

RENATO SILVA ROCHA

**RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO EM REDES ÓPTICAS
HIERÁRQUICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo E. Vieira Segatto

VITÓRIA
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

R672r Rocha, Renato Silva, 1984-
Relação custo-benefício em redes ópticas hierárquicas /
Renato Silva Rocha. – 2011.
70 f. : il.

Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Telecomunicações. 2. Redes ópticas. I. Segatto, Marcelo
Eduardo Vieira. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

RENATO SILVA ROCHA

**RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO EM REDES ÓPTICAS
HIERÁRQUICAS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 14 de Janeiro de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo E. V. Segatto - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Elias Silva de Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Renato Tannure Rotta Almeida
Instituto Federal de Educação C&T do Espírito Santo - IFES

“It always seems impossible until its done.”

(Nelson Mandela)

Dedico essa dissertação a minha família. Meus pais, Ronaldo e Terezinha, e meus irmãos, Ramon e Roberta.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador o professor Marcelo Segatto pelo apoio durante todo esse trabalho.

À Marcia Paiva, pela disponibilidade e suporte constante além de todas as revisões, que foram fundamentais durante todo o trabalho.

À minha família que esteve presente em todos os momentos.

Aos meus amigos que me ajudaram de alguma forma durante essa caminhada.

À FAPES pelo apoio financeiro concedido, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise de desempenho de redes ópticas com topologia em anéis hierárquicos baseada em dois parâmetros: a probabilidade de bloqueio e o custo. Para a análise do primeiro, utiliza-se um simulador de eventos discretos, o SEDRO. Enquanto que para o segundo, são explicados e utilizados dois modelos diferentes de forma a comparar a tendência apresentada por cada um e avaliar a influência da variação de alguns parâmetros da rede. São apresentados também os resultados dessa simulação para a análise das redes sobre diversos aspectos, como número de super nós e de comprimentos de onda. Dessa forma é possível analisar os modelos utilizados, para redes de diferentes tamanhos e configurações. A viabilidade da rede, o custo e o impacto da variação dos parâmetros de redes também são avaliados.

Abstract

In this work we present a performance analysis of hierarchical optical networks based on two parameters: the blocking probability and financial cost. For the earliest, we have used a discrete event simulator, known as SEDRO. For the latest, two different models are presented in order to compare the trend of each one and evaluate the influence when variations of some parameters of the network occur. We also present the simulations results for the network analysis on various aspects, such as, the number of super nodes and wavelenghts. Therefore, we can analyze the two models, for networks of different sizes and configurations. We have also evaluated the network feasibility, network cost and the impact of some network parameters on its performance.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas.....	xiii
Capítulo 1: Introdução.....	14
Capítulo 2: Introdução Teórica	17
2.1 Roteamento.....	18
2.2 Topologias de redes ópticas.....	20
2.3 Switches Ópticos	22
Capítulo 3: Modelos de custo.....	25
3.1 Introdução.....	25
3.2 Modelo 1.....	27
3.2.1 Enlaces.....	28
3.2.2 Nós.....	28
3.2.3 Exemplo.....	29
3.3 Modelo 2.....	32
3.3.1 Tamanho dos <i>switches</i>	33
3.3.2 Custo dos <i>switches</i>	34
3.3.3 Custo da Rede.....	35
3.3.4 Exemplo.....	36
Capítulo 4: Metodologia	38
4.1 SEDRO.....	38
4.2 Simulador de custo	41
4.2.1 Modelo 1.....	42
4.2.2 Modelo 2.....	43
Capítulo 5: Estudos de caso	45
5.1 Redes com 12 nós.....	46
5.1.1 Rede 3s12	46
5.1.2 Rede 4s12	50
5.1.3 Análise comparativa das redes com 12 nós.....	53
5.2 Redes com 24 nós.....	56
5.2.1 Rede 3s24	56
5.2.2 Rede 4s24	59

5.2.3 Redes 6s24 e 8s24	60
5.2.4 Análise comparativa das redes com 24 nós	63
Capítulo 6: Conclusão e trabalhos futuros	66
Referências Bibliográficas	69

Lista de Figuras

Figura 2.1	Multiplexação e Demultiplexação em um sistema WDM.	18
Figura 2.2	Topologias de redes ópticas.	20
Figura 2.3	Topologia de uma rede com 12 nós.	21
Figura 2.4	Switch optico com <i>fabric</i> eletrônico.	23
Figura 2.5	Switch óptico com fabric óptico.	23
Figura 3.1	Topologias com 12 nós – a) 3s12 b) 4s12.	27
Figura 3.2	Estrutura dos OXC. (a) 3-D, (b) Multi-estágio, e (c) 2-D.	34
Figura 4.1	Diagrama de blocos simplificado do SEDRO.	39
Figura 4.3	Separação dos eventos.	40
Figura 4.2	Diferença na probabilidade de bloqueio para rede com 9 nós	40
Figura 4.4	Probabilidade de bloqueio.	41
Figura 4.5	Custo segundo modelo 1.	43
Figura 4.6	Custo segundo modelo 2.	44
Figura 5.1	Topologia em anel hierárquico da rede 3s12.	47
Figura 5.2	Probabilidade de bloqueio da rede 3s12.	47
Figura 5.3	Custo segundo o modelo 1 para a rede 3s12.	48
Figura 5.4	Custo segundo o modelo 2 para a rede 3s12.	48
Figura 5.5	Topologia da rede 4s12.	50
Figura 5.6	Probabilidade de bloqueio da rede 4s12.	50
Figura 5.7	Custo segundo modelo 1 para a rede 4s12.	51
Figura 5.8	Custo segundo modelo 2 para a rede 4s12.	52
Figura 5.9	Probabilidade de bloqueio para as redes de 12 nós de 1HI 2HS.	53
Figura 5.10	Probabilidade de bloqueio da rede 3s24.	56
Figura 5.11	Custo segundo modelo 1 para a rede 3s24.	57
Figura 5.12	Custo segundo modelo 2 para a rede 3s24.	57
Figura 5.13	Probabilidade de bloqueio para a rede 4s24.	59
Figura 5.14	Custo segundo modelo 1 para a rede 4s24.	60
Figura 5.15	Custo segundo modelo 2 para a rede 4s24.	60
Figura 5.16	Custo segundo modelo 1 para a rede 6s24.	61
Figura 5.17	Custo segundo modelo 2 para a rede 6s24.	62
Figura 5.18	Probabilidade para as redes com 24 nós – 2HI 4HS.	63
Figura 5.19	Custo segundo modelo 1 para as redes com 24 nós com 2HI 4HS.	64
Figura 5.20	Custo segundo modelo 2 para as redes com 24 nós com 2HI 4HS.	65

Lista de Tabelas

Tabela 3.2	Custo segundo modelo 1 dos nós de grau 2 e grau 4.....	30
Tabela 3.3	Custo segundo modelo 1 dos enlaces.	31
Tabela 3.1	Função custo para as arquiteturas do <i>switch</i> OXC.	34
Tabela 5.1	Rede 3s12.....	49
Tabela 5.2	Rede 4s12.....	52
Tabela 5.3	Variação do custo segundo modelo 1 para redes com 12 nós – ($\times 10^4$).....	54
Tabela 5.4	Variação do custo segundo o modelo 2 para redes com 12 nós – ($\times 10^7$).	54
Tabela 5.5	Variação de H_{min} e t_{med} para redes com 12 nós.	54
Tabela 5.6	Comparação entre as redes 3s12 e 4s12.	55
Tabela 5.7	Rede 3s24.....	56
Tabela 5.8	Rede 3s24.....	58
Tabela 5.9	Rede 6s24.....	61
Tabela 5.10	Rede 8s24.....	62
Tabela 5.11	Rede com 24 nós.....	63
Tabela 5.12	Variação de H_{min} e t_{med} para redes com 24 nós para a configuração 2HI 4HS. ...	65

Capítulo 1: Introdução

A utilização de redes ópticas vem crescendo consideravelmente nos últimos anos. Um dos motivos se deve ao aumento do acesso à tecnologias de banda larga, como a ADSL e a FTTH. (SATO;HASEGAWA,2009). Dessa forma, analisar o custo financeiro ajuda a entender não só a viabilidade da criação da rede como também as possíveis alterações para a melhoria do desempenho e o impacto dessa variação com relação ao custo.

O surgimento da tecnologia de multiplexação por comprimento de onda (WDM) fez com que essa utilização de redes ópticas aumentasse. Além de possibilitar a implementação de vários canais de comunicação na mesma fibra óptica em diferentes comprimentos de onda, esta tecnologia permite a implementação de redes com roteamento de tráfego por comprimentos de onda. As vantagens desse tipo de rede decorrem de sua infra-estrutura flexível, com elevada capacidade e confiabilidade na transmissão de dados. (LIMA,2010)

A tecnologia WDM permite alta velocidade e alto volume de transmissão de dados por redes de fibra óptica através da multiplexação de várias portadoras ópticas usando diferentes comprimentos de onda (KITANI;et al,2008). No projeto de uma rede totalmente óptica, os projetistas enfrentam uma escolha: ter mais fibras ou aumentar o número de comprimentos de onda por fibra. Ainda que qualquer uma das escolhas pode ser usada para suportar novas conexões, uma aumenta o custo do enlace e a outra aumenta o custo do nó. (LIU;TOBAGI,2008)

As redes ópticas podem ser organizadas em diferentes formas, conhecidas como topologia. Cada uma apresenta diferentes benefícios e possibilidades de roteamento. Na topologia em anéis hierárquicos que é tema deste trabalho, esse processo é facilitado pelas possibilidades de caminhos nas quais o roteamento pode acontecer, pela forma em anel. Ele pode acontecer nos dois sentidos, horário e anti-horário, e através de diversos anéis(SHI; FONSEKA, 1995). Ademais, os super nós, que são os nós que conectam os diferentes anéis, também apresentam importante papel nesse roteamento.

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho das redes em anéis hierárquicos em suas diferentes configurações. Para isso, além da análise da probabilidade de bloqueio é utilizado um novo parâmetro: o custo financeiro.

As alterações feitas no simulador SEDRO (Simulador de Eventos Discretos para Redes Ópticas) (MAIOLI, 2007), que foram feitas de forma específica para a topologia em

anéis hierárquicos, permitiram que fosse retirada a restrição de continuidade do comprimento de onda quando o tráfego é roteado pelo super nó. Nesse caso, o tráfego pode ser roteado por diferentes comprimentos de onda em cada hierarquia na qual ele passa. No capítulo 2 esse tema é explicado de maneira mais aprofundada. Com esse simulador é possível conhecer a probabilidade de bloqueio da rede, de acordo com sua topologia e o número de comprimentos de onda disponíveis. (ROCHA,2009)

A partir do estudo dos modelos para calcular o custo financeiro de redes ópticas foi possível optar por dois tipos diferentes que são apresentados neste trabalho. Dessa forma, a análise do custo financeiro é feita de duas maneiras distintas, levando em consideração alguns parâmetros diferentes. O primeiro modelo, mais simples, o cálculo é feito através do custo de nós e enlaces existentes (SINCLAIR,1995); Enquanto que o segundo modelo se baseia no custo dos equipamentos utilizados na rede (GUAN;CHAN,2009).

Com os resultados apresentados, é possível analisar o desempenho da rede de acordo com a probabilidade de bloqueio e o custo financeiro da rede simulada. A probabilidade de bloqueio, encontrada como resposta para a topologia estudada, é fundamental na análise do custo financeiro das redes ópticas. Através desse resultado, podemos discutir a importância de algumas mudanças de configuração na rede, baseada não somente no custo, mas também em um parâmetro de desempenho de redes, que é a probabilidade de bloqueio. Além disso, é possível analisar como a variação do número de nós, do número de super nós e do número de comprimentos de onda, entre outros, influencia o desempenho da rede. Ademais, é possível comparar os dois modelos de custo estudados, não pelo valor absoluto, mas pela tendência que mostram para as redes simuladas.

Este estudo é feito exclusivamente com redes com topologia em anéis hierárquicos concentrando as simulações em redes com dois tamanhos diferentes: 12 e 24 nós. Para a primeira, duas topologias diferentes são estudadas, uma com 3 e outra com 4 super nós. Para a segunda, foi possível simular redes com 3, 4, 6 e 8 super nós. A partir dessas simulações é possível analisar o impacto da variação dos parâmetros citados anteriormente, como número de nós e número de comprimentos de onda.

A principal contribuição desse trabalho analisando o custo de uma rede óptica é avaliar a viabilidade de existir uma rede do tipo que está sendo estudada. Ademais, é possível propor alterações baseado nos dois parâmetros estudados, avaliando a viabilidade de cada mudança e a influência no resultado.

A estrutura desse trabalho é a seguinte. O capítulo 2 traz uma introdução teórica sobre os principais temas envolvidos neste trabalho, como a tecnologia WDM, as topologias de rede

e os equipamentos envolvidos neste estudo. No capítulo 3 são explicados os diversos tipos de modelos de custo que foram estudados e mais especificamente os dois modelos utilizados neste trabalho. Na sequência, o SEDRO é apresentado, além dos programas feitos para a análise do custo financeiro.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos para as diferentes simulações que foram feitas. Desse modo, é possível comparar os modelos de custo, as redes e a influência de cada variável, analisando assim, as redes simuladas. Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões desse trabalho além da perspectiva de futuros trabalhos relacionados.

Capítulo 2: Introdução Teórica

Redes ópticas, nas quais os dados são representados por sinais de luz e transmitidos através de fibra óptica são mais rápidas que as redes de comunicações tradicionais, onde os dados são representados por sinais elétricos e transmitidos por cabos. (MURTHY;GURUSAMY,2002). A capacidade de transmissão em alta velocidade está entre os grandes benefícios do advento das redes ópticas.

A propagação de luz em materiais dielétricos transparentes vem sendo estudada durante séculos. Entretanto, somente nas últimas décadas é que se descobriu para propagação de luz em uma fibra óptica, diversas aplicabilidades em comunicações e no campo médico. Especificamente em comunicações ópticas a tecnologia com fibra a utilização vem de poucas décadas. Atualmente existem diversas fibras conectando cada continente e cada país, por terra ou por mar. Sem essa rede óptica, os serviços de comunicações existentes hoje e os que futuramente serão oferecidos não seriam possíveis. (KARTALOPOULOS,2008)

Um dos primeiros avanços tecnológicos foi a capacidade de transportar múltiplos canais de luz em uma única fibra. Cada comprimento de onda é transmitido em uma frequência óptica diferente e multiplexada em uma única fibra, fazendo surgir assim a multiplexação por divisão do comprimento de onda (WDM), apresentada na Figura 2.1. Os primeiros sistemas WDM suportavam menos que dez comprimentos de onda em uma única fibra. Desde 2000, esse número teve um grande crescimento, saltando para mais de 100 comprimentos de onda por fibra, acarretando em um enorme crescimento da capacidade da rede. A capacidade de um único comprimento de onda vem crescendo de forma acelerada. Na década de 90, a máxima capacidade era de 2.5Gb/s. Desde então, a evolução vem sendo contínua com a capacidade se aproximando dos 100Gb/s por comprimento de onda (SIMMONS, 2008). O aumento da capacidade e do número de comprimentos de onda por fibra, fez com que o uso dessa tecnologia aumentasse.

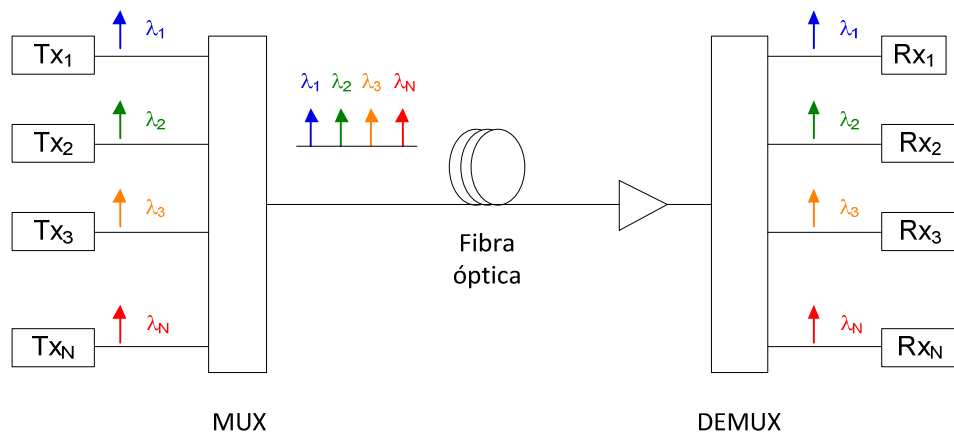


Figura 2.1 Multiplexação e Demultiplexação em um sistema WDM.

O advento dos amplificadores ópticos, em especial os amplificadores com fibras dopadas com Erbium - EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), permitiu o desenvolvimento comercial dos sistemas WDM provendo uma forma de amplificar todos os comprimentos de onda ao mesmo tempo, não importando as taxas de bits individuais ou o nível de potência. Antes da invenção do EDFA, os efeitos da perda óptica eram compensados a cada poucas dezenas de quilômetros por um regenerador eletrônico (MURTHY;GURUSAMY,2002). Dessa forma, transmissões de longa distância necessitavam de mais equipamentos e com isso o custo associado era maior.

O sistema WDM suporta uma largura de banda consideravelmente maior do que as tecnologias anteriores (superando os Tbps), além de diversos serviços (existentes e novos a surgir) e também diferentes protocolos (SDH/SONET, ATM, IP, etc.). Nenhuma outra tecnologia de comunicação consegue competir com essa no quesito custo-eficiência. Por isso, o uso de fibra vem crescendo de maneira significativa e se aproximando do uso residencial.

Diversos efeitos como a atenuação, a dispersão e a polarização, afetam a propagação de luz em uma fibra, e com isso, no projeto de fabricação da fibra eles precisam ser considerados no projeto de redes ópticas para que seus efeitos sejam minimizados.

2.1 Roteamento

Com o aumento do uso das redes ópticas e da complexidade das mesmas não é mais viável fazer o projeto de uma rede de forma manual. Por isso, os algoritmos de roteamento surgiram para que seja possível planejar uma rede óptica em um curto período de tempo. O número de nós da rede, a quantidade de tráfego na rede e o número de comprimentos de onda

em cada fibra são parâmetros que precisam ser considerados no desenvolvimento dos algoritmos de roteamento.

Roteamento é o processo de seleção do caminho através da rede para a demanda de tráfego. Normalmente diversos possíveis caminhos para que o tráfego vá da origem para o destino existem na rede. Na seleção da rota existem diversas variáveis a serem consideradas. Um fator importante é o custo, dessa forma a rota selecionada deve requerer o mínimo custo quando possível. Além do custo, o comprimento da rota e o número de saltos também são fatores a serem considerados. Entretanto a escolha pelo menor caminho ou rota com o menor número de enlaces nem sempre é a melhor opção. Pensando na capacidade total da rede, pode ser escolhida outra rota para que não afete os possíveis futuros tráfegos dessa rede.

Um algoritmo muito conhecido, e utilizado neste trabalho, é o algoritmo de Dijkstra, onde a entrada é a topologia da rede e o par origem destino. Ele busca o menor caminho para a conexão, assumindo que existe uma rota. Esse tipo de algoritmo escolhe o melhor caminho desconsiderando o tráfego futuro.

