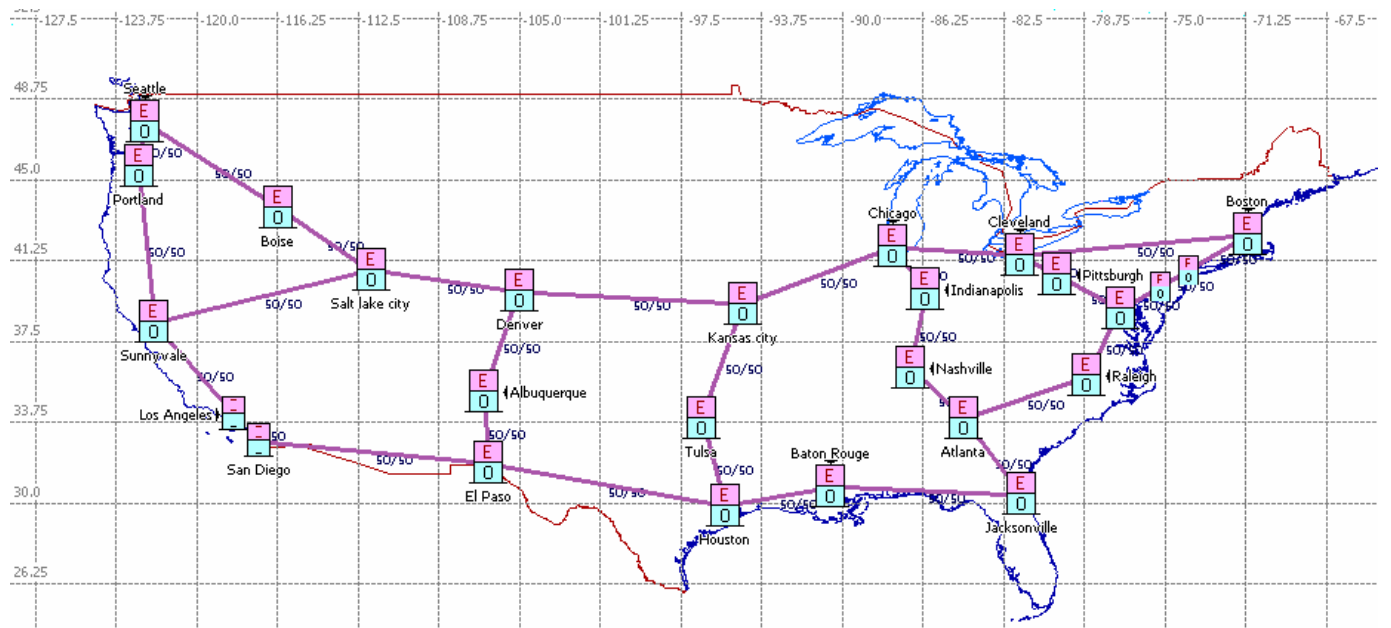
## Localização dos nós

| <b>Id</b>      | <b>Lat</b> | <b>Long</b> | <b>Type</b> |
|----------------|------------|-------------|-------------|
| Seattle        | 47.57      | -122.386    | EOCC        |
| Portland       | 45.523     | -122.676    | EOCC        |
| Boise          | 43.616     | -116.216    | EOCC        |
| Salt lake city | 40.693     | -111.891    | EOCC        |
| Los Angeles    | 34         | -118.249    | EOCC        |
| San Diego      | 32.761     | -117.125    | EOCC        |
| El Paso        | 31.78      | -106.449    | EOCC        |
| Albuquerque    | 35.084     | -106.651    | EOCC        |
| Denver         | 39.739     | -104.984    | EOCC        |
| Kansas city    | 39.099     | -94.578     | EOCC        |
| Houston        | 29.771     | -95.407     | EOCC        |
| Jacksonville   | 30.33      | -81.66      | EOCC        |
| Atlanta        | 33.796     | -84.348     | EOCC        |
| Nashville      | 36.142     | -86.818     | EOCC        |
| Indianapolis   | 39.814     | -86.135     | EOCC        |
| Chicago        | 41.826     | -87.641     | EOCC        |
| Cleveland      | 41.391     | -81.727     | EOCC        |
| Pittsburgh     | 40.497     | -79.997     | EOCC        |
| Raleigh        | 35.791     | -78.643     | EOCC        |
| Washington     | 38.895     | -77.036     | EOCC        |
| Philadelphia   | 39.927     | -75.218     | EOCC        |
| New York       | 40.707     | -73.905     | EOCC        |
| Boston         | 42.375     | -71.103     | EOCC        |
| Sunnyvale      | 38.3       | -122        | EOCC        |
| Tulsa          | 33.8       | -96.5       | EOCC        |
| Baton Rouge    | 30.66      | -90.53      | EOCC        |

