

Uma Metodologia para Planejamento de Redes de Circuitos Ópticos Transparentes com QoS no Nível do Usuário

André Soares¹, Gilvan Durães², José Maranhão³, William Giozza⁴, Paulo Cunha⁵

¹Universidade Federal do Piauí – UFPI, ²Universidade Salvador - Unifacs,

³Universidade de Campinas - Unicamp, ⁴Universidade de Brasília - UnB,

⁵Centro de Informática – Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Resumo. Atualmente a tecnologia de redes ópticas transparentes é apontada como a principal infraestrutura para suportar a crescente demanda de tráfego da Internet como também para prover serviços de rede diferenciados para aplicações com exigentes requisitos de qualidade de serviço (por exemplo, aplicações de e-science). Isso sugere uma provisão de serviços com garantias de qualidade de acordo com as necessidades de cada usuário. Este artigo apresenta uma metodologia para o planejamento de redes de circuitos ópticos transparentes com garantia de QoS no nível do usuário.

Abstract. Nowadays all-optical network technology is viewed as the main infrastructure to support the increasing Internet traffic demand and to provide services for applications with higher requirements of quality of service (e.g., e-science applications). This suggests a customized service provision with guarantee of quality of service in accordance with the requirements of each user. This paper presents a methodology to plan all-optical networks in order to provide lightpaths dynamically with guaranteed quality of service requirements.

1. Introdução

O crescimento do número de usuários da Internet e o surgimento de novas aplicações envolvendo voz e vídeo como vídeo sob demanda, teleconferência, imagens médicas de alta resolução etc., tem provocado um aumento considerável da demanda de banda passante nas redes de transporte que constituem os *backbones* dos provedores de serviços de telecomunicações [12].

Diante deste cenário, a tecnologia de redes ópticas transparentes é apontada como a principal candidata capaz de prover grande largura de banda com garantias de *Quality of Service* (QoS). Em uma rede óptica transparente o sinal óptico é transmitido ao longo de nós intermediários sem a realização de conversão para o domínio eletrônico. Desta forma, o custo associado de uma comutação de alta velocidade em meio eletrônico é eliminado. As redes ópticas transparentes tipicamente utilizam tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) que realiza multiplexação por divisão de comprimentos de onda [6]. Dentro de uma única fibra são estabelecidos, simultaneamente, múltiplos canais ópticos que operam em diferentes comprimentos de onda.

A comutação de circuitos ópticos (*Optical Circuit Switching* - OCS) é a tecnologia de comutação mais amadurecida atualmente para redes ópticas WDM que não realizam processamento eletrônico intermediário. Apesar da ineficiência em comunicações de curta duração, a comutação OCS permite a reserva de recursos com garantia de QoS para comunicações no circuito óptico. Com o avanço das redes de acesso banda larga e

de aplicações cada vez mais sofisticadas, caracterizadas por um tráfego dinâmico e por exigentes requisitos de QoS, surge a necessidade de se estabelecer circuitos ópticos dinamicamente. O foco deste artigo está nas redes de circuitos ópticos transparentes que operam sob tráfego dinâmico.

Este artigo apresenta uma metodologia para o planejamento de redes de circuitos ópticos transparente no sentido de relacionar o conjunto de recursos disponíveis e a sua capacidade em atender usuários com a garantia de QoS. Essa metodologia integra, em um mesmo cenário, problemas relevantes no contexto das redes de circuitos ópticos transparentes: roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA) [13], [1], sobrevivência em redes ópticas transparentes [10] e diferenciação de serviço [7].

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta as contribuições e os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta a metodologia proposta para o planejamento de redes OCS com garantia de qualidade de serviço. Um estudo de avaliação de desempenho que demonstra o potencial da metodologia proposta é feito na Seção 4. Por fim as conclusões são apresentadas na última seção.