Em (ZULKIFLI,2009) é feita uma análise completa sobre o desempenho da rede a partir dos algoritmos de roteamento existentes. Em primeiro lugar, é feita uma comparação analítica de cada um dos modelos e na sequencia são apresentados os resultados esperados para uma rede ideal e o que acontece nessa rede real, com relação a probabilidade de bloqueio para cada algoritmo utilizado.

A alocação de comprimento de onda é uma parte importante do planejamento de uma rede. Existem diversos esquemas para essa alocação, entre eles: First-Fit, Most-Used e o Relative Capacity Loss (LC). A diferença de desempenho entre eles é bem pequena (SIMMONS, 2008). Por isso, neste trabalho é utilizado o First-Fit, que é o mais simples entre os citados. Nesse algoritmo cada comprimento de onda é identificado com um índice, variando de 1 ao número máximo de comprimentos de onda que é suportado pela fibra. No momento em que um comprimento de onda é necessário, o algoritmo inicia a busca de um disponível a partir do menor índice.

A restrição de continuidade do comprimento de onda pode representar uma dificuldade para o desempenho das redes ópticas. Nesse caso, para a conexão ocorrer entre um par de nós é necessário que o mesmo comprimento de onda esteja disponível em toda a rota.

2.2 Topologias de redes ópticas

Para os problemas de roteamento e tráfego em redes ópticas, a topologia da rede é uma característica que influencia diretamente na probabilidade da conexão ocorrer. Numa rede óptica, após uma requisição de conexão entre dois nós, se busca uma rota disponível, que é o caminho a ser utilizado para o transporte da informação do nó de origem ao nó de destino (ROCHA,2009).

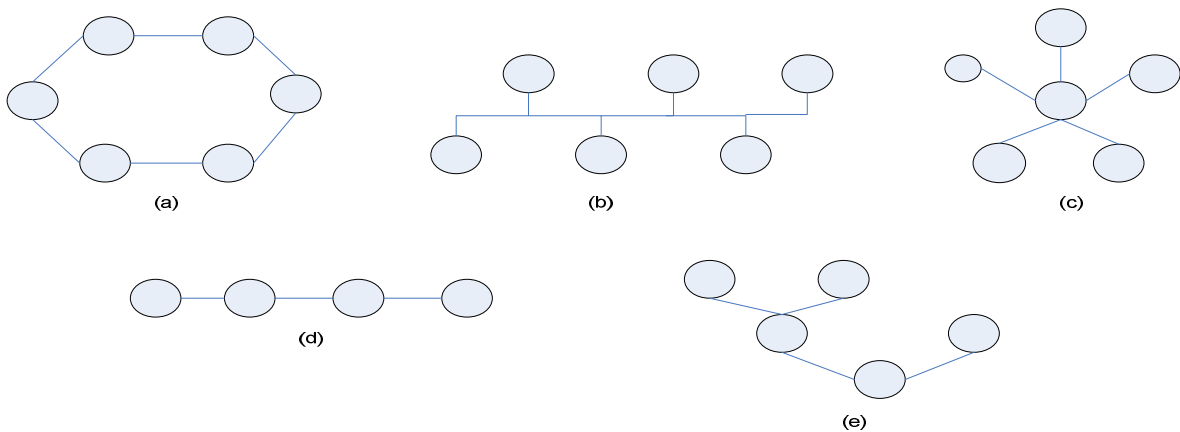


Figura 2.2 Topologias de redes ópticas.

A topologia da rede nos apresenta como os nós estão conectados. Na Figura 2.2 são representados 5 tipos diferentes de topologias, são eles: anel, barramento, estrela, linha e em árvore. Cada topologia possui diferentes pontos a serem considerados, como proteção, sincronização, desempenho, custo, entre outros fatores.

A topologia mais simples é a ponto a ponto, que conecta dois locais distantes geograficamente. Por outro lado, a mais complexa é a topologia em malha, que oferece muitos caminhos e rotas alternativas evitando assim o congestionamento do tráfego. A rede em malha necessita de uma tecnologia mais complexa e protocolos mais caros para gerencia do tráfego. Essa topologia é usualmente utilizada nos *backbones* atualmente.

Os círculos nas figuras deste trabalho são chamados de nós e a conexão entre dois nós é conhecido como enlace. O enlace é mostrado por apenas uma linha, mas eles podem ter diferentes números de comprimentos de onda, também conhecidos como canais. Neste trabalho eles são bidirecionais, isto é, o tráfego pode ir nas duas direções. A rede óptica é o arranjo formado pelos nós e enlaces. O termo conexão é utilizado para representar o caminho alocado para a transmissão do tráfego

A topologia em anéis hierárquicos é definida como conjuntos de nós interligados em anéis e pelo menos um anel de hierarquia superior para a interligação desses conjuntos, como pode ser visto na Figura 2.3:

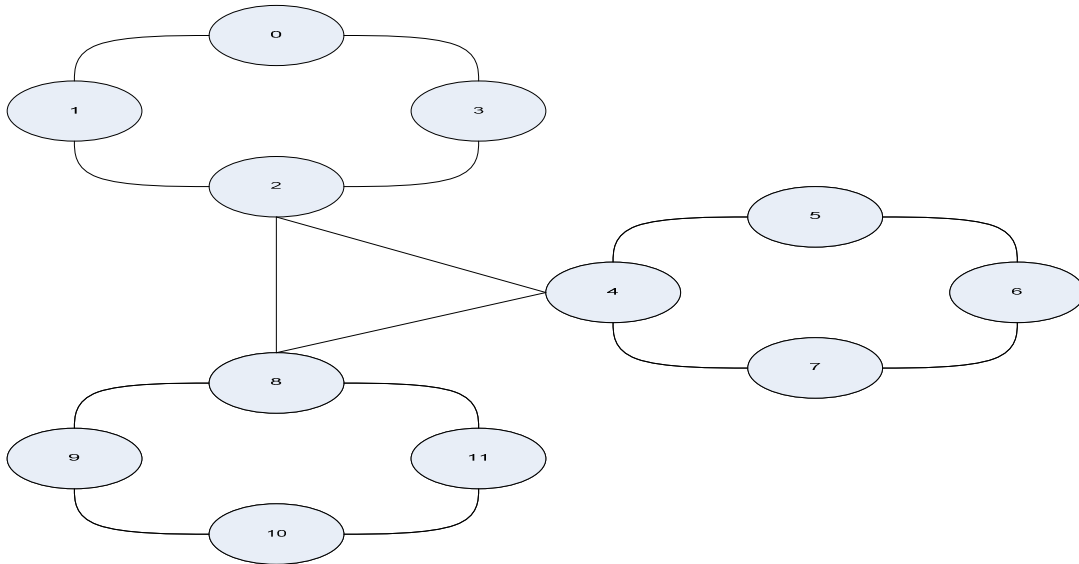


Figura 2.3 Topologia de uma rede com 12 nós.

A Figura 2 apresenta uma possível topologia em anel hierárquico (SHI; FONSEKA, 1995), que tem um total de 12 nós, localizados em 3 diferentes anéis. Os nós 2, 4 e 8 são chamados de super nós e a transmissão de qualquer informação entre diferentes anéis de hierarquia inferior (HI) necessariamente tem que passar por um desses nós. Esses nós formam a hierarquia (HS) superior dessa topologia.

A principal vantagem da arquitetura de redes em anel é sua tolerância a falhas e a facilidade de implementação de roteamento. É possível restabelecer todo o tráfego no caso de uma única falha com apenas uma simples mudança de orientação de direção do fluxo (LAVAGNOLI, 2008).

A topologia em hierarquia oferece diversas possibilidades para o roteamento do tráfego. Na Figura 2.3 é possível ver que uma conexão entre o nó 1 e o nó 2 pode ocorrer de diversas formas e com diferentes números de saltos. Dessa forma, a topologia em anel hierárquico apresenta grande vantagem em relação as outras topologias. Como se pode notar, o roteamento pode ser feito em diferentes sentidos e no caso de conexões inter-anéis, pode passar por um número considerável de nós. Caso o comprimento de onda não esteja disponível por onde o tráfego está sendo roteado, essa conexão não ocorrerá, ou seja, será bloqueada.

2.3 Switches Ópticos

O aumento das redes ópticas acarretou um aumento na quantidade de equipamentos envolvidos o que gera um desafio para o planejamento das redes ópticas baseados em diversos aspectos como: consumo de potência, dissipação de calor, espaço físico entre outros. O desenvolvimento da tecnologia de *optical-bypass* reduziu grande parte do processamento eletrônico requerido, podendo dessa forma o sinal permanecer por todo ou quase todo caminho no domínio óptico.

Quando o tráfego que entra no nó no domínio óptico é convertido para o domínio elétrico para em seguida retornar ao óptico tem-se uma arquitetura conhecida como O-E-O. Nessa arquitetura todo o tráfego, entrando e saindo do nó, é processado por um *transponder* WDM. Em geral, um nó de grau N vai possuir N terminais ópticos.

A arquitetura O-E-O apresenta algumas vantagens, entre elas: a conversão de domínio faz com que aconteça uma “limpeza” do sinal, pois o sinal óptico que é degradado enquanto é transmitido na fibra, passa por uma regeneração conhecida como 3-R (*re-shaping, re-amplification, retiming*). A possibilidade de monitorar o desempenho do sinal que está sendo transmitido em cada nó da rede também é uma vantagem. Além disso, como a transmissão é feita sempre em 1310 nm, a arquitetura é aberta para uma competição entre diferentes fabricantes.

Apesar dessas vantagens, outros quesitos também precisam ser levados em consideração. Com o processamento acontecendo em cada nó, e com o crescimento da rede, o número de *transponders* requeridos pode ser muito alto o que elevaria o custo da rede. Além disso, o espaço físico para os equipamentos e o calor dissipado pode apresentar um desafio para a viabilidade da rede além também da incompatibilidade entre as tecnologias com diferentes taxas, como a de 10Gbit/s e a de 40Gbit/s

Os *switches* ópticos, também conhecidos como *cross connect* óptico, apesar de terem esse nome não significa que suportem a passagem do sinal somente no domínio óptico. Por exemplo, existe *switch* óptico baseado na tecnologia O-E-O. Dessa forma, cada porta do *switch* é equipado para converter o sinal óptico que chega em um sinal eletrônico. Nesse caso, os desafios existem com relação a quantidade de eletrônicos requeridos e do custo. Para esse equipamento o *switch fabric* é eletrônico, como apresentado na Figura 2.4.

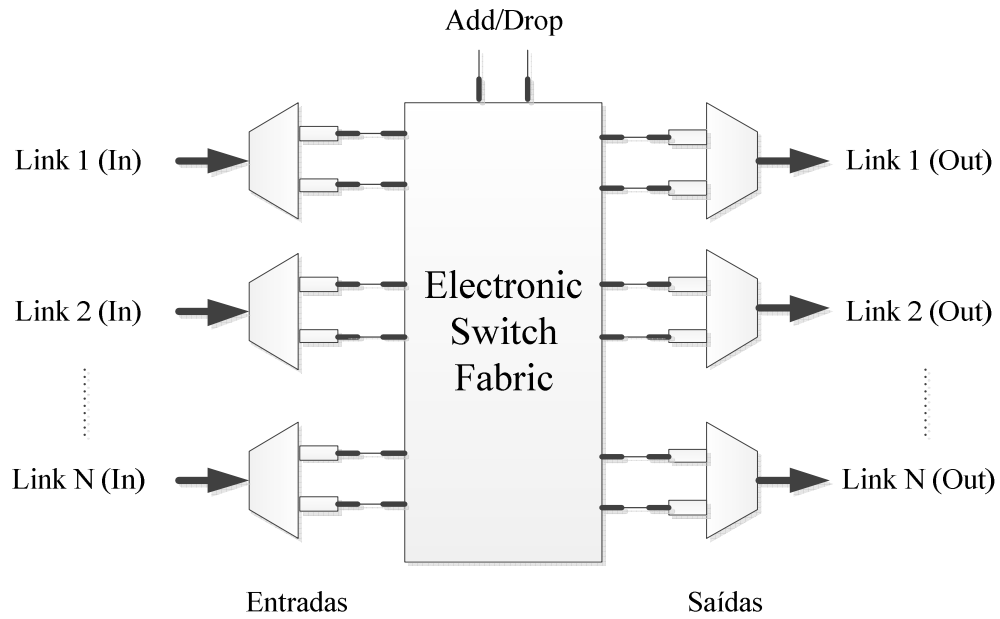


Figura 2.4 Switch óptico com *fabric* eletrônico.

No caso do *switch* que suporta *optical bypass*, o *switch fabric* é óptico, como visto na Figura 2.5. As dificuldades para o uso desse tipo de equipamento estão na sua complexidade e no seu custo. Apesar de não precisar de transceptores por suportar *optical bypass* o número de portas não é menor do que o *switch* da arquitetura O-E-O. Assim, o desafio do tamanho também continua existindo.

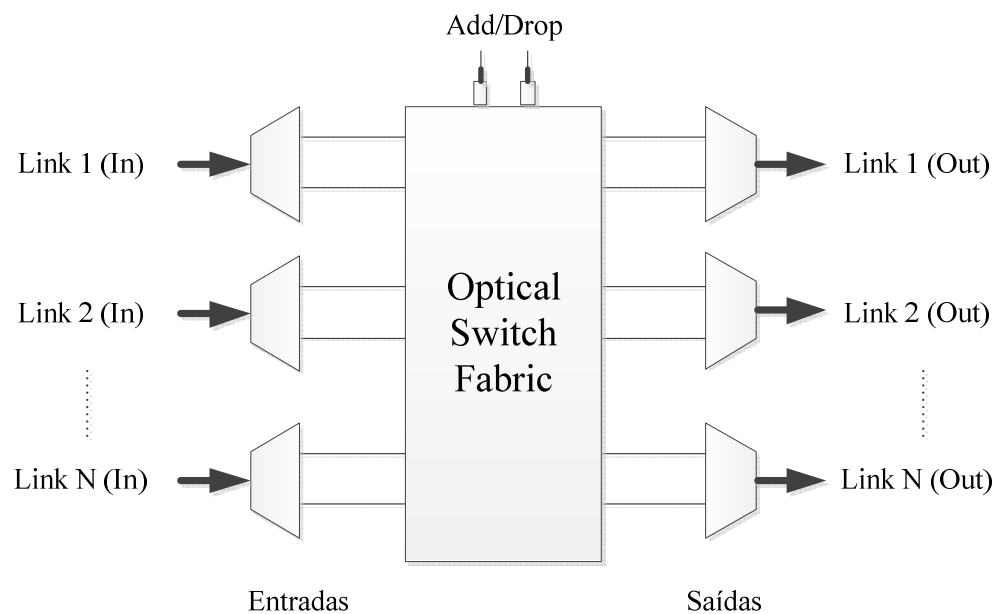


Figura 2.5 Switch óptico com *fabric* óptico.

O tipo de equipamento a ser utilizado influencia diretamente no custo da rede. Em (SIMMONS,2008) é apresentado um estudo sobre o custo financeiro de uma rede e dos equipamentos envolvidos. Os resultados de um estudo econômico dependem também de outros fatores, como a topologia da rede e o modelo de crescimento do tráfego. Além disso, nesse caso, o estudo é feito a partir do custo relativo, pegando um equipamento como base e com os outros variando de acordo com esse valor base. Dessa forma, a comparação entre redes diferentes acontece pela tendência do custo e não por seu valor absoluto. Ademais, a tecnologia utilizada e o alcance óptico da rede é variado para apresentar os diferentes custos envolvidos.

O crescente uso de redes ópticas faz com que o estudo do custo associado às diversas funcionalidades seja fundamental para analisar a viabilidade da rede e para avaliar as possíveis melhorias.

Capítulo 3: Modelos de custo

3.1 Introdução

Para a análise de custo financeiro das redes ópticas foram estudados diferentes artigos buscando conhecer as maneiras existentes atualmente para esse cálculo e aquela que se encaixa melhor para as redes ópticas hierárquicas.

Em (PINTO;PAVAN;MORAIS,2009) é apresentado um modelo para estimar o CapEx (*Capital Expenditures*) em uma rede óptica multi-camada permitindo que o cálculo seja feito de forma rápida. Esse valor usualmente é encontrado através de ferramentas numéricas, mas esse processo demanda muito tempo, pois quanto maior a rede mais tempo demora a encontrar o valor de CapEx. O modelo de custo, nesse caso, é baseado na quantidade total de componentes da rede e não na quantidade de componentes em cada nó ou enlace individualmente.

Dentre os parâmetros utilizados por esse modelo estão o grau do nó, o comprimento do enlace e quantos *OLA*(Atenuador Óptico) são necessários para a rede por enlace. Além disso, da topologia da rede, são encontrados o número médio de saltos e a quantidade de canais requeridos para o transporte de uma dada matriz de tráfego. Dependendo da quantidade de informação disponível, algumas aproximações podem ser feitas para se encontrar o custo da rede.

Em (CHEN;TOBAGI,2009), os autores buscam determinar qual é a menor quantidade de *switching* nós necessária para prover conectividade fim-a-fim entre todos os pares de nós da rede. Para isso, eles também analisam o custo dos equipamentos utilizados na rede. No tipo de rede considerada nesse artigo, o custo da rede vem principalmente de 3 tipos de equipamentos: os equipamentos para *switch* óptico e elétrico além dos *transceivers*. Logo, o modelo de custo é baseado na quantidade de equipamentos utilizados e no preço de cada um.

Uma forma de planejar redes ópticas é apresentada em (SCHEFELL,2002) de forma que essa rede suporte o que é requerido e com um custo reduzido. O objetivo é minimizar o custo total dos equipamentos. No artigo é apresentado um algoritmo para que seja possível

alcançar esse objetivo. Esse código é baseado no número total de nós da rede, no conjunto de comprimentos de onda disponíveis além da distância física entre o par origem-destino.

A partir do custo dos enlaces e dos nós de uma dada topologia, é possível encontrar o custo de rede. Esse modelo é apresentado em (SINCLAIR,1995). Esse trabalho tem objetivo de otimizar o custo de uma rede já existente. Os parâmetros que influenciam nesse caso são: o comprimento físico dos enlaces, a capacidade de transmissão dos enlaces e a capacidade dos nós. Esse modelo apresenta um grau de complexidade baixo para cálculo e implementação.

Um modelo, mais complexo que o (SINCLAIR,1995), baseado nos *switches* presentes na rede é demonstrado em (GUAN;CHAN,2009) e (GUAN,2007). Nesse modelo, o custo da rede é obtido através do custo da conexão de fibra óptica e do equipamento utilizado. Para cada tipo de equipamento existe uma função de custo que pode depender também das suas funcionalidades. Além disso, a taxa de transmissão, a distância média mínima entre os pares de nós e a quantidade de nós, são variáveis que influenciam nesse modelo. Esses artigos demonstram um modelo utilizando somente um tipo de *switch* ou OEO ou OXC. Neste trabalho calculamos também o custo de uma rede que utiliza os dois tipos de *switch*. Nesse caso, os nós da hierarquia superior utilizam o *switch* OEO enquanto na hierarquia inferior é utilizado o OXC.

A partir do estudo desses modelos existentes, foram selecionados dois (SINCLAIR,1995) e (GUAN;CHAN,2009) que, a princípio, pareciam mais condizentes para o nosso estudo e que poderiam ser implementados para a análise do custo das redes, de acordo com os diferentes parâmetros analisados.

Como os modelos apresentados nesses dois artigos se diferem bastante, não é possível fazer uma comparação direta entre eles com relação ao custo das redes estudadas. Entretanto, é possível comparar o comportamento do custo em cada topologia na medida em que se alteram as variáveis da rede, como o número de super nós e o número de canais.