## Localização das ligações

| <b>From</b>    | <b>To</b>      | <b>Length</b> |
|----------------|----------------|---------------|
| Seattle        | Portland       | 228           |
| Seattle        | Boise          | 651           |
| Portland       | Sunnyvale      | 805           |
| Sunnyvale      | Salt lake city | 907           |
| Salt lake city | Boise          | 482           |
| Sunnyvale      | Los Angeles    | 585           |
| Los Angeles    | San Diego      | 173           |
| San Diego      | El Paso        | 1010          |
| El Paso        | Albuquerque    | 368           |
| Albuquerque    | Denver         | 538           |
| Denver         | Salt lake city | 596           |
| Denver         | Kansas city    | 897           |
| Kansas city    | Tulsa          | 614           |
| Tulsa          | Houston        | 460           |
| Houston        | El Paso        | 1078          |
| Houston        | Baton Rouge    | 479           |
| Baton Rouge    | Jacksonville   | 851           |
| Jacksonville   | Atlanta        | 461           |
| Atlanta        | Nashville      | 344           |
| Nashville      | Indianapolis   | 413           |
| Indianapolis   | Chicago        | 257           |
| Chicago        | Kansas city    | 661           |
| Chicago        | Cleveland      | 494           |
| Cleveland      | Pittsburgh     | 176           |
| Pittsburgh     | Washington     | 310           |
| Washington     | Raleigh        | 373           |
| Raleigh        | Atlanta        | 566           |
| Washington     | Philadelphia   | 194           |
| Philadelphia   | New York       | 141           |
| New York       | Boston         | 298           |
| Boston         | Cleveland      | 886           |