2. Contribuições e Trabalhos Relacionados

A principal contribuição deste artigo é a proposta de uma metodologia pioneira para planejamento de redes de circuitos ópticos dinâmicos e transparentes (OCS) com garantia de QoS no nível do usuário. Atualmente é possível multiplexar em uma única fibra 40 comprimentos de onda cada um operando a 40 Gbps. Assim, o usuário da rede óptica transparente é uma entidade que solicita o estabelecimento de circuitos ópticos com altíssima capacidade de transmissão. O usuário da rede óptica pode ser, por exemplo, um laboratório de pesquisa que trabalha com virtualização, uma rede cliente que deseja enviar um tráfego de dados através da rede óptica, um emissora de TV que transmite simultaneamente o sinal de várias câmeras com alta definição etc. As aplicações desses usuários (e.g. aplicações de *e-science*) vão requerer altos níveis de QoS que devem ser especificados nos seus contratos com a operadora de rede.

Segundo nosso conhecimento, a literatura relacionada não apresenta soluções para o planejamento de redes ópticas com garantia de QoS no nível do usuário. Os trabalhos propostos na literatura ([2], [3], [4], [5], [12] etc) se preocupam basicamente como a comparação dos algoritmos RWA e estratégias de sobrevivência sob o ponto de vista do desempenho médio da rede. Em [9] os autores mostram que o desempenho médio da rede é pouco apropriado para dimensionar o nível de qualidade de um serviço a ser entregue para um determinado usuário da rede. Por isso, a metodologia proposta realiza o planejamento da rede óptica com base na QoS dos circuitos de pior desempenho dos seus usuários. Isso é fundamental para garantir os requisitos de QoS de uma dada classe de serviços.

Devido à variedade de usuários e tipos de aplicações com diferentes requisitos de rede, é fundamental o uso de mecanismos para prover serviços diferenciados de acordo com os perfis dos usuários da rede óptica transparente. Por exemplo, usuários mais exigentes podem ter um serviço de melhor qualidade pagando um preço maior. Usuários com requisitos de rede semelhantes podem ser agrupados em uma mesma classe de serviço. Normalmente o provedor de serviço (operadora) define um número de classes de serviço e agrupa os usuários em função dos requisitos especificados em cada classe. Neste contexto, um contrato de nível de serviço (*Service Level Agreement* - SLA) deve ser definido a fim de especificar os parâmetros de QoS que devem ser garantidos pelo provedor de

serviço da rede óptica transparente. Mediante a requisição de uma conexão óptica por um usuário de uma determinada classe, a operadora precisa prover dinamicamente um circuito óptico, respeitando os parâmetros de QoS definidos no SLA da classe do respectivo usuário. Para isso a operadora da rede óptica transparente precisa utilizar de uma inteligência na camada óptica, objetivando uma melhor utilização dos recursos em função dos SLAs definidos. Isso significa maximizar o número de usuários da rede garantindo os níveis de QoS contratados.

A metodologia proposta neste artigo para o planejamento de redes de circuitos ópticos transparentes e dinâmicos visa relacionar os recursos da rede com o número de usuários e os seus requisitos de QoS. Neste sentido, a metodologia proposta permite, por exemplo, responder às seguintes questões: i) Considerando uma dada topologia de rede com diferentes usuários em termos de requisitos de QoS, como deve ser feito o planejamento das estratégias de otimização de recursos (algoritmos RWA, técnicas de sobrevivência etc.) da rede? ii) Quais algoritmos RWA e técnicas de sobrevivência devem ser utilizados de forma a garantir os requisitos de qualidade para diferentes classes de serviço de usuários? Por exemplo, garantir que as recuperações de conexões afetadas por rupturas de enlace de fibra sejam feitas em até 50 ms e admissões de novas conexões sejam feitas em até 1 minuto. iii) Quantos usuários de uma determinada classe de serviço podem ser atendidos em cada nó da rede com garantia de QoS?