Além da descrição sobre os modelos de custo utilizados, as próximas seções desse capítulo apresentam resultados para as duas redes mostradas na Figura 3.1. A partir do estudo desses dois modelos é possível compará-los, além de analisar os parâmetros da rede e o impacto de sua variação para o custo financeiro. Assim, foram escolhidas duas topologias, de uma rede de 12 nós, para a análise desses modelos. Uma com 3 super nós, enquanto a outra com 4. Com isso, em cada seção é possível analisar o comportamento do custo para cada tipo de modelo comparando as duas topologias, e por fim, comparar os dois modelos.

Para o estudo das redes em hierarquia, objeto de estudo deste trabalho, consideramos em todos os casos que o número de comprimentos de onda na hierarquia superior (λ_{HS}) é maior que na hierarquia inferior (λ_{HI}).

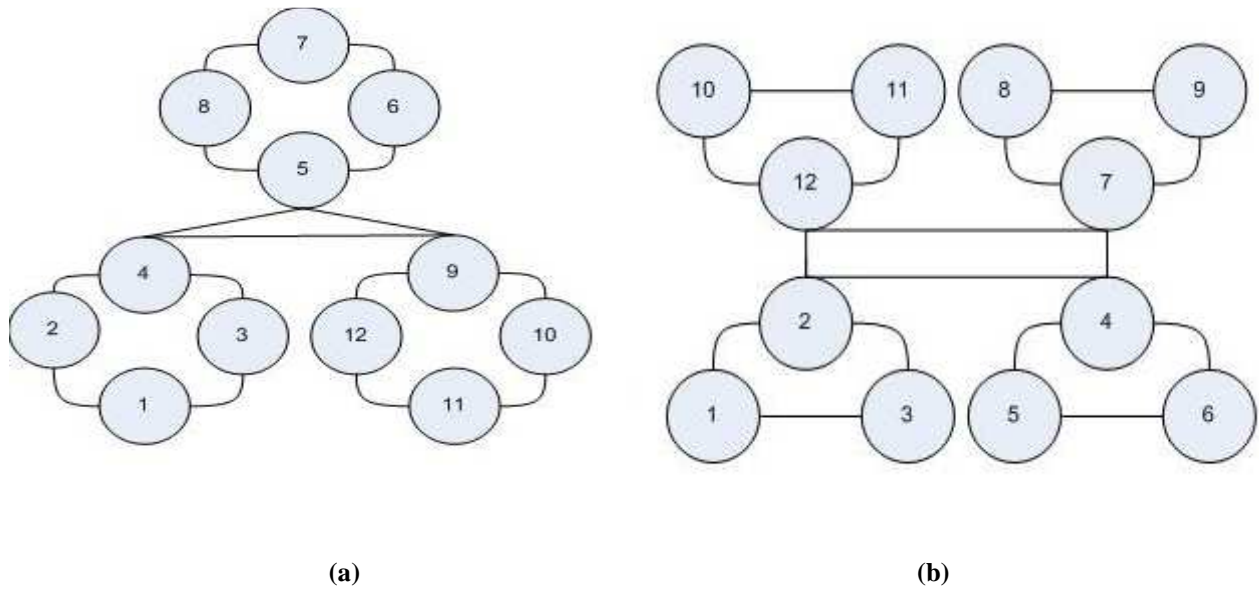


Figura 3.1 Topologias com 12 nós – a) 3s12 b) 4s12.

3.2 Modelo 1

Em (SINCLAIR,1995) é proposto um modelo para minimizar o custo de uma topologia com o intuito de otimizar o custo de uma rede óptica real, nesse caso a rede óptica europeia. Para essa otimização o autor utiliza um tipo de modelo de custo financeiro da rede além de um algoritmo genético para encontrar as possíveis melhores topologias.

Para determinar o custo de uma dada topologia, o modelo apresentado nesse artigo é dividido em duas partes. Em uma, é analisado o custo dos enlaces da rede, enquanto que na outra, é analisado o custo dos nós dessa mesma rede. Dessa forma, com a soma dos custos obtidos nessas duas partes obtém-se o valor total do custo da rede.

Para a utilização desse modelo de custo algumas informações da rede precisam ser conhecidas previamente. É necessário saber, por exemplo, a granularidade do canal, isto é, a sua taxa de transmissão, o tamanho físico dos enlaces, em quilômetros, e o número de canais. Com essas informações e outras variáveis como o número de nós e enlaces, torna-se possível a utilização do modelo, podendo assim calcular o custo dos enlaces e dos nós de uma dada topologia e conseqüentemente da rede toda.

3.2.1 Enlaces

O cálculo do custo financeiro dos enlaces é baseado no tamanho do enlace (L), em quilômetros, e na sua capacidade (V_{ij}). Esse parâmetro é obtido através da multiplicação do número total de comprimentos de onda no enlace (λ_{ij}) pela granularidade do canal (G). Para um enlace, entre o nó i e o nó j , temos a seguinte expressão para o cálculo da capacidade:

$$V_{ij} = \lambda_{ij} \times G \quad (3.1)$$

Com o resultado de (3.1) é possível calcular o custo desse enlace específico. Analogamente, pode ser feito para todos os outros enlaces da rede.

$$C_{ij} = L \times V_{ij} \quad (3.2)$$

Como visto pelas equações (3.1) e (3.2), para o cálculo do custo de um enlace devem ser conhecidos 3 variáveis da rede referente ao enlace: L, λ_{ij}, G . Dessa forma, somando o custo de todos os enlaces da rede é encontrado o custo total dos enlaces.

3.2.2 Nós

Assim como para o cálculo do custo dos enlaces, no caso dos nós também o primeiro passo é encontrar a capacidade do mesmo. A capacidade do nó é simplesmente a soma da capacidade de todos os enlaces que estão conectados a esse nó ($\sum \lambda_i$) como apresentada na Equação 3.3 abaixo.

$$V_{i=} = \sum \lambda_i \times G \quad (3.3)$$

Em seguida, calcula-se a distância efetiva do nó. A Distância efetiva do nó foi utilizada como forma de representar o custo dos nós em uma rede óptica equivalente em termos de distância. Esse parâmetro relaciona o custo com a distância geográfica pela qual o tráfego é transportado, podendo passar ou não por mais nós intermediários. Ele é calculado da seguinte maneira:

$$N_i = E + n_i F \quad (3.4)$$

Onde n_i é o grau do nó i , isto é, o número de enlaces bi-direcionais ligados a ele. As constantes E e F foram dadas como 200km e 100km respectivamente para a rede estudada em (SINCLAIR,1995). A distância efetiva do nó aumenta com o crescimento da complexidade do *switch*.

Conhecendo a capacidade e a distância efetiva do nó torna-se possível calcular o custo financeiro, segundo a seguinte expressão:

$$C_i = 0,5N_i V_i \quad (3.5)$$

Assim, somando o custo financeiro de cada nó da rede é possível encontrar o custo total dos nós. É possível encontrar o custo total da rede, através da soma dos custos de todos os enlaces e nós, como expresso na equação(3.6). Assim, com o resultado do custo da rede, é possível analisar qual teve um maior impacto no custo, nó ou enlace, além do impacto das variáveis calculadas.

$$\text{Custorede} = \text{custoEnlaces} + \text{custoNos} \quad (3.6)$$

3.2.3 Exemplo

Para a análise de custo baseada no modelo 1, para as topologias apresentadas na Figura 3.1, é necessário conhecer as características da rede com relação ao número de enlaces e nós. Nesse caso, a primeira topologia, possui 15 enlaces e 12 nós, sendo 3 de grau 4 e os outros 9 de grau 2. Na segunda topologia, existem 16 enlaces e 12 nós também, porém nesse caso, são 4 nós de grau 4 e 8 nós de grau 2.

Além disso, são feitas algumas considerações para o cálculo do custo segundo o modelo 1 para essas duas topologias. Assumimos que a granularidade é igual em todos os enlaces, que na hierarquia superior existe o dobro de comprimento de ondas da hierarquia inferior, nesse caso 2 e 1 respectivamente, e o comprimento do enlace na hierarquia superior (HS) também é o dobro do da hierarquia inferior (HI). Assim, para o custo C_{ij} de um enlace do nó i para o nó j temos as seguintes equações:

$$C_{ij} = L \times \lambda_{HI} \times G \quad (3.16)$$

$$C_{ij} = 2L \times \lambda_{HS} \times G$$

Para o cálculo dos nós temos as expressões mostradas na Tabela 3.1, .

Tabela 3.1 Custo segundo modelo 1 dos nós de grau 2 e grau 4.

Grau 2	Grau 4
$N_i = 400km$	$N_i = 600km$
$V_i = 2L \times \lambda_{HI} \times G \text{ Gbit/s}$	$V_i = 2L \times \lambda_{HI} \times G + 4L \times \lambda_{HS} \times G \text{ Gbit/s}$
$C_i = 400L \times \lambda_{HI} \times G \text{ Gbit} * Km/s$	$C_i = 600L \times G(\lambda_{HI} + 2\lambda_{HS}) \text{ Gbit} * Km/s$

O custo total dos enlaces é encontrado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \sum C_{ij} &= SN \times C_{ij}(HS) + N \times C_{ij}(HI) \\ &= SN \times 2L \times \lambda_{HS} \times G + N \times L \times \lambda_{HI} \times G \\ &= L \times G(SN \times \lambda_{HS} + N \times \lambda_{HI}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

O custo total dos nós pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \sum C_i &= SN \times C_i(g4) + (N - SN)C_i(g2) \\ &= SN \times C_i(g4) + N \times C_i(g2) - SN \times C_i(g2) \\ &= 200L \times G[(2N + SN)\lambda_{HI} + 6SN \times \lambda_{HS}] \end{aligned} \quad (3.18)$$

A partir do conhecimento sobre as topologias e das expressões de custo para nós e enlaces é possível calcular o custo para as duas topologias desse exemplo. A Tabela 3.2 apresenta o cálculo do custo do enlace para cada uma das redes, que nos demonstra que o enlace na HS custa 4 vezes mais que o enlace na HI.

Tabela 3.2 Custo segundo modelo 1 dos enlaces.

3s 12	4s 12
HS $\rightarrow C_{ij} = 3 \times 2L \times \lambda_{HS} \times G$	HS $\rightarrow C_{ij} = 4 \times 2L \times \lambda_{HS} \times G$
HI $\rightarrow C_{ij} = 12 \times L \times \lambda_{HI} \times G$	HI $\rightarrow C_{ij} = 12 \times L \times \lambda_{HI} \times G$

No cálculo do custo dos nós da rede, nota-se que para os super nós é preciso diferenciar os enlaces que estão na HS com os que estão na HI, pois estes têm parâmetros diferentes. Para um super nó dessas topologias, com grau 4, temos o seguinte custo associado em cada hierarquia:

$$N_i = 200 + 4 \times 100 = 600km$$

$$V_i = 2C_{ij}(HI) + 2C_{ij}(HS) = 10L \times \lambda \times G \text{ Gbit/s}$$

$$C_i = 0,5 \times N_i \times V_i = 3000L \times \lambda \times G \text{ Gbit} * Km/s$$

Analogamente, o custo de um nó de grau 2 equivale a $400L \times \lambda \times G$. Por esses resultados nota-se que custo de um nó na HS é 7,5 vezes maior que na HI. Assim é possível encontrar o custo total dos nós para essas duas redes. A rede 3s12 tem 3 nós de grau 4 e 9 de grau 2, enquanto que a rede 4s12 tem 4 nós de grau 4 e 8 de grau 2. Dessa forma o custo total dos nós é:

$$\mathbf{3s12} \rightarrow 12600L \times \lambda \times G$$

$$\mathbf{4s12} \rightarrow 15200L \times \lambda \times G$$

Com o resultado do custo dos enlaces e dos nós das redes é possível encontrar o custo total segundo esse modelo, através da soma desses custos. Dessa forma, a rede 3s12 tem um custo total de $12624L \times \lambda \times G$ e a rede 4s12 de $15228L \times \lambda \times G$. Assim, pelos resultados obtidos para essas topologias segundo o modelo 1, a topologia 1 tem um custo menor que a 2. Pode-se notar que o custo total dos enlaces, quando comparado com o custo total dos nós, é praticamente irrelevante no custo total da rede.

3.3 Modelo 2

Em (GUAN;CHAN,2009), é apresentado outro modelo para o cálculo do custo financeiro de uma rede óptica. O objetivo do artigo é encontrar uma topologia otimizada para redes WDM em áreas metropolitanas considerando o seu valor financeiro.

Para a utilização do modelo apresentado nesse artigo é necessário conhecer alguns parâmetros da rede, como o número total de nós (N), chamado neste trabalho também de tamanho da rede, o maior grau da rede (Δ), o diâmetro (D), a distância média mínima (H_{min}) e o número médio de comprimentos de onda (t_{med}).

O grau de um nó é definido pelo número de enlaces conectados a ele, dessa forma o Δ é obtido através da comparação dos graus de todos os nós da rede. Para a topologia em hierarquia, o nó de maior grau da rede será sempre um super nó. Para encontrar o diâmetro da rede é necessário considerar todas as possibilidades de nós de origem e destino. D é igual a maior quantidade de saltos necessários para conectar um par origem-destino pela rota de menor caminho.

A distância média mínima (H_{min}) é o valor do número de saltos que em média ocorrerá para conectar dois nós da rede pela rota de menor caminho. Dessa forma, é preciso calcular a distância entre todos os pares de nós da rede para se obter o valor desse parâmetro. Esse parâmetro é importante para mensurar a qualidade da rede, dado que é utilizado como um indicador para analisar o desempenho da rede segundo o seu atraso de propagação. Além disso, esse parâmetro pode ser utilizado também para medir a quantidade de recursos necessários para suportar um tráfego entre todos os pares de nós da rede simultaneamente (*all-to-all*).

O t_{med} é calculado a partir da análise da menor rota entre todos os pares de nós da rede. Dessa forma, de um nó para outro, tem-se quantos canais totais existem nessa rota, somando o disponível em cada enlace. Conhecendo esse valor para todos os possíveis pares de nós é calculado a média de canais dessa rede, que é o t_{med} . Dessa maneira, esse parâmetro é a distância média mínima da rede ponderada pelo número de canais dos enlaces da rota.

O custo financeiro da rede, segundo esse modelo, é calculado pelo custo das conexões de fibra que existem, pelo custo dos *switches* utilizados, *cross connect* óptico (OXC) ou óptico-elétrico-óptico (OEO), e de acordo com a tecnologia em uso.

O custo da conexão de fibra óptica da rede é calculado, para redes com topologia regular, através da expressão:

$$C_f = \alpha N \Delta. \quad (3.7)$$

Onde o coeficiente proporcional α é o custo marginal de uma nova conexão da fibra. O comprimento típico da fibra é entre 5 e 20 quilômetros e α vale entre 10 mil e 500 mil por fibra (GUAN;CHAN,2009). Como esse custo comparado com o custo total da rede é muito pequeno, esse parâmetro não é considerado neste trabalho.

Para se calcular o custo dos equipamentos utilizados, primeiro é modelado o tamanho dos *switches* para em seguida apresentar o modelo de custo para cada um deles.

3.3.1 Tamanho dos *switches*

A capacidade de um OXC é independente da taxa de dados (r) de cada comprimento de onda. O tamanho desse tipo de *switch* (K_o) é definido pela equação(3.8), onde t é o número de canais.

$$K_o(N, \Delta, t) = t(N - 1)[H_{min}(N, \Delta) + 1] \quad (3.8)$$

Diferentemente do *switch* OXC, o tamanho do *switch* OEO depende da taxa de dados (r) por comprimento de onda. O número de portas requeridos (K_e) desse equipamento em função da taxa (R) e da utilização da porta (η) é dado por:

$$K_e(N, \Delta, t, r, R, \eta) = \frac{t(N-1)r[H_{min}(N,\Delta)+1]}{R\eta} \quad (3.9)$$

A razão $\frac{r}{R\eta}$ tem valor igual ou menor a 30% (Guan,2007). Como é possível notar, essa razão afeta a comparação do custo entre os dois equipamentos, dado que ela diferencia a modelagem do tamanho desses dois *switches*.

3.3.2 Custo dos *switches*

O custo do *switch* OXC é modelado como função do número de portas requeridas. O custo desse equipamento é diferente para os diferentes tipos de arquiteturas de *switches* existentes (3-D, multi-estágio, 2-D). Na arquitetura 3-D é possível que a luz vá de uma porta de *input* para qualquer porta de *output*. A multi-estágio é referente a arquiteturas rearranjáveis enquanto que a 2-D consiste em conjunto bidimensional de elementos de *switching* com um grau de liberdade. A função de custo para cada uma dessas arquiteturas é apresentada na Tabela 3.3.

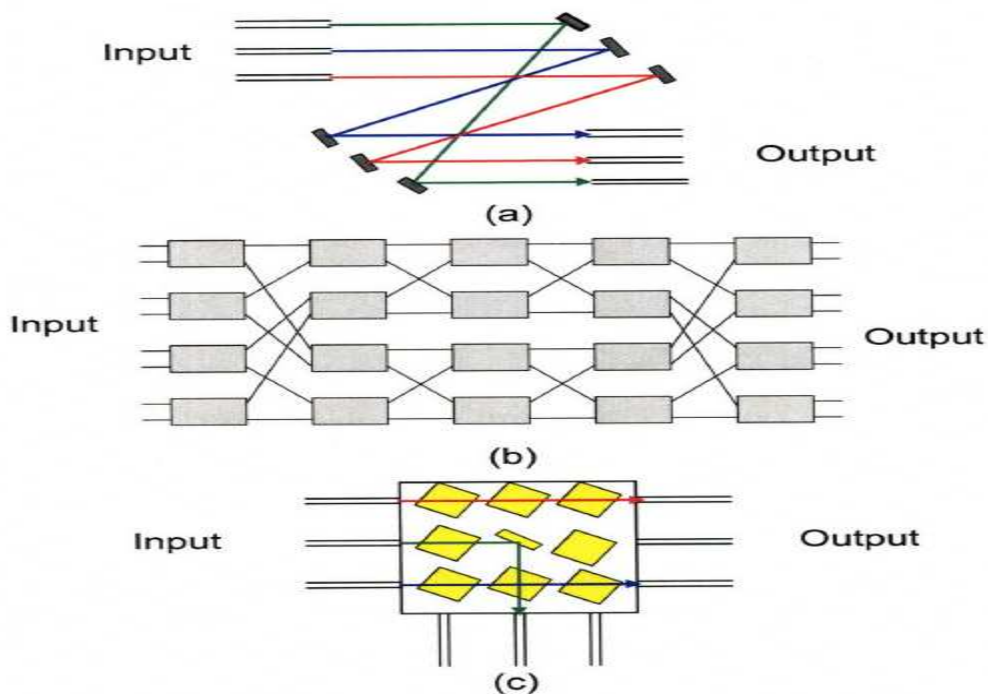


Figura 3.2 Estrutura dos OXC. (a) 3-D, (b) Multi-estágio, e (c) 2-D.

Tabela 3.3 Função custo para as arquiteturas do *switch* OXC.