# Topologia da rede



# National Science Foundation network (NFSNET)

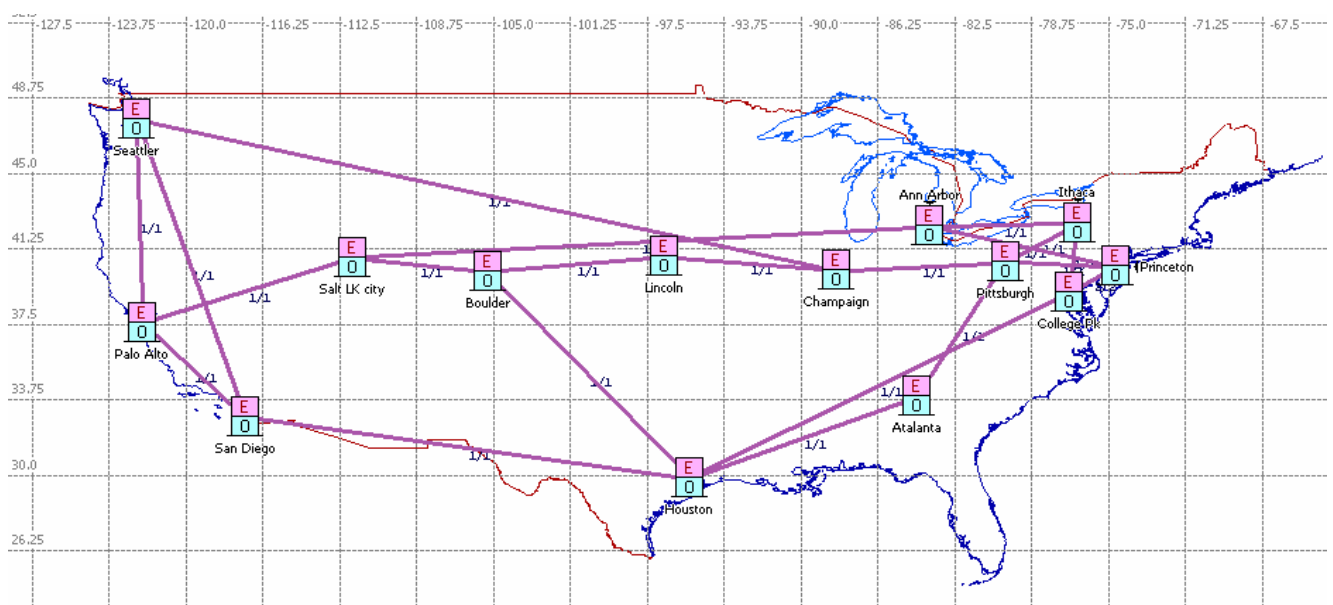
## Localização dos nós

| Id           | Lat    | Lon      | Type |
|--------------|--------|----------|------|
| Palo Alto    | 37.441 | -122.142 | EOCC |
| Seattler     | 47.57  | -122.386 | EOCC |
| San Diego    | 32.761 | -117.125 | EOCC |
| Salt LK city | 40.693 | -111.891 | EOCC |
| Boulder      | 40.015 | -105.27  | EOCC |
| Houston      | 29.771 | -95.407  | EOCC |
| Lincoln      | 40.807 | -96.681  | EOCC |
| Champaign    | 40.116 | -88.243  | EOCC |
| Pittsburgh   | 40.497 | -79.997  | EOCC |
| Atalanta     | 33.796 | -84.348  | EOCC |
| Ann Arbor    | 42.27  | -83.726  | EOCC |
| Ithaca       | 42.44  | -76.496  | EOCC |
| College Pk   | 38.98  | -76.936  | EOCC |
| Princeton    | 40.298 | -74.612  | EOCC |

## Localização das ligações

| From         | To           | Length |
|--------------|--------------|--------|
| College Pk   | Princeton    | 286    |
| Princeton    | Pittsburgh   | 546    |
| Ithaca       | College Pk   | 547    |
| Ithaca       | Pittsburgh   | 572    |
| Champaign    | Pittsburgh   | 781    |
| Lincoln      | Boulder      | 804    |
| Palo Alto    | San Diego    | 805    |
| Ithaca       | Ann Arbor    | 813    |
| Salt LK city | Boulder      | 843    |
| Champaign    | Lincoln      | 871    |
| Ann Arbor    | Princeton    | 1006   |
| Atalanta     | Pittsburgh   | 1104   |
| Palo Alto    | Salt LK city | 1228   |
| Atalanta     | Houston      | 1275   |
| Palo Alto    | Seattler     | 1343   |
| Houston      | Boulder      | 1711   |
| Seattler     | San Diego    | 2018   |
| College Pk   | Houston      | 2278   |
| Houston      | San Diego    | 2372   |
| Salt LK city | Ann Arbor    | 2605   |
| Seattler     | Champaign    | 3480   |