3. Metodologia Proposta

A metodologia envolve uma modelagem apropriada para o planejamento de redes ópticas que contempla os seguintes objetivos: i) Modelar individualmente o tráfego de cada usuário da rede; ii) Investigar o desempenho da rede considerando a diferenciação de serviços através do conceito de classes de serviço; iii) Definir para cada classe de serviço as estratégias de alocação de recursos (algoritmo RWA, a estratégia de sobrevivência da rede e a habilidade de conversão de comprimento de onda) e iv) Investigar individualmente os níveis de QoS realmente entregues para cada classe de serviço (desempenho de cada usuário da rede em termos de tempo de admissão, capacidade de sobrevivência e tempo para recuperação de sua conexão após uma falha na rede). Além disso, a metodologia envolve a definição de métricas de desempenho apropriadas para, através de estudos de simulação, investigar a capacidade da rede em atender um determinado número de usuários com garantia de qualidade de serviço.

Para ilustrar e apresentar o funcionamento da metodologia proposta para o planejamento considera-se o cenário detalhado a seguir. Vale destacar que algumas características deste estudo de planejamento foram escolhidas empiricamente com o objetivo de ilustrar o potencial da metodologia proposta.

Passo 1: definir a infraestrutura de rede, topologia e o número de comprimento de onda. Topologia da rede NSFNet com 40 comprimentos de onda para cada sentido do enlace.

Passo 2: definir a demanda de tráfego de cada usuário da rede. Para este estudo de planejamento, assume-se que qualquer usuário, independente da classe de serviço, gera uma carga de tráfego de 0,375 Erlangs. Essa carga de tráfego corresponde a um tempo entre requisições de circuitos distribuído exponencialmente com média de 8 horas e o um tempo de duração de circuito distribuído exponencialmente com média de 3 horas. É relevante destacar que esta metodologia também contempla estudos de planejamentos em que usuários de classes de serviços diferentes geram cargas de tráfego distintas.

Passo 3: definir as classes de serviços e seus requisitos de QoS. Assume-se neste estudo de planejamento que a operadora de rede deseja trabalhar com 3 classes de serviço: Ouro, Prata e Bronze. Neste cenário, considera-se que o número de usuários por classe de serviço em cada nó da rede será ponderado pelos pesos 1, 3 e 6 para as classes Ouro, Prata e Bronze, respectivamente. Esses números foram assumidos arbitrariamente para representar a diferença de demanda esperada em função dos diferentes níveis de QoS das classes de serviço. Isso não impede que outros estudos sejam realizados sob diferentes ponderações em termos do número de usuários por classe. Considera-se que usuários da classe Ouro devem ter seus circuitos admitidos em até 1 minuto, ter 98% de capacidade de sobrevivência, ter suas conexões recuperadas em até 50 ms em caso de falha única e 100 ms em caso de falhas simultâneas. A capacidade de sobrevivência é a probabilidade de recuperação de uma falha por uma dada estratégia de sobrevivência. O tempo de admissão é o período de tempo entre a requisição de um circuito e o instante em que ele fica operacional. O tempo de recuperação é o tempo necessário para uma dada estratégia de sobrevivência recuperar a conexão após a ocorrência de falha. Assume-se que usuários da classe Prata devem ter seus circuitos admitidos em até 10 minutos, ter 85% de capacidade de sobrevivência e ter suas conexões recuperadas em até 100 ms em caso de falha única ou falhas simultâneas. Para usuários da classe Bronze assume-se que os circuitos devem ser admitidos em até 100 minutos, suas conexões devem ter 70% de capacidade de sobrevivência com tempo de recuperação de até 100ms, independente do tipo de falha (única ou simultânea).