Arquitetura	Função custo
3-D	$F_1(K_0) = \beta_1 K_0^{1+\zeta}$
Multi-estágio	$F_2(K_0) = \beta_2 K_0^{1+\theta} \log_2 K_0$
2-D	$F_3(K_0) = \beta_3 K_0^{2+\delta}$

Na função custo, (ζ, θ, δ) são coeficientes associados com a confiabilidade de cada uma dessas arquiteturas. O custo do OXC é conhecido através da equação (3.10), na qual i é o índice para o tipo de arquitetura do *switch*, variando de 1 a 3, representando as arquiteturas, 3-D, multi-estágio e 2-D, respectivamente.

$$C_S^o = NF_i[K_0(N, \Delta, t)] = NF_i[t(N - 1)(H_{min} + 1)] \quad (3.10)$$

O custo de um *switch* OEO é dado pela função expressa em (3.11), onde β_e é o custo por porta desse tipo de equipamento. Essa constante tem valor de 40 mil por porta para uma granularidade de 2,5 Gb/s, por exemplo (GUAN;CHAN,2009).

$$C_S^e = \beta_e K_e(N, \Delta, t, r, \eta) = \beta_e \frac{t(N-1)r}{R\eta} [H_{min}(N, \Delta) + 1] \quad (3.11)$$

3.3.3 Custo da Rede

Com a caracterização do cálculo do tamanho dos equipamentos e do custo dos mesmos, é possível calcular o custo da rede, dependendo de qual *switch* é utilizado. O custo de uma rede equipada com OXC pode ser calculado com a seguinte equação:

$$C = C_f + C_S^o = N\{\alpha\Delta + F_i[K_0(N, \Delta, t)]\}, i \in \{1,2,3\} \quad (3.12)$$

O custo por nó e o custo por unidade de tráfego são representados nas equações (3.13) e (3.14), respectivamente.

$$C_n = \frac{C}{N} = \{\alpha\Delta + F_i[K_0(N, \Delta, t)]\}, i \in \{1,2,3\} \quad (3.13)$$

$$C_{n/t} = \frac{C_n}{t} = \frac{\{\alpha\Delta + F_i[K_0(N, \Delta, t)]\}}{t}, i \in \{1,2,3\} \quad (3.14)$$

De forma análoga é possível calcular o custo normalizado por unidade de tráfego para uma rede que utiliza *switch* OEO. Esse valor é calculado segundo a seguinte expressão:

$$C_{n/t} = \frac{C_n}{t} = \frac{\alpha\Delta + \beta_e K_e(N, \Delta, t, r, \eta)}{t} \quad (3.15)$$

Através das expressões apresentadas é possível calcular o custo financeiro da rede e comparar o custo utilizando os dois diferentes *switches*. Além disso, é possível notar que, se for utilizado o *switch* OEO, a razão $\frac{r}{R\eta}$ é responsável pela diferença de custo entre os dois tipos de *switch*. Neste trabalho calculamos também o custo de uma rede que utiliza os dois tipos de *switch*. Nesse caso, os nós da hierarquia superior utilizam o *switch* OEO enquanto na hierarquia inferior é utilizado o OXC, segunda as mesmas equações apresentadas para cada um.

3.3.4 Exemplo

Levando em consideração o modelo 2, temos uma situação diferente, devido aos parâmetros envolvidos, quando analisamos as topologias da Figura 3.1. Nesse caso, precisamos conhecer o valor das variáveis N, Δ e D das topologias. Para a primeira eles valem, 12, 4 e 5 respectivamente, enquanto que para a segunda, esses mesmos parâmetros valem 12, 4 e 4.

Além disso, é calculada a distância média mínima da rede. Esse parâmetro é dado pela média da distância em número de saltos entre todos os pares de nós da rede pela rota de menor caminho. Por exemplo, para a topologia 1 com origem no nó 4, é possível tendo qualquer outro nó da rede como destino, precisar de no máximo 3 saltos para a conexão entre esses nós. Com 1 salto é possível se conectar a 4 nós (2,3,5 e 9). Com 2 saltos, é possível ter como destino outros 5 nós(1,6,8,10 e 12) e por fim com 3 saltos chega-se aos dois nós restantes (7 e 11). Assim, a distância medida mínima a partir do nó 4 pode ser calculada da seguinte maneira:

$$H_{min4} = \frac{1 \times 4 + 2 \times 5 + 3 \times 2}{11} = 1,82$$

Assim, tendo o nó 4 como origem com, em média, 1,82 saltos é possível se conectar a qualquer outro nó da rede. Esse cálculo é feito para todos os nós da topologia estudada e dessa forma encontra-se a distância média mínima da rede. Para as redes da Figura 3.1, na topologia 1 esse parâmetro vale 2,54, enquanto que na topologia 2 tem um valor de 2,36.

Ademais, para utilizar as expressões (3.10) e (3.11), referentes ao tamanho do equipamento da rede, é necessário conhecer a quantidade total de canais por enlace. Como

neste estudo o número de comprimentos de onda é diferente entre as hierarquias, a variável (t) foi substituída por (t_{med}). Nesse exemplo consideramos que cada enlace da HI tem 1 canal e da HS tem 2.

Para calcular o valor de t_{med} é necessário conhecer a rota de menor caminho entre todos os conjuntos de pares de nós dessa rede e a soma do número de canais dos enlaces dessa rota. Tendo como base novamente o nó 4, conhecemos as rotas para todos os outros nós da rede. Com 2 saltos, por exemplo, existem 5 possíveis nós de destino, para um deles (1) somando o número de comprimentos de onda dos enlaces da rota, tem-se um total de 2 canais, enquanto que para os outros 4 possíveis destinos (6,8,10 e 12) esse total é igual a 3 canais. Assim, considerando todas as possibilidades para esse nó, calcula-se o t_{med} do nó 4.

$$t_{med4} = \frac{(2 \times 1 + 2 \times 2) + (1 \times 2 + 4 \times 3) + (2 \times 4)}{11} = 2,54$$

Esse resultado mostra que, tendo como origem o nó 4, a rota para qualquer destino tem em média um total de 2,54 canais. Para as topologias desse exemplo, esse parâmetro é igual a 3,27 para a topologia 1 e 3,45 para a topologia 2.

Conhecendo esses parâmetros das topologias e assumindo que a arquitetura da rede é a 3-D com o coeficiente de confiabilidade (ζ) igual a 0,1, para a utilização de OXC, é possível calcular o custo financeiro de cada uma delas. Quando são utilizados os dois tipos de *switches*, OEO na HS e OXC na HI, o custo da topologia 1 é de $2,32 \times 10^7$ e da topologia 2 é de $2,27 \times 10^7$.

Para o modelo 1, o custo da topologia 1 é maior do que o da topologia 2, ocorrendo o inverso para o modelo 2. Isso se deve a expressão de custo de cada modelo. Para o modelo 1, o custo dos super nós é a principal influência no custo total da rede. Dessa forma, a topologia 2, que tem um número maior de super nós, tem um custo maior do que a topologia 1.

Para o modelo 2, a diferença de custo entre as topologias está associada aos equipamentos utilizados (OXC e OEO) além dos parâmetros t_{med} e H_{min} . Dessa forma, a maneira como a rede está organizada, segundo número de super nós e número de canais, influencia o custo da mesma.

Capítulo 4: Metodologia

A partir dos dois modelos de custo estudados, foi criado um programa em linguagem *Matlab*[®] com intuito de estudar o custo de diversas redes ópticas com topologia em anéis hierárquicos. Assim, com esse código é possível analisar como algumas variáveis, como o número de comprimentos de onda em um enlace e o número de super nós da topologia, influenciam no custo da rede.

Além desse novo código, também é utilizado o Simulador de Eventos Discretos para Redes Ópticas (SEDRO) (MAIOLI,2007) para simular a topologia a ser estudada. Assim, além de analisar o custo financeiro é possível fazer uma análise da relação do custo com a probabilidade de bloqueio da rede obtida através da simulação com esse simulador. Sendo possível assim, discutir se o investimento financeiro é positivo devido ao aumento da probabilidade de uma conexão na rede acontecer.

Uma restrição do método adotado é a necessidade de que a topologia seja um parâmetro de entrada. Desse modo, é necessário descrever a topologia de entrada, especificando os nós de origem e destino e o número de comprimentos de ondas disponíveis, para executar a simulação da rede.

4.1 SEDRO

O funcionamento do SEDRO está descrito na Figura 4.1. A topologia da rede a ser estudada é o parâmetro de entrada desse simulador. Como resultado dessa simulação é possível conhecer a probabilidade de bloqueio da rede podendo assim analisar a influência do número de comprimentos de onda, por exemplo, nesse resultado.

A leitura da topologia de entrada é a primeira parte do funcionamento desse simulador. Esse arquivo de entrada informa ao simulador como a rede está organizada e quantos canais existem em cada enlace. Além dos dados da rede, o simulador lê os parâmetros da simulação, como a quantidade de eventos a serem simulados e o tipo de roteamento a ser utilizado. Após gerar uma lista aleatória de requisições de conexão, o simulador encontra as rotas para cada par origem-destino. Para este trabalho, buscamos encontrar apenas uma rota, a menor, segundo o número de saltos, para a conexão entre dois nós. Assim, é executada a

simulação, de acordo com os parâmetros definidos, e o SEDRO apresenta o resultado da probabilidade de bloqueio para a rede simulada.

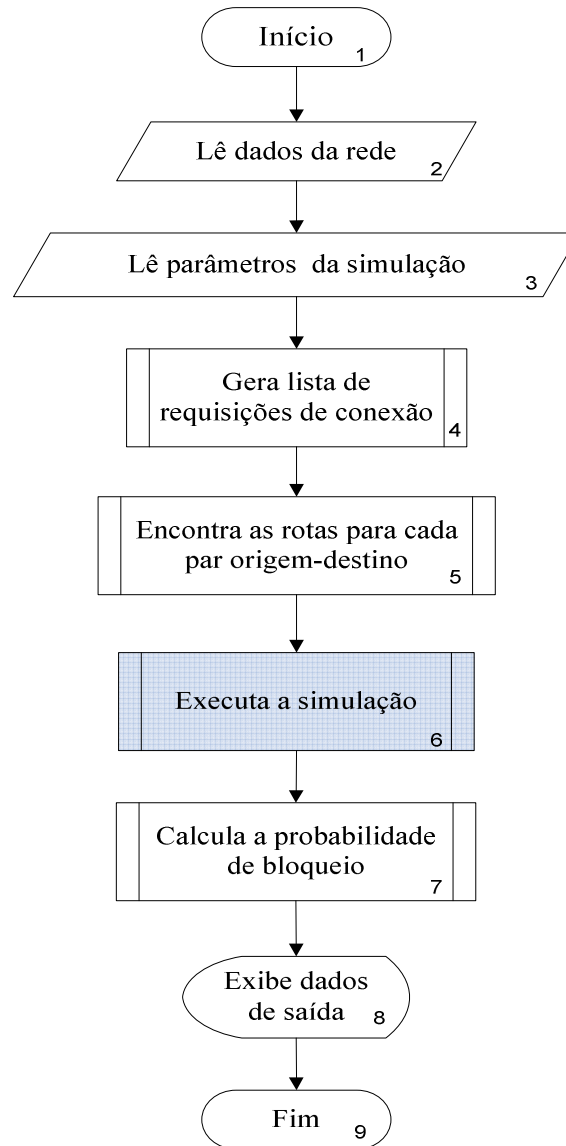


Figura 4.1 Diagrama de blocos simplificado do SEDRO.

Para esse trabalho, utilizamos a versão modificada desse simulador (ROCHA,2009). Nessa versão, a restrição de continuidade do comprimento de onda, isto é, para ocorrer a conexão entre um par origem-destino é necessário que o mesmo comprimento de onda esteja disponível em todos os enlaces da rota, não existe. Com isso, a probabilidade de bloqueio da rede diminui de maneira significativa, como é apresentado na Figura 4.2. Essa figura apresenta a diferença de bloqueio para uma mesma rede, com 9 nós. A curva em vermelho é resultado da utilização do SEDRO sem modificação e a curva azul apresenta o resultado

utilizando a versão modificada. Essa versão pode ser utilizada somente para redes em anéis hierárquicos, tema de estudo deste trabalho.

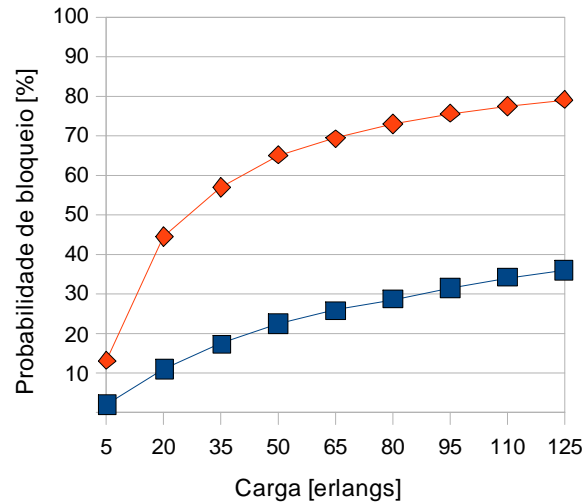


Figura 4.2 Diferença na probabilidade de bloqueio para rede com 9 nós

Nessa versão, os eventos são divididos em até 3 sub-eventos dependendo da localização dos nós de origem e destino. A restrição de continuidade do comprimento de onda é mantida apenas no mesmo anel. Dessa forma, quando os nós de origem e destino estão no mesmo anel, seja na hierarquia superior ou na hierarquia inferior, independentemente do número de saltos, é necessário o mesmo comprimento de onda para que a conexão ocorra. Os possíveis casos são apresentados Figura 4.3.

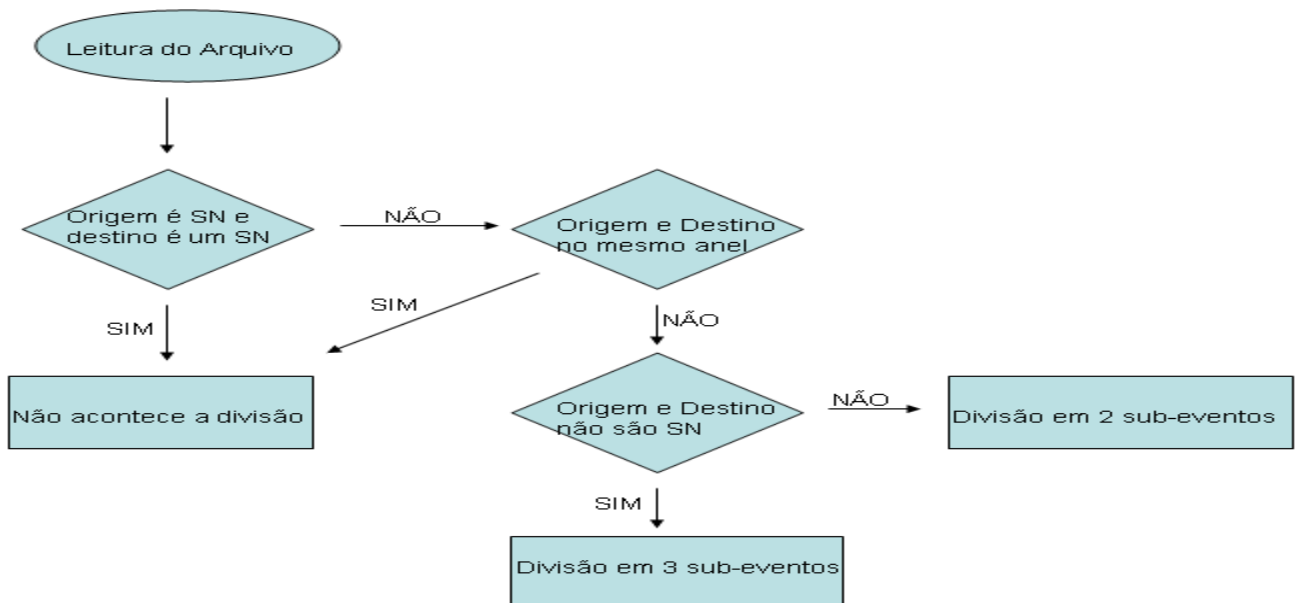


Figura 4.3 Separação dos eventos.

A probabilidade de bloqueio encontrada como resposta para a topologia estudada é fundamental na análise do custo financeiro das redes ópticas. Através desse resultado, podemos discutir a importância de algumas mudanças de configuração na rede e buscar sua otimização, baseada não somente no custo, mas também em um parâmetro de desempenho de redes, que é a probabilidade de bloqueio.

Os resultados da simulação de uma topologia com 24 nós, sendo 3 deles super nós, chamada de 3s24, pode ser visto na Figura 4.4. Os resultados são apresentados para 5 diferentes tipos de configuração, variando o número de canais na HS e HI. A nomenclatura das configurações segue o mesmo padrão, como exemplo, 1HI 2HS quer dizer que a rede tem 1 canal na hierarquia inferior e 2 na hierarquia superior.

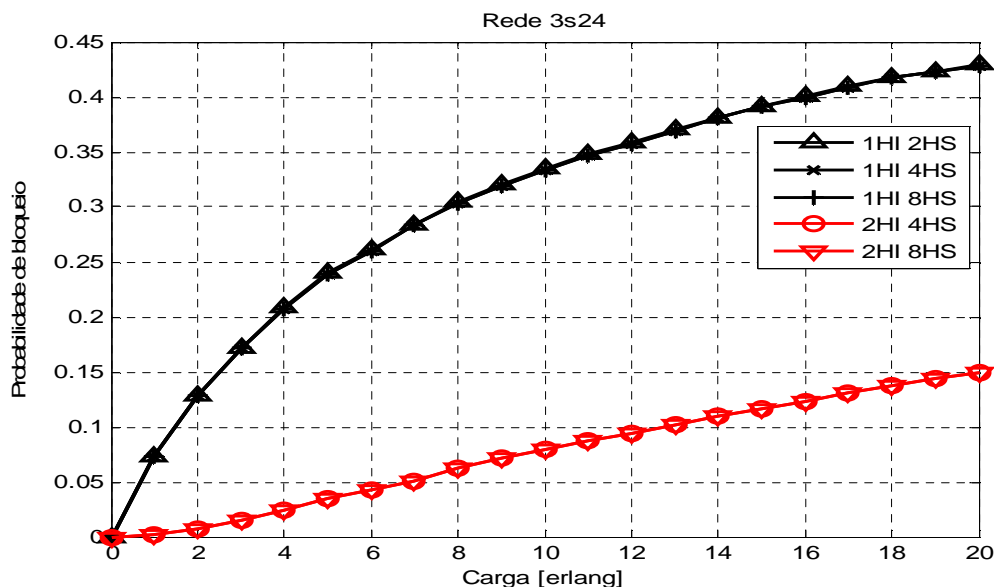


Figura 4.4 Probabilidade de bloqueio.

4.2 Simulador de custo

Foi criado um único programa onde é possível obter o custo da rede segundo cada um dos dois modelos estudados. O parâmetro de entrada desse programa é a topologia da rede que vai ser analisada, com a descrição dos nós, de origem e destino, que são conectados e a quantidade de canais disponíveis nesse enlace, idêntica a entrada do SEDRO. Uma restrição desse programa é considerar que as hierarquias obrigatoriamente têm o mesmo número de canais disponíveis em todos os seus enlaces. Desse modo, para efeito dessa simulação, todos

os enlaces da hierarquia inferior devem ter o mesmo número de comprimentos de onda disponíveis, o mesmo acontecendo com os enlaces da hierarquia superior. Além disso, a HS tem sempre mais canais disponíveis do que a HI.

Antes de simular os dois modelos de custo, são calculadas as variáveis que se obtém a partir da topologia da rede estudada, como por exemplo, o diâmetro da rede, isto é, a maior distância entre um nó de origem e um destino na topologia segundo o número de saltos, o maior e menor grau dos nós da topologia além da matriz contendo todas as distâncias entre os nós da rede.