## Topologia da rede



# Very-high-performance Backbone Network Service (vBNS)

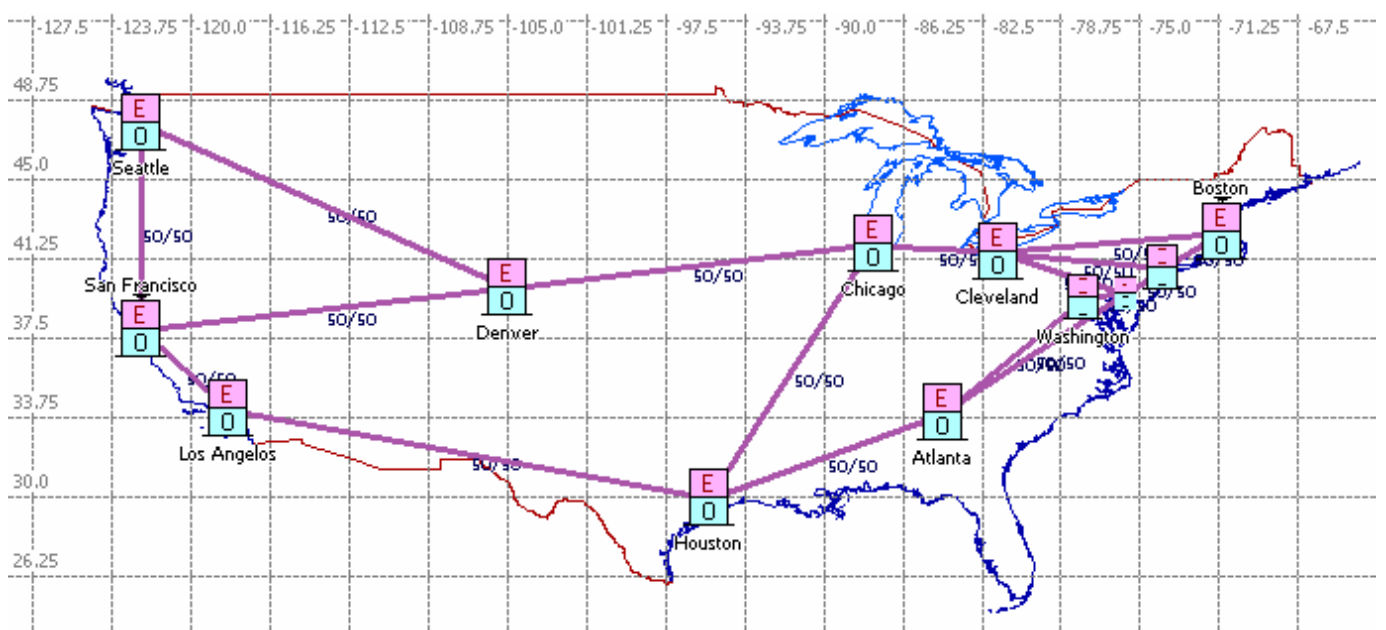
## Localização dos nós

| Id            | Lat    | Long     | Type |
|---------------|--------|----------|------|
| Seattle       | 47.57  | -122.386 | EOCC |
| San Francisco | 37.795 | -122.38  | EOCC |
| Los Angeles   | 34     | -118.249 | EOCC |
| Denver        | 39.739 | -104.984 | EOCC |
| Chicago       | 41.826 | -87.641  | EOCC |
| Houston       | 29.771 | -95.407  | EOCC |
| Cleveland     | 41.391 | -81.727  | EOCC |
| Atlanta       | 33.796 | -84.348  | EOCC |
| New York      | 40.707 | -73.905  | EOCC |
| Boston        | 42.375 | -71.103  | EOCC |
| Washington    | 39.3   | -77.7    | EOCC |
| Perryman      | 39.5   | -75.7    | EOCC |

## Localização das ligações

| From          | To            | Length |
|---------------|---------------|--------|
| Seattle       | San Francisco | 1088   |
| San Francisco | Los Angeles   | 563    |
| Los Angeles   | Houston       | 2204   |
| San Francisco | Denver        | 1522   |
| Denver        | Seattle       | 1644   |
| Denver        | Chicago       | 1477   |
| Chicago       | Houston       | 1512   |
| Houston       | Atlanta       | 1137   |
| Chicago       | Cleveland     | 494    |
| Cleveland     | Boston        | 886    |
| Cleveland     | New York      | 660    |
| New York      | Boston        | 298    |
| New York      | Perryman      | 196    |
| Perryman      | Washington    | 139    |
| Washington    | Atlanta       | 866    |
| Atlanta       | Perryman      | 1005   |
| Perryman      | Cleveland     | 552    |

## Topologia da rede





# Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET)