Passo 4: incrementar o número de usuários em cada nó da rede e medir a QoS. Neste passo da metodologia o número de usuários em cada nó da rede é incrementado gradualmente, respeitando os pesos de cada classe de serviço. Por exemplo, na primeira simulação posiciona-se 1 usuário da classe Ouro, 3 usuários da classe Prata e 6 usuários da classe Bronze em cada nó da rede. Em seguida é feita uma simulação com 2, 6 e 12 usuários das classes Ouro, Prata e Bronze respectivamente. Esse processo de incrementar o número de usuários é continuado até que algum usuário de qualquer classe de serviço obtenha um desempenho inferior ao desempenho definido no seu SLA. Com essa abordagem descobre-se o número máximo ideal comum de usuários por nó, isto é, o número máximo comum de usuários por nó que garante a QoS em termos de tempo de admissão, capacidade de sobrevivência e tempo de recuperação. Esta metodologia permite também uma otimização das estratégias de alocação de recursos de forma a aumentar o número máximo ideal comum. Isso é possível uma vez que os estudos de simulação viabilizam que o especialista de planejamento compreenda o comportamento da rede identificando pontos de gargalo. Isso normalmente potencializa a alteração e/ou a customização das estratégias de alocação de recursos com o objetivo de maximizar o número máximo ideal comum de usuários por nó. Dessa forma, pode-se dar privilégios a usuários que não obtiveram a QoS com o aumento do número de usuários por nó. Por exemplo, utilizar *Waveband* (conjunto de comprimentos de onda que são utilizados apenas por um subconjunto de usuários da rede) [9] para privilegiar usuários com alto tempo de admissão.

A Figura 1 ilustra o funcionamento da metodologia proposta para o planejamento da rede óptica com garantia de QoS no nível do usuário.

A Figura 1 destaca o processo de incrementar o número de usuários por nó da rede a procura de maximizar o número de usuários com garantia de QoS (número máximo ideal comum). A análise feita no Passo 4 deve ter o objetivo de suprir deficiências de uma dada classe de serviço em termos de tempo de admissão capacidade de sobrevivência e/ou tempo de recuperação.

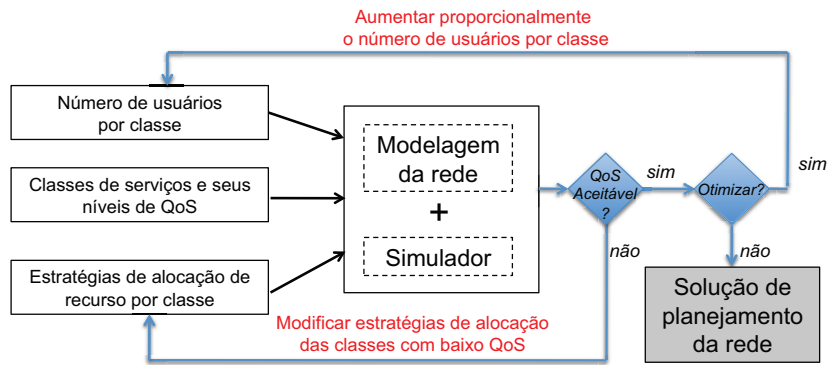


Figura 1: Diagrama da metodologia proposta.

3.1. Métricas de Qualidade de Serviço

Sobrevivência em redes ópticas é a capacidade da rede continuar operacional mesmo após a ocorrência de falhas. A estratégia Proteção Dedicada de Caminho (PDC) é uma estratégia de proteção pró-ativa em que são estabelecidos dois circuitos em rotas disjuntas, um circuito primário e outro secundário. Isto é, existe a alocação de um circuito redundante para superar uma eventual falha da rede. Se um dos dois circuitos não puder ser estabelecido a conexão é bloqueada. A Restauração Simples (RS) é uma estratégia de sobrevivência reativa em que uma rota secundária somente será selecionada e terá recursos alocados depois da detecção da falha. PDC-RS é uma estratégia de sobrevivência híbrida que opera como PDC em caso de falha única e funciona como RS em caso de falhas simultâneas.

A seguir é descrito como são obtidas, via simulação, as métricas de tempo de admissão, capacidade de sobrevivência e tempo de recuperação.