Ademais, outras características da topologia, como o número de nós da rede, o número de nós em cada hierarquia, assim como o número de enlaces são obtidos nessa parte do simulador. Em seguida, são calculadas as outras variáveis referentes ao tipo de modelo que está sendo usado. Assim, é possível encontrar o custo segundo os dois modelos.

4.2.1 Modelo 1

No simulador, para calcular o custo financeiro baseado no modelo 1, se faz necessário, primeiramente, a definição de dois parâmetros da rede, a granularidade e o comprimento, em quilômetros, dos enlaces. Neste trabalho, assumimos que a granularidade é de 2.5 Gbit/s e que o tamanho do enlace na HI é metade do tamanho do enlace presente na HS.

Em seguida é calculado o valor do custo dos nós e dos enlaces, além da distância efetiva do nó, para posteriormente ser encontrado o valor total do custo da rede. No caso desse modelo, quando é comparada duas topologias, se todos os enlaces tiverem o mesmo número de comprimentos de onda disponíveis e mesma granularidade, a diferença no custo é causada pelo número de super nós, que tem um custo maior que um nó, em cada uma das redes.

Como apresentado no capítulo 3, o custo é separado também nas duas hierarquias, dado que a superior tem parâmetros diferentes da inferior, e de onde é possível analisar o impacto do número de super nós no custo financeiro da rede.

Para a rede 3s24, temos como resultado da simulação de acordo com o modelo 1, os valores de custo apresentados na Figura 4.5. Como mostrado, nesse caso, variando o número de canais na rede, o custo não tem uma tendência crescente. Esse comportamento do modelo 1 será discutido de maneira mais aprofundada no capítulo 5, onde são apresentadas simulações para diferentes redes.

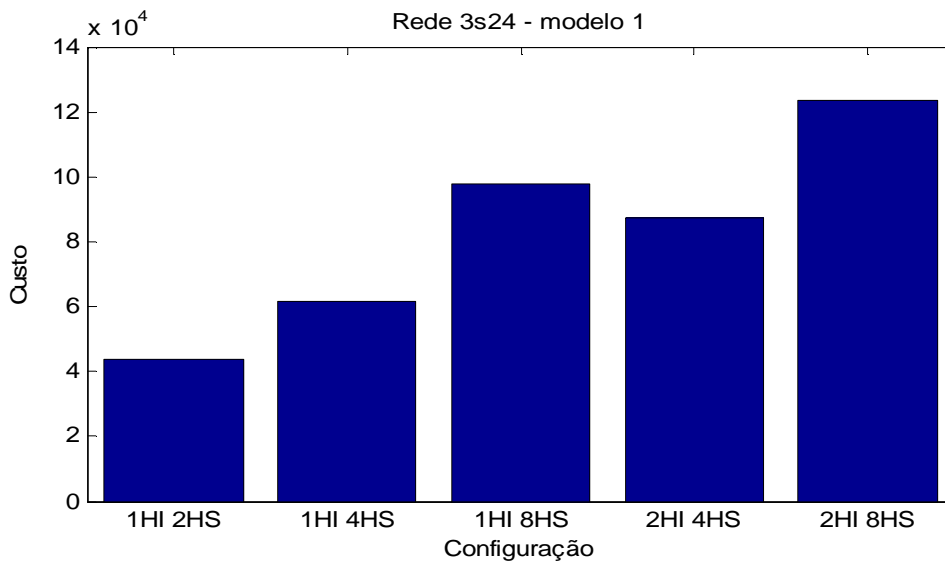


Figura 4.5 Custo segundo modelo 1.

4.2.2 Modelo 2

Nesse segundo modelo, o custo financeiro é baseado no custo dos *switches* que serão utilizados pela rede, OXC ou OEO. No artigo estudado referente a esse modelo (GUAN;CHAN,2009), as redes utilizam apenas um tipo de *switch*, entretanto, para efeito do nosso estudo também criamos um modelo para encontrar o custo financeiro de uma rede que utilizasse tanto o OEO quanto o OXC, o primeiro na hierarquia superior e o segundo na inferior. Assim, é possível encontrar o valor do custo financeiro da rede, utilizando somente OEO, somente OXC e ambos. Como é utilizado o código modificado do SEDRO, a relação da probabilidade de bloqueio com esse modelo de custo, só pode ser feita para a versão que utiliza os dois equipamentos.

Antes de calcular o custo financeiro para esse modelo, o programa calcula dois importantes parâmetros para a topologia, a distância média mínima e o número médio de comprimentos de onda, apresentadas no capítulo 3.

Para as simulações feitas neste estudo, quando usamos o *switch* OXC, assumimos que a tecnologia da arquitetura utilizada sempre será a 3-D e que o coeficiente de confiabilidade é 0,1, de forma a simplificar o cálculo. Para o caso de utilização do *switch* OEO é possível encontrar o custo da rede de acordo com a variação da razão $\frac{r}{R\eta}$. Neste trabalho, os resultados apresentados são simulados com o valor da razão igual a 30%. Essas considerações também

são feitas para o valor do custo combinado, isto é, quando são utilizados os dois tipos de *switch*. Neste trabalho, quando é apresentado o resultado segundo o modelo 2, sempre é referente ao custo combinado.

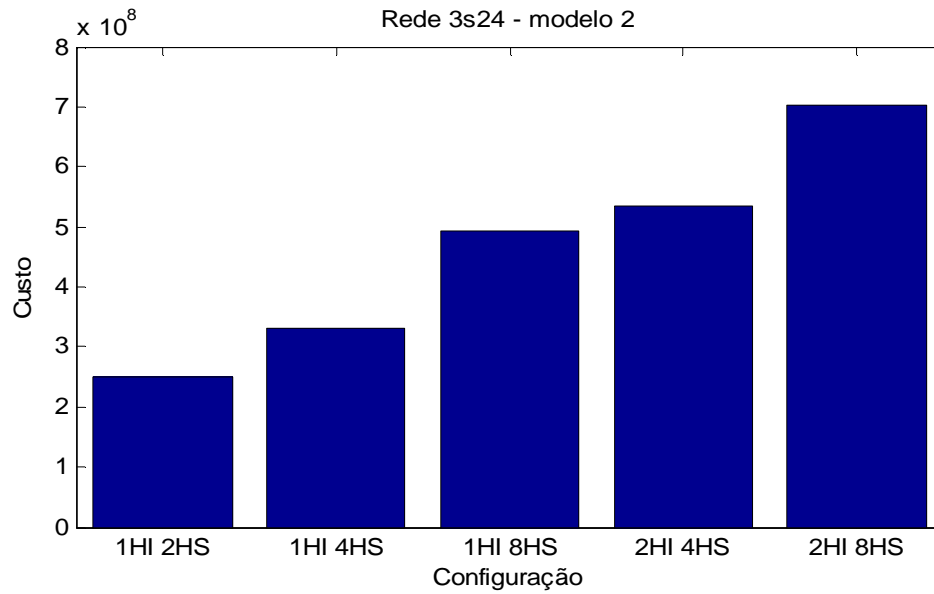


Figura 4.6 Custo segundo modelo 2.

Na Figura 4.6, é possível comparar o custo para a mesma topologia, a rede 3s24, de acordo com as variações no número de canais disponíveis em cada hierarquia segundo esse modelo e avaliar a influência também de outras variáveis envolvidas nesse cálculo.

Capítulo 5: Estudos de caso

Nos capítulos 3 e 4, os dois modelos de custo estudados foram apresentados de maneira mais aprofundada além de apresentar como ocorreu a implementação para a análise do custo financeiro de redes ópticas. Além desses modelos, o SEDRO é utilizado para se obter a probabilidade de bloqueio da rede a ser estudada, completando dessa forma os parâmetros que levamos em consideração neste trabalho para a análise de desempenho de redes ópticas em hierarquia.

Neste capítulo os resultados obtidos da simulação desses programas são apresentados. Para todas as redes estudadas neste trabalho foram simuladas 5 configurações com diferentes quantidades de canais disponíveis, são elas: 1HI 2HS, 1HI 4HS, 1HI 8HS, 2HI 4HS e 2HI 8HS. A nomenclatura para a quantidade total de comprimentos de onda segue um único padrão. Como exemplo, para a rede com 1HI 2HS, tem-se 1 canal na hierarquia inferior e 2 na hierarquia superior.

As topologias que foram simuladas e são apresentadas neste trabalho foram nomeadas de forma a se conhecer o tamanho da rede e a quantidade de super nós. Dessa forma, por exemplo, a rede chamada de 3s12 possui um número total de nós igual a 12 sendo que desses, 3 são super nós.

Na simulação com o SEDRO, todas ocorreram utilizando o algoritmo modificado do simulador, específico para redes em hierarquia. (ROCHA,2009). Além disso, o simulador procura o caminho mais curto para a rota e somente por ele a tentativa de conexão acontece para o par origem-destino. Em todos os casos, foram feitas simulação com 10 mil eventos.

Em cada simulação é feita uma variação no número de canais disponível na rede, tanto na hierarquia superior quanto na inferior. Uma restrição desse código é que a HS tenha sempre um número de comprimentos de onda maior que a HI. Ademais, foi utilizado o SEDRO com sua versão simétrica, isto é, em que todos os eventos têm a mesma probabilidade de ocorrer e com os pares origem-destino sendo gerados de forma aleatória.

Para a utilização do programa que calcula o custo financeiro segundo os modelos estudados algumas considerações foram feitas. Assumimos que a granularidade da rede é de 2.5 Gb/s. Com isso, a variável β_e , do *switch* OEO, tem valor de 40000 (GUAN;CHAN,2009). Também é assumido que o tamanho físico do enlace na hierarquia inferior é metade do tamanho do enlace na hierarquia superior. Os valores apresentados estão todos em função da distância (L), dado que ela pode variar de acordo com o tipo de rede

sendo estudado, por exemplo, uma rede metropolitana ou local. Ademais, essa variável influencia nas constantes E e F da equação (3.4) por também dependerem do tipo de rede.

Todos os resultados apresentados referentes ao modelo 2 são referentes ao custo combinado, quando se é utilizado os dois tipos de *switch*, OEO somente na HS, enquanto que na HI é utilizado OXC. Além disso, para os parâmetros do *switch* OXC, assumimos que a razão $\frac{r}{R\eta}$ é igual a 30%, a arquitetura do *switch* é a 3-D e o coeficiente de confiabilidade é igual a 0,1.

A seguir são apresentados os resultados das simulações feitas para as redes estudadas. Foram simuladas redes com um total de 12 e 24 nós, com diferentes números de super nós. Foi possível analisar, em uma rede com um número específico de super nós, como a variação no comprimento de onda influencia nos parâmetros deste trabalho. Além disso, foi possível comparar as redes que tem o mesmo número total de nós, analisando a influência da variação do número de super nós. Por fim, a diferença de tamanho da rede, isto é, do número total de nós, também foi avaliada com relação ao impacto na probabilidade de bloqueio e no custo financeiro das redes.

5.1 Redes com 12 nós

O estudo foi iniciado para uma rede com um total de 12 nós. Com isso, para a topologia em anéis hierárquicos, foi possível estudar duas variações dessa topologia, a primeira com 3 super nós e a segunda com um total de 4 super nós.

5.1.1 Rede 3s12

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pela simulação da rede 3s12 mostrada na Figura 5.1.

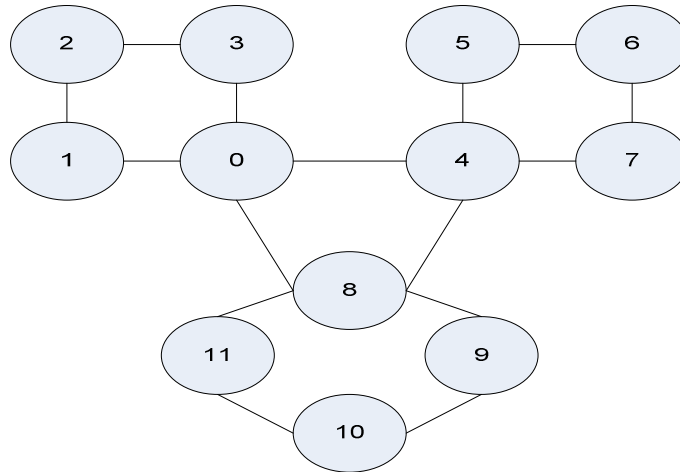


Figura 5.1 Topologia em anel hierárquico da rede 3s12.

O primeiro passo do estudo é a simulação utilizando o SEDRO para se obter os resultados da probabilidade de bloqueio da rede de acordo com a variação do número de comprimentos de onda nas hierarquias. Esse resultado é apresentado na Figura 5.2, onde é possível notar que, para a rede estudada, quando fixamos o número de canais na hierarquia inferior e aumentamos esse valor na hierarquia superior, a variação da probabilidade de bloqueio é bem pequena. Fazendo o contrário, no entanto, gera uma mudança significativa na probabilidade de bloqueio. Como exemplo, tendo como base uma carga de 10 Erlang, a configuração 1HI 8HS tem uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente 30%, enquanto para configuração 2HI 8HS a probabilidade é de apenas 7,5%.

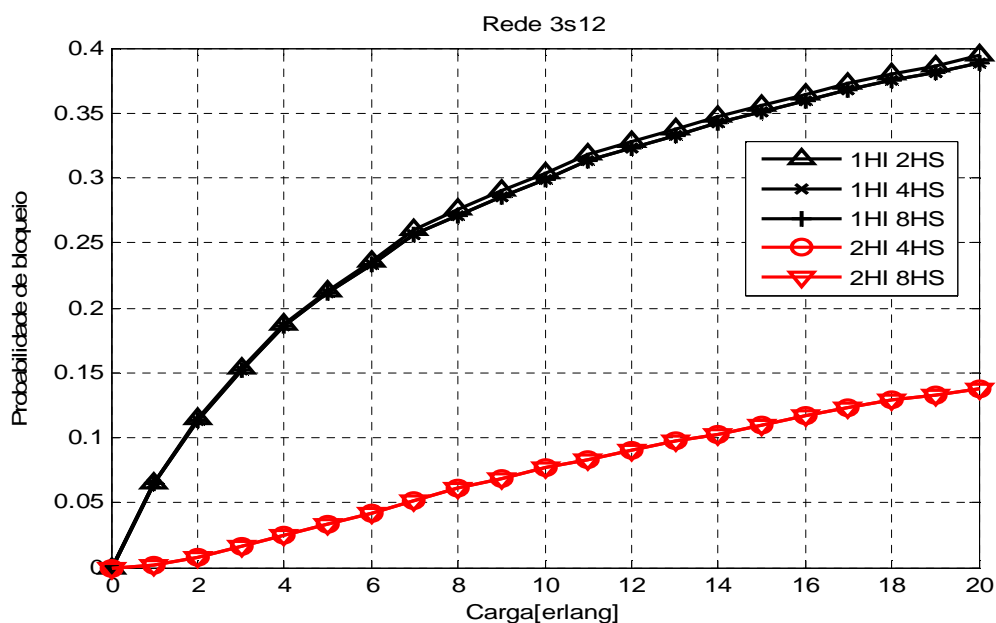


Figura 5.2 Probabilidade de bloqueio da rede 3s12.

Os resultados obtidos com a utilização do programa para o cálculo do custo financeiro de redes, para a topologia desse exemplo, são apresentados na Figura 5.3 e na Figura 5.4, segundo o modelo 1 e o modelo 2, respectivamente. Como é possível notar, o comportamento do custo é o mesmo, sendo a rede com 2HI 8HS a de maior custo em ambos os casos.

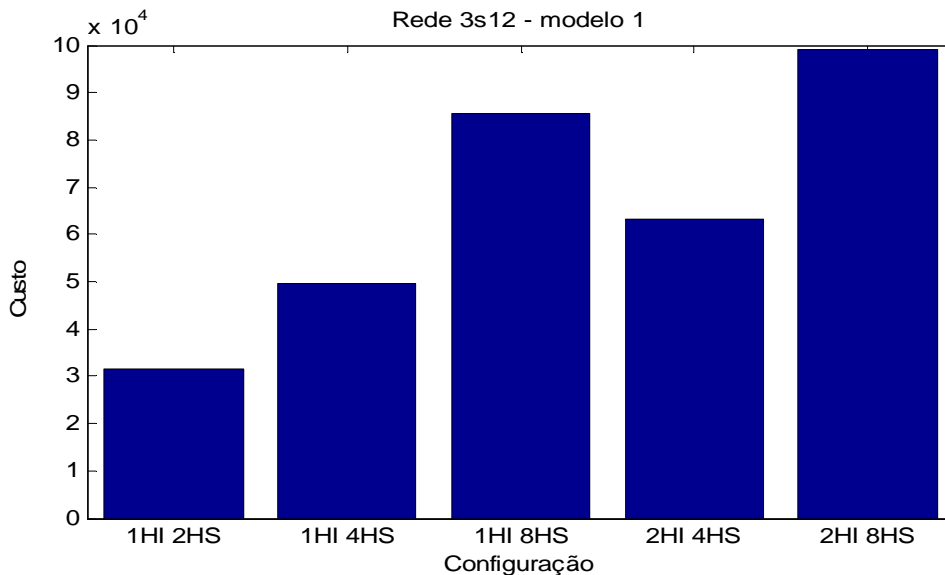


Figura 5.3 Custo segundo o modelo 1 para a rede 3s12.

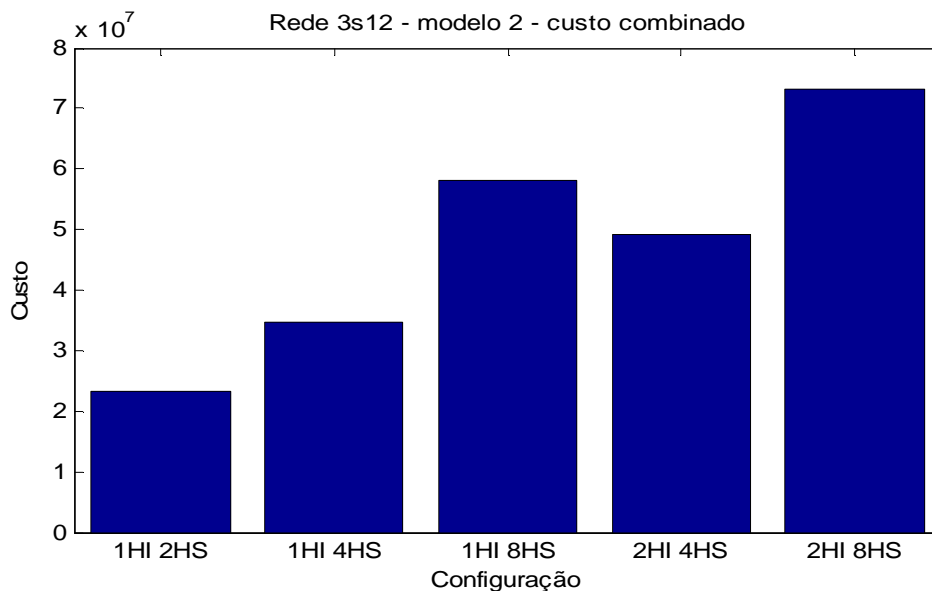


Figura 5.4 Custo segundo o modelo 2 para a rede 3s12.