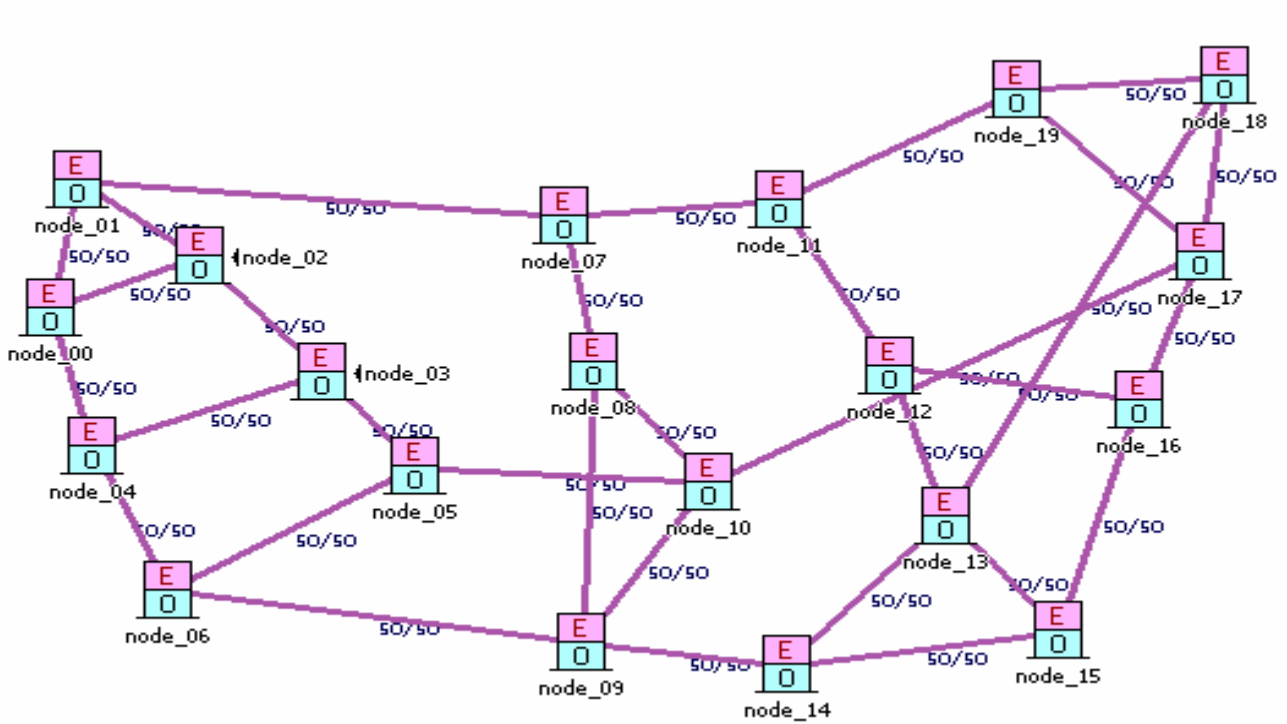
## Localização dos nós

| Id      | X    | Y    | Type |
|---------|------|------|------|
| node_00 | 50.8 | 305  | EOCC |
| node_01 | 71.4 | 184  | EOCC |
| node_02 | 165  | 256  | EOCC |
| node_03 | 259  | 365  | EOCC |
| node_04 | 82.7 | 434  | EOCC |
| node_05 | 331  | 453  | EOCC |
| node_06 | 141  | 570  | EOCC |
| node_07 | 445  | 218  | EOCC |
| node_08 | 468  | 355  | EOCC |
| node_09 | 459  | 618  | EOCC |
| node_10 | 556  | 468  | EOCC |
| node_11 | 611  | 203  | EOCC |
| node_12 | 695  | 359  | EOCC |
| node_13 | 739  | 500  | EOCC |
| node_14 | 617  | 639  | EOCC |
| node_15 | 825  | 607  | EOCC |
| node_16 | 887  | 391  | EOCC |
| node_17 | 934  | 252  | EOCC |
| node_18 | 953  | 86.5 | EOCC |
| node_19 | 793  | 99.6 | EOCC |

## Localização das ligações

| From    | To      | Length |
|---------|---------|--------|
| node_01 | node_00 | 122    |
| node_01 | node_02 | 118    |
| node_00 | node_02 | 124    |
| node_02 | node_03 | 143    |
| node_03 | node_04 | 189    |
| node_04 | node_00 | 132    |
| node_04 | node_06 | 147    |
| node_06 | node_05 | 223    |
| node_05 | node_03 | 113    |
| node_01 | node_07 | 375    |
| node_07 | node_08 | 138    |
| node_08 | node_09 | 263    |
| node_09 | node_10 | 178    |
| node_10 | node_08 | 143    |
| node_05 | node_10 | 225    |
| node_09 | node_06 | 321    |
| node_09 | node_14 | 159    |
| node_14 | node_13 | 184    |
| node_13 | node_12 | 147    |
| node_12 | node_11 | 177    |
| node_11 | node_07 | 166    |
| node_14 | node_15 | 210    |
| node_15 | node_13 | 137    |
| node_15 | node_16 | 224    |
| node_16 | node_12 | 194    |
| node_16 | node_17 | 146    |
| node_17 | node_18 | 166    |
| node_18 | node_19 | 160    |
| node_19 | node_11 | 209    |
| node_17 | node_19 | 207    |
| node_13 | node_18 | 465    |
| node_10 | node_17 | 435    |

# Topologia da rede



# Korotky's prototypical backbone USA network

## Localização dos nós

| <b>Id</b>      | <b>Lat</b> | <b>Lon</b> | <b>Type</b> |
|----------------|------------|------------|-------------|
| Seattle        | 47.57      | -122.386   | EOCC        |
| Portland       | 45.523     | -122.676   | EOCC        |
| Spokane        | 47.658     | -117.426   | EOCC        |
| Boise          | 43.616     | -116.216   | EOCC        |
| Eugene         | 44.052     | -123.086   | EOCC        |
| Billings       | 45.783     | -108.5     | EOCC        |
| Fort Collins   | 40.585     | -105.084   | EOCC        |
| Denver         | 39.739     | -104.984   | EOCC        |
| Salt lake city | 40.693     | -111.891   | EOCC        |
| Sacramento     | 38.567     | -121.422   | EOCC        |
| San Francisco  | 37.795     | -122.38    | EOCC        |
| Modesto        | 37.639     | -120.996   | EOCC        |
| San Jose       | 37.308     | -121.847   | EOCC        |
| Bakersfield    | 35.373     | -119.018   | EOCC        |
| Los Angeles    | 34         | -118.249   | EOCC        |
| San Diego      | 32.761     | -117.125   | EOCC        |
| Las Vegas      | 36.175     | -115.137   | EOCC        |
| Tempe          | 33.415     | -111.909   | EOCC        |
| Tucson         | 32.221     | -110.926   | EOCC        |
| Albuquerque    | 35.084     | -106.651   | EOCC        |
| El Paso        | 31.78      | -106.449   | EOCC        |
| Amarilho       | 35.222     | -101.831   | EOCC        |
| lubbock        | 33.577     | -101.855   | EOCC        |
| San Antonio    | 29.429     | -98.524    | EOCC        |
| Houston        | 29.771     | -95.407    | EOCC        |
| Waco           | 31.549     | -97.146    | EOCC        |
| Dallas         | 32.763     | -96.663    | EOCC        |
| shreveport     | 32.525     | -93.75     | EOCC        |
| Little rock    | 34.761     | -92.309    | EOCC        |
| Oklahoma city  | 35.49      | -97.529    | EOCC        |
| Wichita        | 37.692     | -97.337    | EOCC        |
| Kansas city    | 39.099     | -94.578    | EOCC        |
| Omaha          | 41.258     | -95.937    | EOCC        |
| Sioux Falls    | 43.549     | -96.7      | EOCC        |
| Fargo          | 46.877     | -96.789    | EOCC        |
| Minneapolis    | 44.924     | -93.307    | EOCC        |
| Des Moines     | 41.597     | -93.622    | EOCC        |
| Peoria         | 40.693     | -89.588    | EOCC        |