A seguinte equação mostra o cálculo do tempo médio de admissão para a conexão $C(o, d)$ feita por um usuário da classe de serviço cl : $D_{C(o,d)}^{cl} = \frac{\sum_{i=1}^{\theta} (F_{C(o,d)}^{cl})^i}{\theta} + T_{C(o,d)}$, em que, $F_{C(o,d)}^{cl}$ é o tempo que a i -ésima requisição para conexão $C(o, d)$ da classe de serviço cl espera até que a rede tenha recursos livres para atendê-la e θ é o número de requisições de conexões $C(o, d)$ da classe de serviço cl feitas na simulação. Quando uma requisição é atendida imediatamente, o tempo de admissão é igual ao tempo de estabelecimento da conexão que é dado pela equação $T_{C(o,d)} = t_{prop} + 5 \cdot t_{msg} + t_{OXC} + t_{RWA}$, em que t_{prop} é o tempo acumulado relativo às propagações de mensagens, t_{msg} é o tempo de processamento de mensagem, t_{OXC} é o tempo de configuração de um *optical crossconnect* (OXC) e t_{RWA} é o tempo para computar uma rota e um comprimento de onda. O tempo de estabelecimento de uma conexão não depende da classe de serviço.

Para um mesmo tipo de conexão $C(o, d)$ pode haver uma diferença significativa entre o tempo médio de admissão expresso por $D_{C(o,d)}^{cl}$ e o maior tempo de admissão dentre θ observações feitas na simulação. Isto pode ocorrer porque algumas requisições precisam esperar um tempo ($F_{C(o,d)}^{cl}$) até que a rede tenha recursos livres para atendê-las.

O estudo dos aspectos ligados à sobrevivência em redes ópticas transparentes está diretamente ligados à geração de falhas. Cada enlace possui um gerador de falhas independente. De acordo com as estatísticas de falhas apresentadas em [2], a taxa de geração de falhas em um enlace é o seu comprimento em km vezes $3,1075 \cdot 10^{-7}$. Após a geração de uma falha em um determinado enlace identificam-se quais as conexões ópticas ativas que atravessam o enlace falho e se as estratégias de sobrevivência utilizadas por essas

conexões superam ou não a falha. O tempo médio para reparação do enlace falho é de 12 horas [2]. Assume-se que o tempo entre a geração de falhas e o tempo para reparação do enlace falho são distribuídos exponencialmente.

A capacidade de sobrevivência é um parâmetro que deve ser exigido em termos de qualidade de serviço. Ela indica a probabilidade de uma conexão sobreviver a uma falha da rede. Esta modelagem contempla apenas as falhas de enlaces que são as mais comuns. A equação abaixo mostra o cálculo da capacidade de sobrevivência média para a conexão $C(o, d)$ da classe cl : $S_{C(o,d)}^{cl} = \frac{NS_{C(o,d)}^{cl}}{NA_{C(o,d)}^{cl}}$, em que $NA_{C(o,d)}^{cl}$ é o número de vezes que a conexão $C(o, d)$ da classe de serviço cl teve um de seus enlaces afetados por falha e $NS_{C(o,d)}^{cl}$ é quantas vezes $C(o, d)$ da classe de serviço cl conseguiu sobreviver à falha.

Em termos de habilidade de sobrevivência da rede óptica não é suficiente estudar somente a capacidade de sobrevivência. É fundamental saber quanto tempo é necessário para recuperar uma determinada conexão óptica afetada por uma falha. O tempo para recuperação de uma conexão está em função da estratégia de sobrevivência utilizada.

O tempo médio de recuperação de uma conexão $C(o, d)$ da classe cl que utiliza Proteção Dedicada de Caminho é dado pela equação: $R_{C(o,d)}^{cl} = t_{detec} + t_{prop} + 3 \cdot t_{msg} + t_{OXC}$, em que t_{detec} é o tempo para o nó adjacente detectar a falha, t_{prop} é tempo acumulado relativo às propagações de mensagens, t_{msg} é o tempo de processamento de mensagem e t_{OXC} é o tempo de configuração de um OXC. As sinalizações que envolvem o nó central do Plano de Controle e os nós OXCs são feitas em paralelo. Para computar o atraso de propagação dessas mensagens considera-se a distância do nó da rota em questão mais afastado do nó central do Plano de Controle. Isso também é assumido na sinalização de retorno dos nós OXCs para o nó central do Plano de Controle.