O comportamento do custo, tanto para o modelo 1 quanto para o modelo 2, apresentam o mesmo comportamento. Para o primeiro, sabemos que o custo dos nós é quase a totalidade do custo da rede e que os super nós têm um valor superior aos outros nós. Além

disso, a quantidade de canais nos enlaces que se conectam ao nó também impacta no custo. Por esse motivo ocorre essa tendência no custo da rede a partir das variações de configurações. Mantendo o mesmo número de canais na HI e aumentando na HS o custo tem um comportamento crescente.

Para o custo segundo o modelo 2, como o número de super nós é o mesmo, a H_{min} e a quantidade e o tipo de equipamentos, são idênticos para todas as configurações. Esse comportamento do custo acontece por conta do t_{med} que é diferente para cada configuração.

Desses resultados, a configuração 2HI 4HS ter um custo menor do que a 1HI 8HS chama atenção, dado que a probabilidade de bloqueio da primeira é significativamente menor do que da segunda. Isso ocorre devido ao custo dos super nós no modelo 1 e devido a diferença do t_{med} no modelo 2. Nesse caso, para a configuração 1HI 8HS esse parâmetro é igual a 7,64 enquanto que para a outra ele vale 6,55. Nessa comparação, segundo o modelo 2, 2HI 4HS custa 85% do valor de 1HI 8HS.

Para uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente 10%, com os resultados apresentados na Tabela 5.1, é possível notar a diferença de carga suportada pelas configurações estudadas, além da diferença no custo. Como exemplo, a rede com 2HI 4HS suporta uma carga de 14 erlang enquanto que com 1HI 8HS suporta apenas 2 erlang, tendo a primeira ainda, um custo financeiro inferior a segunda.

Tabela 5.1 Rede 3s12.

Configuração	Custo modelo 1 [10⁴]	Custo modelo 2 [10⁷]	Carga [erlang]	Prob. de bloqueio [%]
1HI 2HS	3,15	2,33	2	11,42
1HI 4HS	4,96	3,46	2	11,36
1HI 8HS	8,57	5,81	2	11,36
2HI 4HS	6,31	4,92	14	10,27
2HI 8HS	9,92	7,32	14	10,27

Assim é possível notar que não podemos considerar apenas a variação no número de comprimentos de onda para obter um melhor resultado no desempenho da rede. Apesar da mudança no número de canais representar uma mudança significativa na probabilidade de bloqueio, precisa ser avaliado também, o custo dessa mudança de forma a analisar a viabilidade da configuração.

5.1.2 Rede 4s12

Assim como apresentado na seção 5.1, nessa seção é estudada uma topologia específica e a influência da variação do número de comprimentos de onda na probabilidade de bloqueio e no custo da rede. Nesse caso, foi estudada também uma rede com um total de 12 nós, contudo tendo agora 4 nós na HS. A topologia é apresentada na Figura 5.5, enquanto que o resultado da simulação com o SEDRO, para conhecer a probabilidade de bloqueio é mostrada na Figura 5.6.

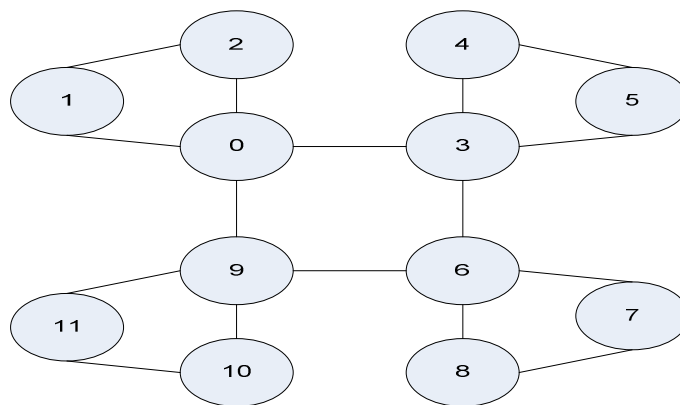


Figura 5.5 Topologia da rede 4s12.

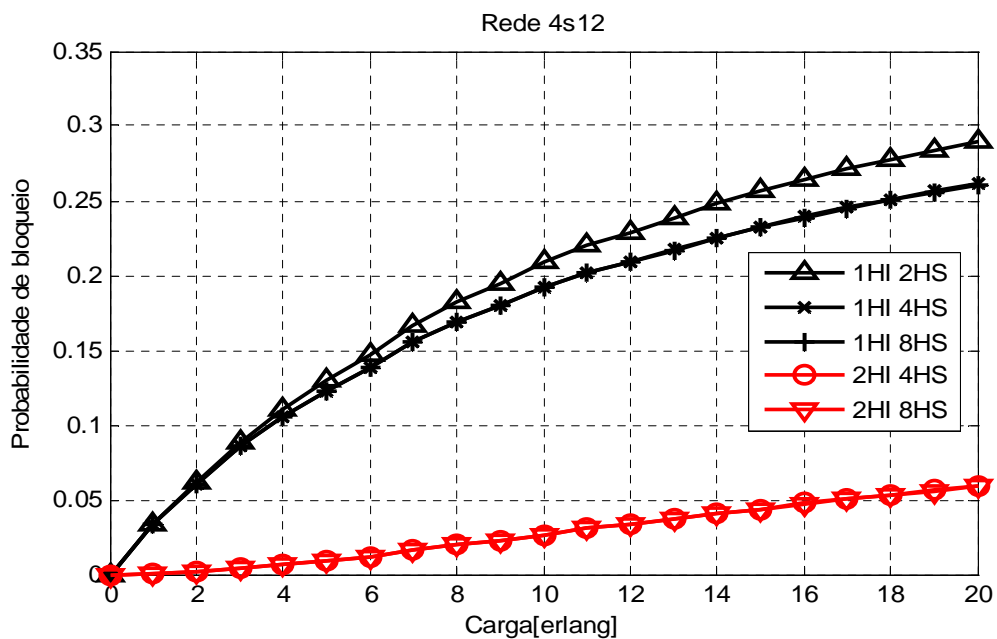


Figura 5.6 Probabilidade de bloqueio da rede 4s12.

Os resultados do custo financeiro dessa rede são apresentados na Figura 5.7 e Figura 5.8, segundo o modelo 1 e 2, respectivamente. O comportamento dessa rede é similar àquele apresentado na seção 5.1, onde a variação do comprimento de onda na hierarquia inferior mantendo o mesmo número de canais na HS é suficiente para causar uma grande diferença na probabilidade de bloqueio. Assim como, é necessário avaliar o custo envolvido para selecionar a melhor configuração. Além disso, a rede com 2HI 4HS também apresenta um custo menor do que a com 1HI 8HS, porém com uma diferença maior, segundo os dois modelos.

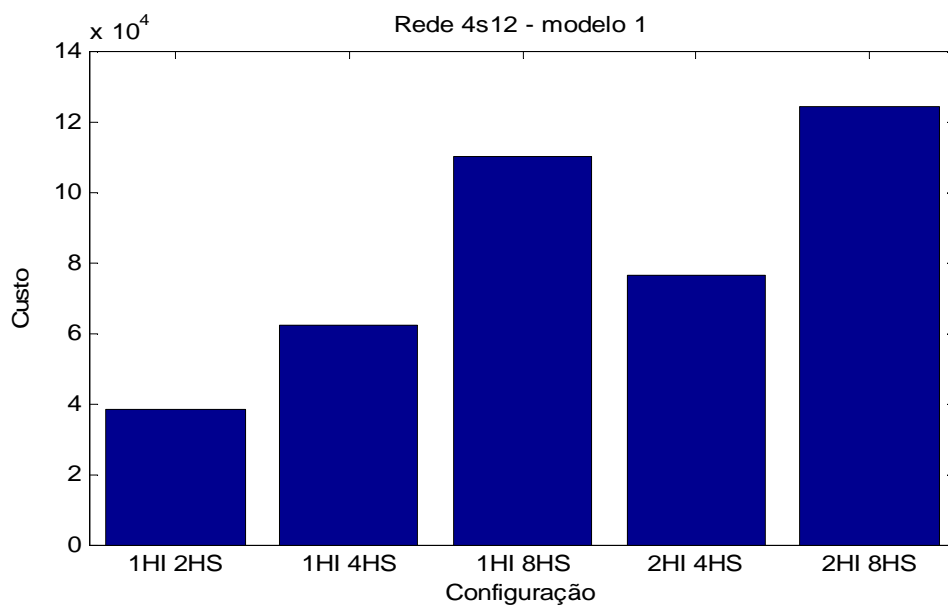


Figura 5.7 Custo segundo modelo 1 para a rede 4s12.

Tendo como base o modelo 2, para a rede 3s12 a configuração 2HI 4HS custa 85% do valor da configuração 1HI 8HS. Para a rede 4s12, segundo essa mesma comparação, o valor de 2HI 4HS é de 67% do valor da outra configuração.

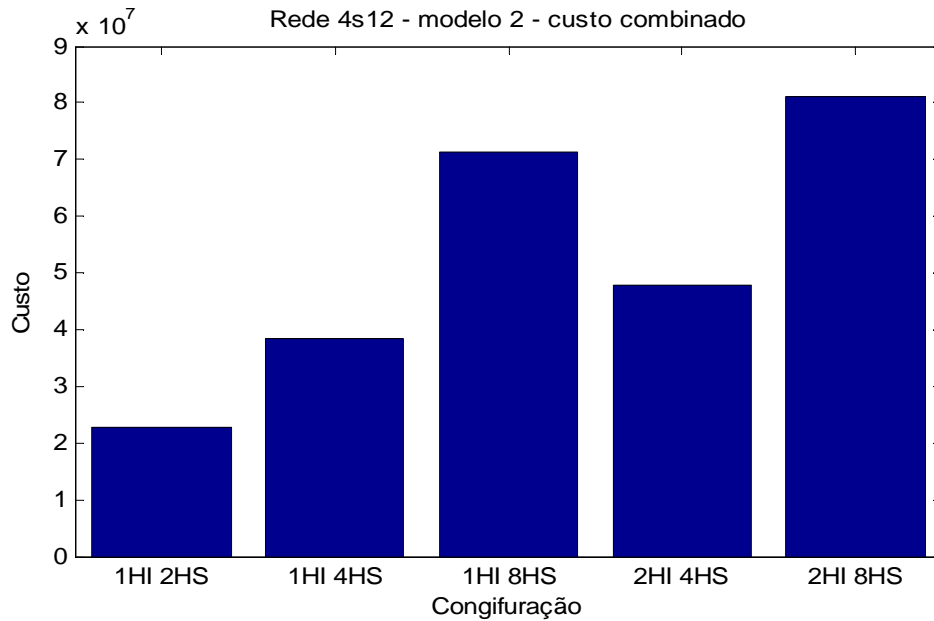


Figura 5.8 Custo segundo modelo 2 para a rede 4s12.

Além da diferença do custo financeiro entre as redes 1HI 8HS e 2HI 4HS, se for tomado como base uma probabilidade de bloqueio perto de 10%, a diferença da carga também é significativa entre essas configurações, como apresentado na Tabela 5.2. A primeira suporta 4 erlang, enquanto a segunda, 38.

Tabela 5.2 Rede 4s12.

Configuração	Custo modelo 1 [10 ⁴]	Custo modelo 2 [10 ⁷]	Carga [erlang]	Prob. de bloqueio[%]
1HI 2HS	3,81	2,27	4	11,03
1HI 4HS	6,21	3,85	4	10,50
1HI 8HS	11,02	7,12	4	10,50
2HI 4HS	7,61	4,79	38	10,10
2HI 8HS	12,42	8,11	40	10,10

Também é possível notar que dobrando o número de canais na HS, de 4 para 8, para a configuração com um número fixo de canais na HI, além de a probabilidade de bloqueio se manter a mesma o custo financeiro tem um aumento considerável. Dessa forma, essa mudança não traz benefícios segundo os parâmetros de desempenho considerados. Por outro lado, aumentando o número de canais na HI gera uma melhora considerável na probabilidade de bloqueio. Porém, é necessário avaliar o custo financeiro também, para que a escolha seja baseada na melhor relação entre a probabilidade de bloqueio e o custo da rede.

5.1.3 Análise comparativa das redes com 12 nós

Com os resultados obtidos nos dois primeiros estudos de caso anteriores (5.1 e 5.2) é possível analisar também o comportamento da rede com 12 nós e comparar a diferença no custo e na probabilidade de bloqueio quando alteramos o número de super nós tendo a mesma configuração como base para as duas redes.

A Figura 5.9 apresenta uma comparação entre a probabilidade de bloqueio entre as redes, mostrando que para a rede com 12 nós o acréscimo de 1 super nó faz com que a rede tenha uma probabilidade de bloqueio significativamente menor.

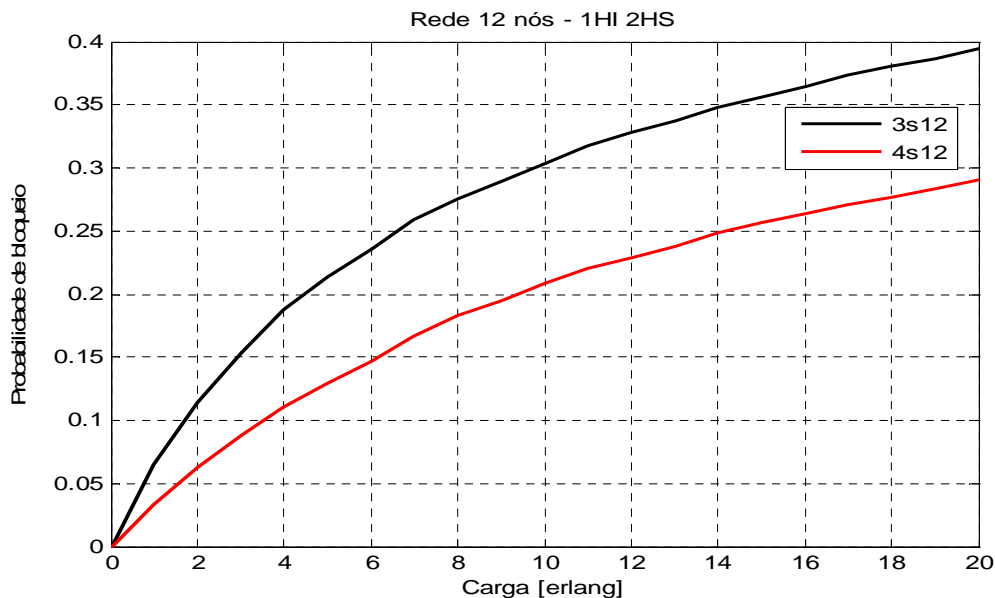


Figura 5.9 Probabilidade de bloqueio para as redes de 12 nós de 1HI 2HS.

Além disso, pela Tabela 5.1 e pela Tabela 5.2, é possível notar tendo como base uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente 10%, que a rede 4s12 tem um desempenho melhor considerando a carga suportada para todas as variações do número de canais simuladas. Como exemplo, tomando como base a configuração 2HI 4HS, a rede 3s12 suporta 14 erlang, enquanto a 4s12 suporta 38.

Com relação ao custo, são apresentados os resultados obtidos para essas duas redes com as diferentes configurações na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4, segundo os dois modelos estudados. Além disso, na última coluna, tem-se a variação no custo financeiro da rede quando se altera de 3 para 4 o número de super nós da rede. A rede 3s12 tem um custo menor em todos os casos devido a ter menos super nós, quando comparado pelo modelo 1.

Tabela 5.3 Variação do custo segundo modelo 1 para redes com 12 nós – ($\times 10^4$).

	3s12	4s12	Variação (%)
1HI 2HS	3,15	3,81	20,95
1HI 4HS	4,96	6,21	25,20
1HI 8HS	8,57	11,02	28,59
2HI 4HS	6,31	7,61	20,60
2HI 8HS	9,92	12,42	25,20

A partir dos resultados, comparando o modelo 2, também é possível notar que a distância média mínima tem uma grande influência no custo financeiro da rede assim como o número médio de comprimentos de onda. A variação do custo entre as duas redes com o mesmo tamanho depende diretamente dessas variáveis, com os valores apresentados na Tabela 5.5. Além disso, como avaliamos o custo combinado e as redes apresentam número de super nós diferente, o custo dos equipamentos envolvidos também influencia nessa diferença de valor entre as redes considerando o modelo 2. No caso das configurações 1HI 2HS e 2HI 4HS a rede 4s12 apresenta um custo menor do que a rede 3s12, diferentemente da comparação entre as outras configurações.

Tabela 5.4 Variação do custo segundo o modelo 2 para redes com 12 nós – ($\times 10^7$).

	3s12	4s12	Variação(%)
1HI 2HS	2,33	2,27	-2,58
1HI 4HS	3,46	3,85	11,27
1HI 8HS	5,81	7,12	22,55
2HI 4HS	4,92	4,79	-2,65
2HI 8HS	7,32	8,11	10,80

Tabela 5.5 Variação de H_{min} e t_{med} para redes com 12 nós.

2HI 4HS	H_{min}	t_{med}
3s12	2,55	6,55
4s12	2,36	6,91

Através da Tabela 5.6 é possível comparar as duas redes, 3s12 e 4s12, com relação a todas as variáveis que influenciam os parâmetros de desempenho deste trabalho, a probabilidade de bloqueio e o custo. É possível notar que a rede com 4 super nós apresenta um H_{min} com valor menor e sempre suporta uma carga maior, quando compara-se duas

configurações com o mesmo número de canais nas hierarquias. A diferença do número de super nós e a variação do t_{med} influenciam o comportamento do custo segundo o modelo 1 e o modelo 2, respectivamente.

Levando em consideração os parâmetros carga suportada, probabilidade de bloqueio e custo, é possível afirmar que dentre as configurações estudadas a 2HI 4HS é a que tem a melhor resposta para os dois casos com diferente número de super nós. Ademais, comparando esses dois casos, a diferença na probabilidade de bloqueio é significativa, com a rede 4s12 suportando uma carga maior. Cabe também ressaltar, que a configuração 2HI 4HS apresenta um custo menor para essa rede. Dessa forma, por esses resultados, essa poderia ser uma boa escolha para uma topologia para uma rede de 12 nós.

Tabela 5.6 Comparação entre as redes 3s12 e 4s12.

3s12	Diâmetro	H_{min}	t_{med}	Carga[Erlangs]	Mod 1	Mod 2 (x10⁷)
1HI 2HS	5	2,55	3,27	2	31560	2,33
1HI 4HS	5	2,55	4,73	2	49590	3,46
1HI 8HS	5	2,55	7,64	2	85650	5,81
2HI 4HS	5	2,55	6,55	14	63120	4,92
2HI 8HS	5	2,55	9,45	14	99180	7,32
4s12						
1HI 2HS	4	2,36	3,45	4	38070	2,27
1HI 4HS	4	2,36	5,64	4	62110	3,85
1HI 8HS	4	2,36	10,00	4	110190	7,12
2HI 4HS	4	2,36	6,91	38	76140	4,79
2HI 8HS	4	2,36	11,27	40	124220	8,10

5.2 Redes com 24 nós

5.2.1 Rede 3s24

A partir dessa seção, concentra-se o estudo em redes com 24 nós para as diferentes configurações. São apresentados os resultados da simulação para uma rede com 24 nós sendo que destes, 3 são super nós, chamada de 3s24. Nessa seção esses resultados são analisados. O resultado da probabilidade de bloqueio, mostrado na Figura 5.10 segue a mesma tendência que as redes de 12 nós. Na Tabela 5.7 é mostrada a carga suportada nas diferentes configurações para uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente 10%.