|              |        |         |      |
|--------------|--------|---------|------|
| Milwaukee    | 43.038 | -87.906 | EOCC |
| Chicago      | 41.826 | -87.641 | EOCC |
| Grand rapids | 42.963 | -85.668 | EOCC |
| South bend   | 41.683 | -86.25  | EOCC |
| Detroit      | 42.394 | -83.078 | EOCC |
| Toledo       | 41.663 | -83.555 | EOCC |
| Columbus     | 40.045 | -82.993 | EOCC |
| Indianapolis | 39.814 | -86.135 | EOCC |
| Springfield  | 39.794 | -89.653 | EOCC |
| St. Louis    | 38.638 | -90.342 | EOCC |
| Memphis      | 35.114 | -90     | EOCC |
| Jackson      | 32.319 | -90.203 | EOCC |
| New orleans  | 29.956 | -90.098 | EOCC |
| Mobile       | 30.683 | -88.116 | EOCC |
| tallahassee  | 30.45  | -84.3   | EOCC |
| clearwater   | 27.976 | -82.758 | EOCC |
| Miami        | 25.832 | -80.27  | EOCC |
| Jupiter      | 26.934 | -80.094 | EOCC |
| Orlando      | 28.538 | -81.379 | EOCC |
| Gainesville  | 29.652 | -82.324 | EOCC |
| Jacksonville | 30.33  | -81.66  | EOCC |
| Waycross     | 31.213 | -82.354 | EOCC |
| Savannah     | 32.086 | -81.099 | EOCC |
| Macon        | 32.84  | -83.632 | EOCC |
| Montgomery   | 32.36  | -86.299 | EOCC |
| Birmingham   | 33.521 | -86.802 | EOCC |
| Nashville    | 36.142 | -86.818 | EOCC |
| chattanooga  | 35.046 | -85.309 | EOCC |
| Atlanta      | 33.796 | -84.348 | EOCC |
| Augusta      | 33.471 | -81.975 | EOCC |
| Columbia     | 34.014 | -80.997 | EOCC |
| Charlotte    | 35.205 | -80.835 | EOCC |
| Knoxville    | 35.96  | -83.92  | EOCC |
| Louisville   | 38.254 | -85.759 | EOCC |
| Cincinnati   | 39.148 | -84.477 | EOCC |
| wytheville   | 36.948 | -81.085 | EOCC |
| Greensboro   | 36.072 | -79.792 | EOCC |
| Raleigh      | 35.791 | -78.643 | EOCC |
| Richmond     | 37.563 | -77.473 | EOCC |
| Washington   | 38.895 | -77.036 | EOCC |
| Charleston   | 38.355 | -81.653 | EOCC |
| Pittsburgh   | 40.497 | -79.997 | EOCC |
| Cleveland    | 41.391 | -81.727 | EOCC |
| Buffalo      | 42.898 | -78.848 | EOCC |
| Syracuse     | 43.048 | -76.147 | EOCC |