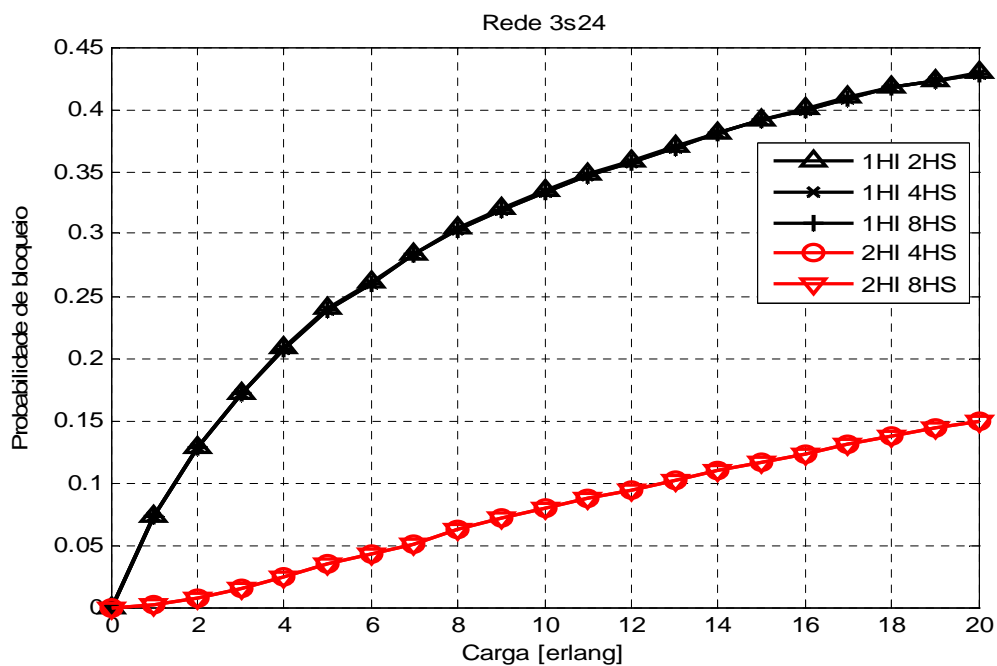


Figura 5.10 Probabilidade de bloqueio da rede 3s24.

Tabela 5.7 Rede 3s24.

	Carga [erlang]	Prob de bloqueio (%)
1HI 2HS	2	12,78
1HI 4HS	2	12,78
1HI 8HS	2	12,78
2HI 4HS	13	10,22
2HI 8HS	13	10,22

Para essa topologia, assim como nas outras estudadas, as configurações com 2 canais na HI, suportam um valor de carga maior, para uma probabilidade de bloqueio próxima a 10%. Da mesma forma, aumentar o número de comprimentos de onda apenas na hierarquia superior não melhora o desempenho da rede segundo esse parâmetro.

É possível notar uma tendência diferente do valor do custo financeiro da rede entre essa com 24 nós e as redes com 12 nós, a partir das mudanças no número de comprimentos de onda, comparando as Figura 5.11 e Figura 5.12. Para a topologia 3s12, a configuração 2HI 4HS, custa 85% do valor da configuração 1HI 8HS, tendo como base o custo segundo o modelo 2. Contudo, a mesma comparação para a topologia 3s24 mostra que esse comportamento não se repete. Nesse caso, a rede 2HI 4HS custa 8,5% a mais do que a outra.

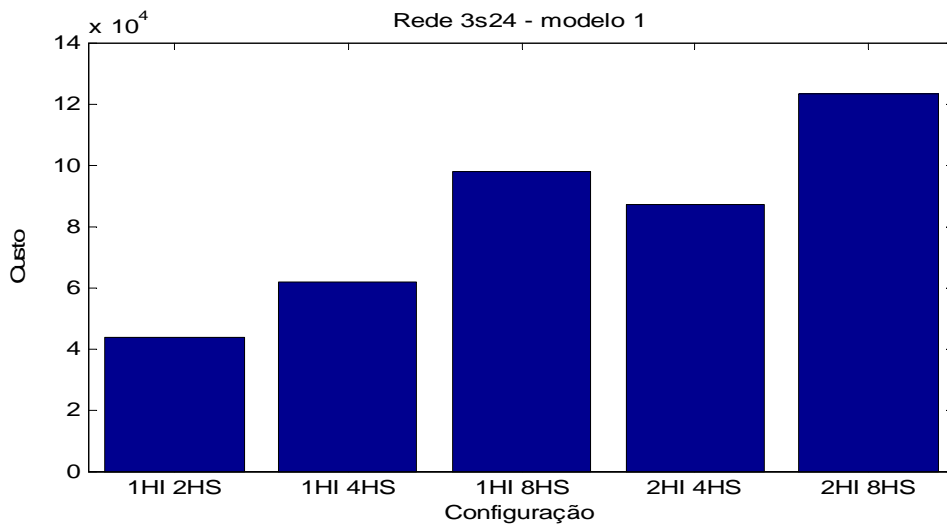


Figura 5.11 Custo segundo modelo 1 para a rede 3s24.

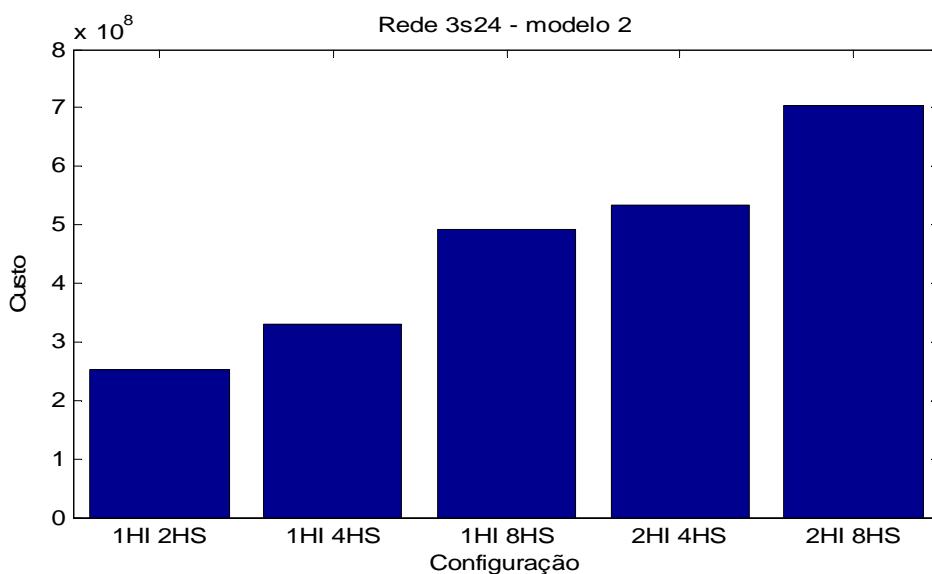


Figura 5.12 Custo segundo modelo 2 para a rede 3s24.

Esse comportamento pode ser analisado de acordo com as expressões que definem o custo dos equipamentos, segundo o modelo 2. Como a rede apresenta o mesmo valor de N e o mesmo valor de H_{min} , a variação do t_{med} é que tem impacto nessa comparação do custo. Para a topologia 3s12, a configuração 2HI 4HS tem t_{med} igual a 6,55, enquanto que para a configuração 1HI 8HS essa variável equivale a 7,64. Assim, essa última configuração apresenta um custo maior. Ocorre o inverso para a topologia 3s24, com o valor de t_{med} sendo menor na configuração 1HI 8HS. Por esse motivo a tendência do custo financeiro é diferente para essa topologia.

Tabela 5.8 Rede 3s24.

	Modelo 1(x10⁴)	Modelo 2(x10⁸)	Carga[Erlangs]	Prob de bloqueio[%]
1HI 2HS	4,36	2,51	2	12,78
1HI 4HS	6,16	3,30	2	12,78
1HI 8HS	9,77	4,93	2	12,78
2HI 4HS	8,72	5,35	13	10,22
2HI 8HS	12,32	7,03	13	10,22

Pode-se notar também uma diferença de tendência entre os dois modelos estudados, através da Tabela 5.8, o que ocorre pela primeira vez, para as topologias simuladas neste trabalho. No modelo 1, assim como para as redes com 12 nós, a configuração 2HI 4HS tem um custo maior do que a 1HI 8HS. Isso ocorre pelo custo do modelo 1 estar diretamente ligado ao custo dos nós.

Entretanto, para o modelo 2, comparando as duas mesmas configurações, a 2HI 4HS apresenta um custo maior, diferentemente do que acontece com as redes de 12 nós apresentado nas seções 5.1 e 5.2. Assim como discutido anteriormente, isso se deve ao parâmetro t_{med} , dado que o tamanho da rede e conseqüentemente a distância média mínima além dos equipamentos utilizados não são alterados.

A partir desses resultados é possível notar que o custo da rede não segue a mesma tendência para todos os casos. Essa diferença de comportamento ocorre devido a organização da rede, não somente pela diferença de tamanho entre a rede com 12 e 24 nós.

5.2.2 Rede 4s24

Nesta seção analisamos os resultados da rede 4s24 de acordo com a variação do número de canais. Os resultados da probabilidade de bloqueio são apresentados na Figura 5.13. Já o custo financeiro dessa topologia, segundo os modelos estudados, são apresentados na sequência, Figura 5.14 e Figura 5.15, para o modelo 1 e 2 respectivamente.

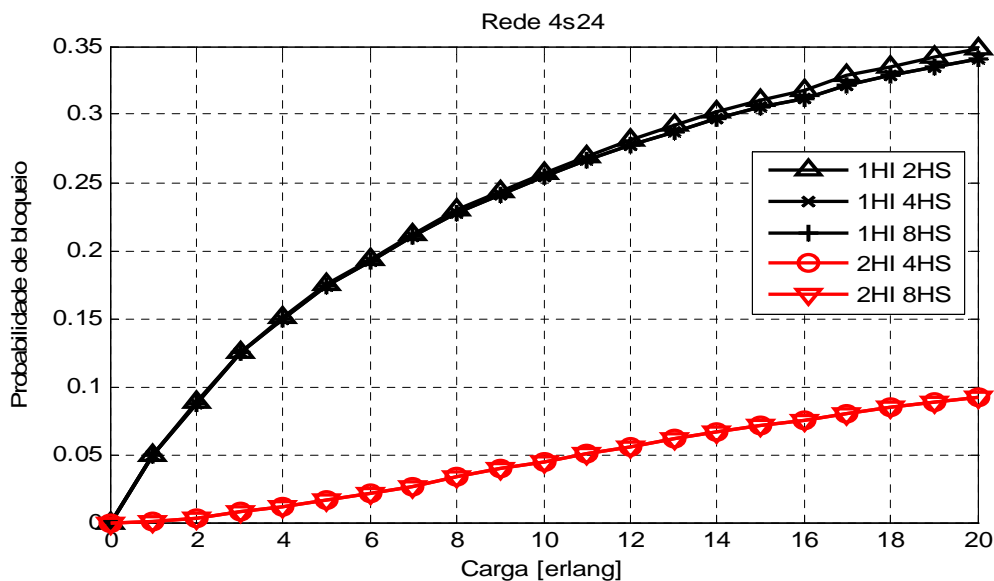


Figura 5.13 Probabilidade de bloqueio para a rede 4s24.

Para uma probabilidade de bloqueio próxima a 10%, essa topologia apresenta o mesmo comportamento que as topologias estudadas anteriormente. Enquanto que as 3 primeiras configurações (1HI 2HS, 1HI 4HS, 1HI 8HS) suportam 3 erlang, as outras duas configurações (2HI 4HS e 2HI 8HS) suportam 22 erlang. Isto demonstra novamente que o aumento do número de canais na hierarquia inferior aumenta de maneira significativa a carga suportada. Além disso, que essa variação precisa ser avaliada, para analisar o custo envolvido nessa mudança.

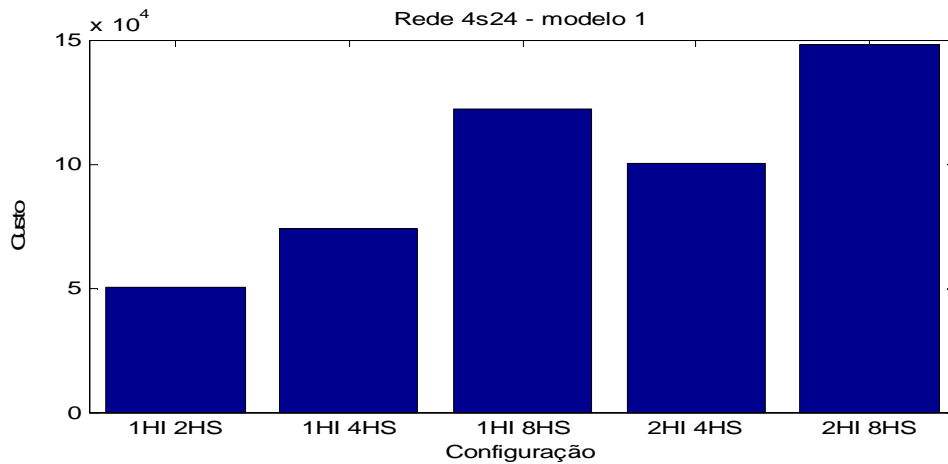


Figura 5.14 Custo segundo modelo 1 para a rede 4s24.

Com relação ao custo, os dois modelos voltam a apresentar a mesma tendência para a variação nas configurações na rede, o que não aconteceu para a rede com 3s24. Segundo o modelo 2, a configuração 2HI 4HS custa 81,27% do valor da configuração 1HI 8HS e suporta quase 8 vezes mais carga, para uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente 10%.

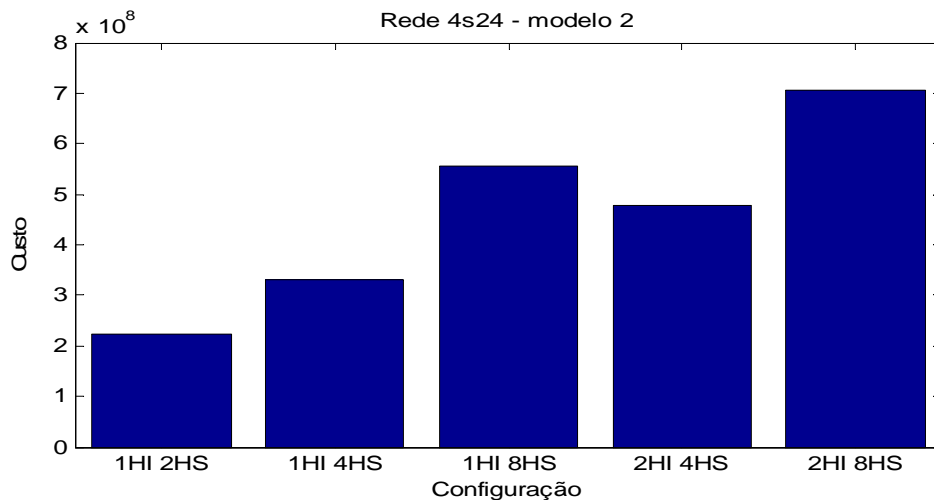


Figura 5.15 Custo segundo modelo 2 para a rede 4s24.

5.2.3 Redes 6s24 e 8s24

A rede de topologia 6s24 também foi estudada e os resultados obtidos estão apresentados nessa seção. Assim como para os casos anteriormente mostrados, a curva da probabilidade de bloqueio, com os 5 tipos de configurações que são levadas em consideração, apresenta o mesmo comportamento para essa rede. Pela Tabela 5.9 é possível comparar a carga suportada em cada uma das configurações para uma probabilidade de bloqueio de

aproximadamente 10%, com a configuração 2HI 4HS suportando 10 vezes mais carga do que a 1HI 8HS.

Tabela 5.9 Rede 6s24.

	Carga [erlang]	Prob de bloqueio [%]
1HI 2HS	4	10,00
1HI 4HS	5	11,34
1HI 8HS	5	11,34
2HI 4HS	50	10,00
2HI 8HS	50	9,80

Com relação ao custo financeiro, os resultados são apresentados na Figura 5.16 e Figura 5.17. Nesse caso, os modelos de custo também apresentam a mesma tendência. Para o modelo 1, a configuração 2HI 4HS custa 73,68% do valor da configuração 1HI 8HS. Cabe notar também, a diferença significativa entre a configuração 2HI 4HS e a 1HI 8HS no modelo 2, devido ao valor de t_{med} , com a primeira custando 67,72% do valor da segunda.

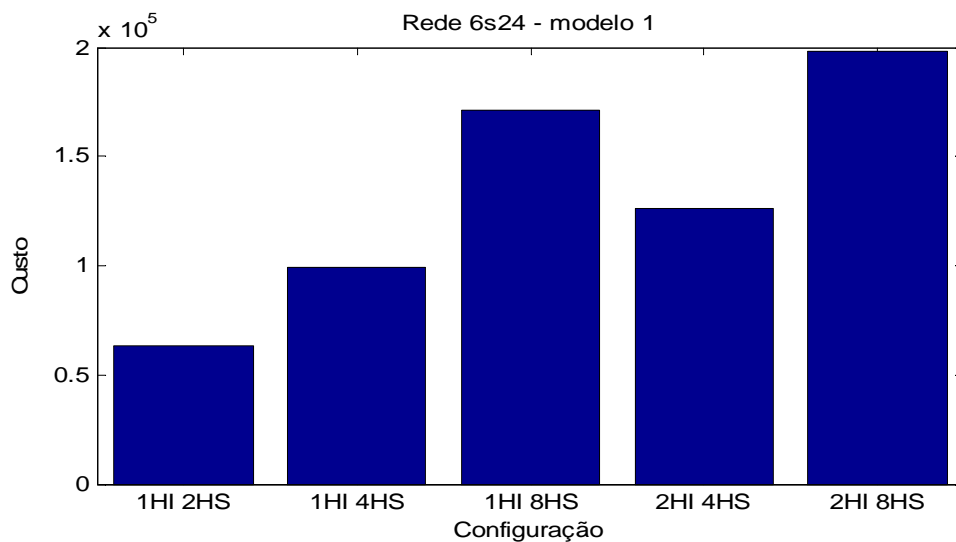


Figura 5.16 Custo segundo modelo 1 para a rede 6s24.

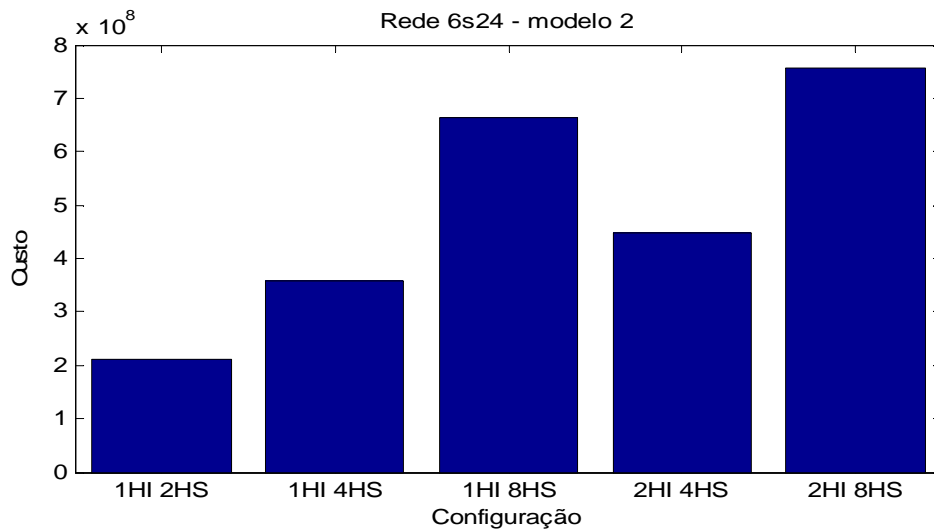


Figura 5.17 Custo segundo modelo 2 para a rede 6s24.