|              |        |         |      |
|--------------|--------|---------|------|
| Binghamton   | 42.098 | -75.917 | EOCC |
| Scranton     | 41.408 | -75.662 | EOCC |
| Filadelfia   | 39.927 | -75.218 | EOCC |
| New York     | 40.707 | -73.905 | EOCC |
| Allentown    | 40.608 | -75.49  | EOCC |
| Stamford     | 41.053 | -73.538 | EOCC |
| Bridgeport   | 41.167 | -73.205 | EOCC |
| Hartford     | 41.76  | -72.703 | EOCC |
| Lake Katrina | 41.985 | -73.988 | EOCC |
| Schenectady  | 42.814 | -73.939 | EOCC |
| Rutland      | 43.61  | -72.973 | EOCC |
| chicopee     | 42.148 | -72.607 | EOCC |
| Providence   | 40.298 | -74.612 | EOCC |
| Boston       | 42.375 | -71.103 | EOCC |
| Worcester    | 42.262 | -71.802 | EOCC |
| Manchester   | 42.934 | -71.437 | EOCC |
| Westbrook    | 43.677 | -70.371 | EOCC |

## Localização das ligações

| From       | To          | Length |
|------------|-------------|--------|
| Amarilho   | Albuquerque | 458    |
| Denver     | Albuquerque | 667    |
| New York   | Allentown   | 137    |
| Scranton   | Allentown   | 113    |
| Stamford   | Allentown   | 192    |
| Birmingham | Atlanta     | 234    |
| Macon      | Atlanta     | 130    |
| Atlanta    | Augusta     | 234    |
| Modesto    | Bakersfield | 324    |
| San Diego  | Bakersfield | 369    |
| San Jose   | Bakersfield | 387    |
| Spokane    | Billings    | 865    |
| Allentown  | Binghamton  | 204    |
| Scranton   | Binghamton  | 93     |
| Syracuse   | Binghamton  | 207    |
| Jackson    | Birmingham  | 377    |
| Portland   | Boise       | 688    |
| Spokane    | Boise       | 664    |
| Manchester | Boston      | 83     |
| Stamford   | Bridgeport  | 35     |
| Cleveland  | Buffalo     | 300    |
| Syracuse   | Buffalo     | 235    |
| Cincinnati | Charleston  | 331    |

|                |              |     |
|----------------|--------------|-----|
| Columbus       | Charleston   | 257 |
| Pittsburgh     | Charleston   | 352 |
| wytheville     | Charleston   | 204 |
| Atlanta        | Charlotte    | 386 |
| Atlanta        | chattanooga  | 187 |
| Milwaukee      | Chicago      | 138 |
| Peoria         | Chicago      | 245 |
| Knoxville      | Cincinnati   | 403 |
| Louisville     | Cincinnati   | 159 |
| Miami          | clearwater   | 438 |
| Columbus       | Cleveland    | 220 |
| Pittsburgh     | Cleveland    | 204 |
| Toledo         | Cleveland    | 175 |
| Augusta        | Columbia     | 109 |
| Cincinnati     | Columbus     | 168 |
| Indianapolis   | Columbus     | 273 |
| Toledo         | Columbus     | 211 |
| Houston        | Dallas       | 383 |
| Oklahoma city  | Dallas       | 328 |
| Waco           | Dallas       | 150 |
| Amarilho       | Denver       | 676 |
| Salt lake city | Denver       | 797 |
| Kansas city    | Des Moines   | 305 |
| Minneapolis    | Des Moines   | 390 |
| Peoria         | Des Moines   | 404 |
| Grand rapids   | Detroit      | 237 |
| Albuquerque    | El Paso      | 425 |
| lubbock        | El Paso      | 551 |
| Billings       | Fargo        | 974 |
| Minneapolis    | Fargo        | 369 |
| Billings       | Fort Collins | 798 |
| Denver         | Fort Collins | 99  |
| Charlotte      | Greensboro   | 143 |
| Raleigh        | Greensboro   | 119 |
| wytheville     | Greensboro   | 174 |
| Bridgeport     | Hartford     | 83  |
| chicopee       | Hartford     | 47  |
| Lake Katrina   | Hartford     | 139 |
| San Antonio    | Houston      | 312 |
| South bend     | Indianapolis | 221 |
| St. Louis      | Indianapolis | 386 |
| Memphis        | Jackson      | 334 |
| New orleans    | Jackson      | 298 |
| Gainesville    | Jacksonville | 109 |
| Orlando        | Jacksonville | 217 |