Para uma rede com 24 nós também foi estudada a topologia com 8 super nós, chamada de 8s24. Como os resultados obtidos dessa simulação, tanto para a probabilidade de bloqueio quanto para o custo financeiro, seguem a tendência dos obtidos para a topologia 6s24, os gráficos dos resultados não serão apresentados. Contudo, vale destacar algumas questões.

A carga suportada pela rede 8s24 para uma probabilidade de bloqueio próxima a 10% chega a 140 erlang na configuração 2HI 4HS enquanto que para a configuração 1HI 8HS não passa dos 11 erlang, como apresentada na Tabela 5.10. Além disso, a diferença do custo combinado, segundo o modelo 2, entre essas duas configurações é superior a obtida com a topologia 6s24, com a primeira tendo apenas 58,6% do custo da segunda. Para a topologia 6s24 esse valor é de 67,7%. O modelo 1 também segue essa tendência com o valor de 1HI 8HS sendo significativamente maior que a configuração 2HI 4HS.

Tabela 5.10 Rede 8s24.

	Modelo 1(x10 ⁴)	Modelo 2(x10 ⁸)	Carga[Erlangs]	Prob de bloqueio[%]
1HI 2HS	0,76	2,20	8	10,15
1HI 4HS	1,24	4,04	11	10,19
1HI 8HS	2,20	7,91	11	10,18
2HI 4HS	1,52	4,63	140	10,21
2HI 8HS	2,48	8,53	190	10,09

5.2.4 Análise comparativa das redes com 24 nós

Assim como foi apresentado na seção 5.3, para uma rede de 12 nós, nessa seção os resultados comparativos para a rede de 24 nós são mostrados. Com esse tamanho de rede foram simuladas 4 topologias diferentes, são elas: 3s24, 4s24, 6s24 e 8s24. A comparação apresentada é com relação a configuração 2HI 4HS. A Figura 5.18 mostra o resultado da simulação utilizando o SEDRO.

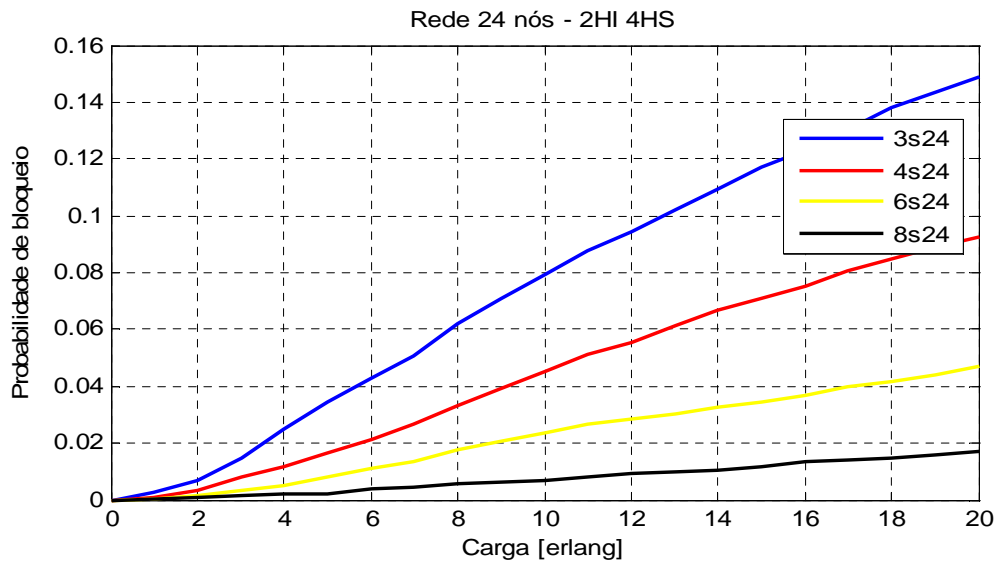


Figura 5.18 Probabilidade para as redes com 24 nós – 2HI 4HS.

A partir desse resultado é possível analisar o impacto do número de super nós na rede para a topologia com 24 nós. Na Tabela 5.11 tem-se a carga suportada para a probabilidade de bloqueio de aproximadamente 10%.

Tabela 5.11 Rede com 24 nós.

	Carga [erlang]	Prob de bloqueio [%]
3s 24	13	10,22
4s 24	23	10,22
6s 24	50	9,94
8s 24	140	10,21

Para a configuração 2HI 4HS, assim como para as outras, o aumento do número de super nós acarreta um aumento na carga suportada de maneira considerável, para uma determinada probabilidade de bloqueio.

Além dessa variável, o custo segundo o modelo 1, também apresenta o mesmo comportamento, com o aumento do valor financeiro da rede para topologias com um maior número de super nós, como mostrado na Figura 5.19. Isso se deve ao aumento no número de nós na HS que tem um peso grande nesse modelo de custo. Como demonstrado na seção 3.4, o custo do nó representa quase a totalidade do custo da rede e o custo do super nó é superior ao custo dos nós da HI.

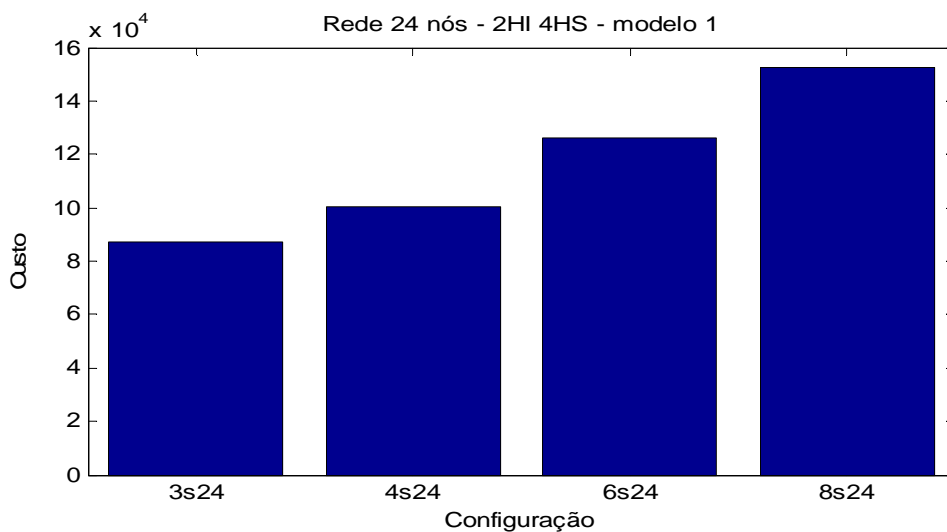


Figura 5.19 Custo segundo modelo 1 para as redes com 24 nós com 2HI 4HS.

Entretanto, o comportamento utilizando o custo combinado, apresentado na Figura 5.20, para a rede com 24 nós é diferente do apresentado para a rede de 12 nós. As topologias com 4 e 6 e 8 super nós tem um custo financeiro menor do que a com 3. Isso acontece devido a maneira como a rede está organizada, o que impacta no custo.

Pela equação de custo desse modelo nota-se que as variáveis H_{min} e t_{med} têm grande influência no cálculo do custo da rede, dado que o tamanho é igual nesse caso. Os valores desses parâmetros são apresentados na Tabela 5.12. Além disso, existe a diferença no número de cada tipo de equipamento sendo utilizado nessas redes, o que também gera essa diferença no valor final da topologia. O comportamento do custo, apresentado na Figura 5.20, é devido a variação desses parâmetros.

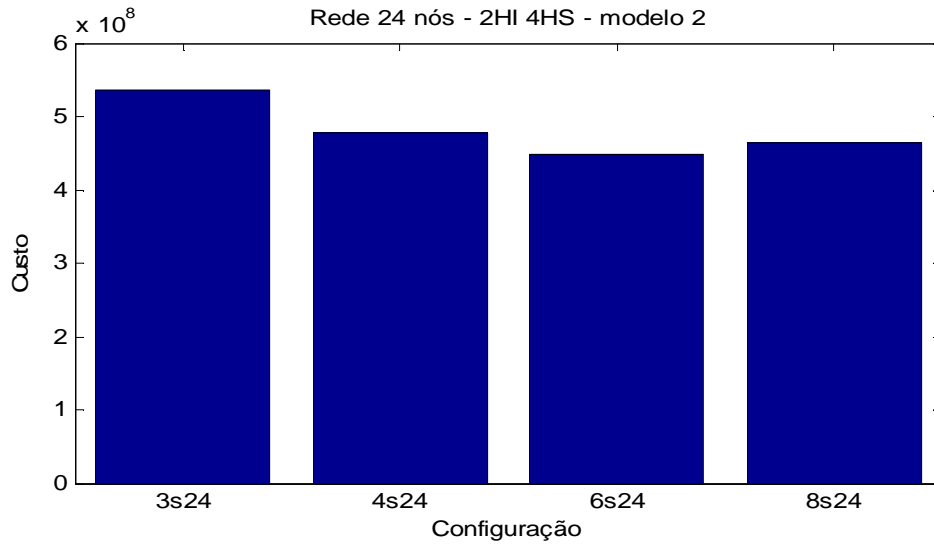


Figura 5.20 Custo segundo modelo 2 para as redes com 24 nós com 2HI 4HS.

Tabela 5.12 Variação de H_{min} e t_{med} para redes com 24 nós para a configuração 2HI 4HS.

2HI 4HS	H_{min}	t_{med}
3s24	4,17	9,74
4s24	3,78	9,65
6s24	3,48	10,09
8s24	3,39	10,96

Os resultados apresentados nessa seção são referentes a configuração 2HI 4HS. Para as outras configurações, os comportamentos, tanto da probabilidade de bloqueio quanto do custo segundo o modelo 1, seguem a mesma tendência. A diferença fica por conta do custo combinado, já que dependendo da configuração, a variação do número médio de comprimentos de onda é mais significativa, causando assim uma variação diferente no custo da rede.

Capítulo 6: Conclusão e trabalhos futuros

Este trabalho explorou a análise de desempenho das redes ópticas, através do estudo de um novo parâmetro, o custo financeiro da rede. Este, combinado com a probabilidade de bloqueio, nos fornece informações para avaliar qual topologia e qual configuração oferece o desempenho mais satisfatório levando em conta esses parâmetros. Neste trabalho foi analisada também a influência da variação de alguns parâmetros como número de super nós da rede e número de comprimentos de onda, com relação ao desempenho da rede.

A probabilidade de bloqueio foi obtida através do simulador SEDRO. Para o custo financeiro foi necessário um estudo aprofundado nos modelos existentes atualmente em busca de um que fosse compatível com este estudo. Além disso, cabe notar, que este trabalho apresenta análises e resultados apenas para um tipo de topologia específica, em anéis hierárquicos, podendo os modelos utilizados não apresentarem as mesmas características para outro tipo de topologia.

É importante ressaltar, como mostrado no capítulo 3, que algumas considerações foram feitas, tanto no simulador como nos modelos de custo, para efeito deste trabalho. No caso do SEDRO foi utilizada a sua versão modificada, feita especificamente para redes em anéis hierárquicos. Essa versão não apresenta a questão da restrição do comprimento de onda e dessa forma o desempenho relacionado à probabilidade de bloqueio é superior a quando utiliza-se o SEDRO sem essa modificação.

Já para os modelos de custo estudados, no primeiro, assumimos os valores das variáveis para o cálculo da distância efetiva do nó iguais aos utilizados em (SINCLAIR,1995). Além disso, assumimos que o enlace na HS tem o dobro do tamanho em relação ao da HI. Ademais, para o modelo 2, consideramos apenas o custo dos equipamentos utilizados, não adicionando o custo da fibra, e apresentamos a possibilidade de uma arquitetura mesclando os dois tipos de equipamentos, pois foi considerado que para o tipo de topologia estudado, essa seria uma estrutura adequada.

Os resultados apresentados no capítulo 4 oferecem informações importantes sobre o desempenho das redes e sobre a influência de cada variável estudada. A comparação, pelo valor absoluto obtido do custo, entre os dois modelos não foi possível devido à grande diferença entre eles dado que levam em consideração variáveis diferentes. No entanto, foi possível comparar se os modelos apresentavam o mesmo comportamento do custo para cada alteração que era feita na rede.

Considerando a probabilidade de bloqueio é possível notar que os resultados obtidos seguem o mesmo padrão. A variação do número de canais na hierarquia inferior, mantendo o mesmo número na hierarquia superior causa uma diferença significativa nesse parâmetro. Quando feito o contrário, no entanto, ocorre pouca variação na probabilidade de bloqueio. Assim, variar muito o número de canais na HS não acarreta diretamente uma melhora no desempenho. Ademais, o aumento no número de super nós na rede, mantendo a mesma configuração, promove uma melhora no parâmetro em questão.

Em relação ao custo segundo o modelo 1 o comportamento da redes estudadas é sempre a mesma. Para todos os casos, na sequência de configurações simuladas, a configuração 2HI 4HS ter um custo menor que a 1HI 8HS. Nesse modelo, a HS tem um custo maior que a HI, tanto pelo custo do enlace, dado que a distância física é considerada maior na HS, quanto no custo do nó, dado que o grau do nó da HS é maior. Assim, o tamanho da rede, isto é, o número de nós dela, tem uma influência nessa tendência de custo entre as diferentes configurações. Ademais, aumentar o número de super nós, mantendo a mesma configuração, acarreta um aumento no custo da rede, por conta dessas variáveis comentadas.

Com os resultados do modelo 2, do custo combinado, foi possível notar, assim como para o modelo 1, que em quase todos os casos a configuração 2HI 4HS apresenta um custo menor que a 1HI 8HS. Isso não ocorre, dentre as topologias estudadas, somente na rede 3s24. Nesse modelo as variáveis que tem grande influência no custo da rede são: a distância média mínima e o número médio de comprimentos de onda, quando são comparadas redes de mesmo tamanho.

Variando a configuração para uma mesma topologia, isto é, mantendo o número de super nós fixo, a distância média mínima é igual para todas as configurações, independente do número de canais. Assim, a variação de t_{med} que impacta na tendência do custo para as configurações estudadas, de acordo com a expressão de custo desse modelo. Somente na rede 3s24 que essa variável apresenta um valor maior para 2HI 4HS do que para 1HI 8HS, tendo assim, a primeira um custo maior que a segunda configuração. Pelos resultados obtidos, quando comparamos as redes com mesmo tamanho, porém com números de super nós diferentes, foi possível notar a influência das variáveis H_{min} e t_{med} . Por causa delas, não é possível afirmar que o aumento no número de super nós acarreta um custo maior para a rede.

Isoladamente, os parâmetros de desempenho da rede estudados, oferecem informações relevantes sobre a tendência, porém a análise não fica suficientemente completa. Utilizando os dois parâmetros em conjunto é possível analisar se a variação de alguma variável da rede é viável, comparando a variação do custo com o efeito na probabilidade de bloqueio.

Como apresentado nos resultados, dentre as configurações estudadas, a probabilidade de bloqueio é reduzida de forma significativa para as configurações com 2HI estudadas em relação às com 1HI. Porém, a diferença é pequena entre a 2HI 4HS e a 2HI 8HS. A partir disso, o custo financeiro tem grande influência na escolha da configuração pois a melhora na probabilidade de bloqueio pode significar um grande aumento no custo da rede. Dessa análise, foi possível concluir que a configuração 2HI 4HS, em geral, apresenta o desempenho mais satisfatório para as topologias estudadas.

Com esse trabalho foi possível aprimorar o estudo de redes ópticas em anéis hierárquicos, pois é levado em consideração um parâmetro que influencia na viabilidade da rede, o custo financeiro. Dessa forma é possível analisar melhor o investimento a ser feito e os benefícios que serão conseguidos com o aumento do custo financeiro a partir da variação de alguns parâmetros como o tamanho da rede, com relação a nó e super nó, e a variação no número de comprimentos de onda disponíveis.

Para trabalhos futuros pode ser relevante incluir outra variável de desempenho de rede, buscando uma aproximação com as redes existentes atualmente e com o intuito de analisar de forma mais aprofundada as variações dos parâmetros da rede. Além disso, trabalhando com redes existentes, a utilização de outros equipamentos, como o amplificador, pode ser analisada, além de outras funcionalidades de uma rede óptica.

Referências Bibliográficas

- Simmons, J. M. **Optical Network Design and Planning**. New York: Springer, 2008.
- Murthy, C. S. R.; Gurusamy, M. **WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- Kartalopoulos, S. V. **Next Generation Intelligent Optical Networks: From Access to Backbone**. New York: Springer, 2008.
- Zulkifli, N. **Resource Allocation in All-Optical Networks: Dispersion-optimized Routing and Wavelength Assignment (RWA) Algorithms for Heterogeneous Optical Services**. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2009.
- Lavagnoli, Gabriel Lessa da Silva. **Análise estatística de projeto de topologias virtuais para redes ópticas em anéis hierárquicos**. 2008. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.
- Paiva, Marcia Helena Moreira. **Aplicação de sistemas baseados em regras *fuzzy* para o roteamento em redes ópticas**. 2008. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.
- Rocha, Renato Silva. **Implementação de rotinas computacionais para redes ópticas com topologia em hierarquia no software SEDRO**. 2009. 32f. Projeto de Graduação (Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- Lima, Marcelo de Oliveira. **METODOLOGIA PARA O PROJETO COMPLETO DE REDES ÓPTICAS COM TOPOLOGIA EM HIERARQUIA**. 2010. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.
- Maioli, Célio Proliciano Maioli. **Dimensionamento de redes ópticas dinâmicas para Data-Grid Services**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- Shi, J.; Fonseka, J. P. **Hierarchical Self-Healing Rings**. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, No. 6, 1995.
- Kitani, T. et al. **Hierarchical Logical Topology in WDM Ring Networks with Limited ADMs**. Springer, Vol 1, No 2, 2008.
- Pinto, A. N.; Pavan, C.; Morais, R. M. **A Statistical Model for CapEx Fast Calculation in Optical Transport Networks**. ICTO N, 2009.

- Sinclair, M. C. **Minimum Cost Topology Optimisation of the Cost 239 European Optical Network**, 1995
- Chen, B. K.; Tobagi, F. A. **Optical Network Design to Minimize Switching and Transceiver Equipment Costs**. In: Optical Switching and Networking 6, 171-180, Elsevier, 2009
- Scheffel, M. **Optimal Topology Planning of Optical Networks with Respect to Overall Design Costs**, In: Optical Switching and Networking 2, 239-248, Elsevier, 2005
- Guan, K. C. **Cost Effective Optical Network Architecture – A Joint Optimization of Topology, Switching, routing and Wavelength Assignment**. Tese (Ph.D.), MIT, 2007.
- Guan, K. C.; Chan, V. W. S. **Cost-Efficient Fiber Connection Topology Design for Metropolitan Area WDM Networks**. J. Optical Communication Network, Vol 1, No. 1, 2009.
- Sato, K.; Hasegawa H. **Optical Networking Technologies That Will Create Future Bandwidth-Abundant Networks**. **J. Optical Communication Networks**. 2009
- Liu, H.; Tobagi, F. A. **Physical topology design for all-optical networks**, In: Optical Switching and Networking 5, 219–231, Elsevier, 2008.