|                |               |     |
|----------------|---------------|-----|
| Jacksonville   | Jupiter       | 423 |
| Miami          | Jupiter       | 140 |
| Oklahoma city  | Kansas city   | 560 |
| St. Louis      | Kansas city   | 397 |
| Wichita        | Kansas city   | 313 |
| Charlotte      | Knoxville     | 358 |
| chattanooga    | Knoxville     | 175 |
| Nashville      | Knoxville     | 287 |
| Binghamton     | Lake Katrina  | 209 |
| Schenectady    | Lake Katrina  | 103 |
| Stamford       | Lake Katrina  | 132 |
| Salt lake city | Las vegas     | 671 |
| San Diego      | Las vegas     | 532 |
| Oklahoma city  | Little rock   | 539 |
| shreveport     | Little rock   | 332 |
| San Jose       | Los Angelos   | 545 |
| Indianapolis   | Louisville    | 180 |
| Nashville      | Louisville    | 279 |
| Amarilho       | lubbock       | 190 |
| Dallas         | lubbock       | 518 |
| Augusta        | Macon         | 195 |
| Waycross       | Macon         | 251 |
| Worcester      | Manchester    | 95  |
| Little rock    | Memphis       | 217 |
| Nashville      | Memphis       | 333 |
| St. Louis      | Memphis       | 454 |
| Minneapolis    | Milwaukee     | 540 |
| Atlanta        | Montgomery    | 257 |
| Birmingham     | Montgomery    | 145 |
| Mobile         | Montgomery    | 270 |
| Birmingham     | Nashville     | 306 |
| St. Louis      | Nashville     | 492 |
| Houston        | New orleans   | 558 |
| Mobile         | New orleans   | 229 |
| Amarilho       | Oklahoma city | 412 |
| Denver         | Omaha         | 863 |
| Des Moines     | Omaha         | 210 |
| Kansas city    | Omaha         | 294 |
| clearwater     | Orlando       | 169 |
| Gainesville    | Orlando       | 177 |
| Jupiter        | Orlando       | 243 |
| Springfield    | Peoria        | 110 |
| Allentown      | Philadelphia  | 82  |
| Washington     | Philadelphia  | 214 |
| Washington     | Pittsburgh    | 381 |

|                |                |      |
|----------------|----------------|------|
| Eugene         | Portland       | 175  |
| Seattle        | Portland       | 280  |
| Boston         | Providence     | 70   |
| Hartford       | Providence     | 112  |
| Worcester      | Providence     | 62   |
| Columbia       | Raleigh        | 347  |
| Richmond       | Raleigh        | 244  |
| Savannah       | Raleigh        | 514  |
| Washington     | Richmond       | 170  |
| Schenectady    | Rutland        | 140  |
| Eugene         | Sacramento     | 758  |
| Modesto        | Sacramento     | 119  |
| Salt lake city | Sacramento     | 1043 |
| Boise          | Salt lake city | 543  |
| lubbock        | San Antonio    | 652  |
| Los Angelos    | San Diego      | 193  |
| Tucson         | San Diego      | 654  |
| Sacramento     | San Francisco  | 138  |
| Modesto        | San Jose       | 120  |
| San Francisco  | San Jose       | 74   |
| Augusta        | Savannah       | 200  |
| Jacksonville   | Savannah       | 219  |
| Waycross       | Savannah       | 166  |
| Syracuse       | Schenectady    | 195  |
| Pittsburgh     | Scranton       | 446  |
| Spokane        | Seattle        | 449  |
| Dallas         | shreveport     | 300  |
| Jackson        | shreveport     | 347  |
| Fargo          | Sioux Falls    | 389  |
| Omaha          | Sioux Falls    | 291  |
| Chicago        | South bend     | 140  |
| Grand rapids   | South bend     | 173  |
| Oklahoma city  | St. Louis      | 800  |
| Springfield    | St. Louis      | 157  |
| New York       | Stamford       | 59   |
| Gainesville    | tallahassee    | 230  |
| Jacksonville   | tallahassee    | 263  |
| Mobile         | tallahassee    | 389  |
| Albuquerque    | Tempe          | 706  |
| Las vegas      | Tempe          | 472  |
| Tucson         | Tempe          | 174  |
| Detroit        | Toledo         | 90   |
| South bend     | Toledo         | 234  |
| El Paso        | Tucson         | 508  |
| San Antonio    | Waco           | 290  |



|               |            |     |
|---------------|------------|-----|
| Jacksonville  | Waycross   | 124 |
| tallahassee   | Waycross   | 212 |
| Boston        | Westbrook  | 166 |
| Manchester    | Westbrook  | 139 |
| Denver        | Wichita    | 818 |
| Oklahoma city | Wichita    | 259 |
| Boston        | Worcester  | 64  |
| chicopee      | Worcester  | 80  |
| Rutland       | Worcester  | 206 |
| Cincinnati    | wytheville | 541 |
| Richmond      | wytheville | 386 |
| Washington    | wytheville | 473 |

## Topologia da rede