O tempo médio de recuperação de uma conexão $C(o, d)$ da classe cl que utiliza RS é dado pela equação: $R_{C(o,d)}^{cl} = t_{detec} + t_{prop} + 5 \cdot t_{msg} + t_{RWA} + t_{OXC}$, em que t_{detec} é o tempo para o nó adjacente detectar a falha, t_{prop} é o tempo acumulado relativo às propagações de mensagens, t_{msg} é o tempo de processamento de mensagem, t_{OXC} é o tempo de configuração de um OXC e t_{RWA} é o tempo para executar o algoritmo RWA.

Note que a variação do $R_{C(o,d)}^{cl}$ está em função do enlace utilizado pela conexão que falhou. Portanto, o tempo máximo para recuperação de uma dada conexão $C(o, d)$ da classe cl é determinístico e é dado pela equação: $Rmax_{C(o,d)}^{cl} = \max_{e_i \in \gamma} (R_{C(o,d)}^{cl}(e_i))$, em que $R_{C(o,d)}^{cl}(e_i)$ é o tempo de recuperação da conexão $C(o, d)$ da classe cl quando ocorre a falha do enlace e_i e γ é o conjunto de todos os enlaces utilizados pela a conexão $C(o, d)$.

4. Estudo de Planejamento da Rede NSFnet

Nesta seção é apresentado um estudo de planejamento utilizando a metodologia proposta. Esse estudo considera o cenário apresentado na seção anterior. As simulações foram realizadas com a ferramenta TONetS [8]

Os tempos máximos de recuperação por cada nó de origem das conexões quando a estratégia de sobrevivência PDC-RS é utilizada, considerando o cenário de falha única e falhas simultâneas, são ilustrados respectivamente nas Figuras 2a e 2b. Vale destacar que a 2b ilustra também o tempo máximo de recuperação para a estratégia RS em cenários de falha única ou simultânea.

Quando apenas um enlace da rede falha por vez (Fig. 2a) garante-se que a recuperação é feita em até 48 ms. Nota-se com a análise da Figura 2b que no pior caso,

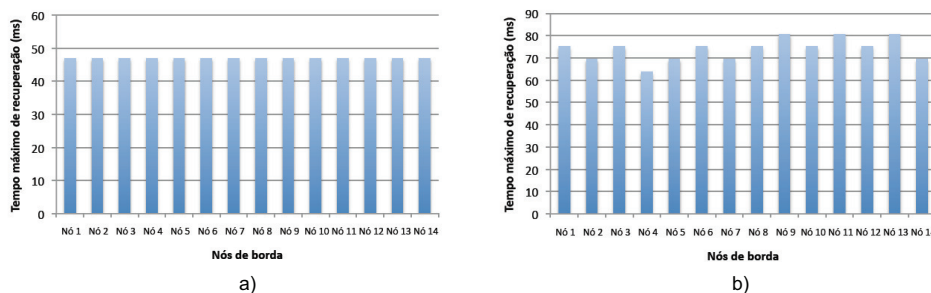


Figura 2: a) Tempo máximo de recuperação dos circuitos gerados pelos usuários dos respectivos nós de borda sob cenário de falhas única. b) Tempo máximo de recuperação dos circuitos gerados pelos usuários dos respectivos nós de borda sob cenário de falhas simultâneas.

considerando a ocorrência de falhas simultâneas na rede, as conexões são recuperadas em até 80 ms. Portanto, os usuários da classe Ouro devem utilizar a estratégia PDC-RS e os usuários da classe Prata e Bronze devem utilizar a estratégia RS. Assim, os usuários da classe Ouro em caso de falha única possuem tempo de recuperação de 48 ms e de 80 ms em falhas simultâneas, uma vez que utilizam a estratégia de sobrevivência PDC-RS. Os usuários das classes Prata e Bronze obtêm tempo de recuperação de 80 ms pois utiliza a estratégia RS. Em situações de falhas simultâneas as conexões da classe Ouro apresentam praticamente o mesmo desempenho das classes Prata e Bronze pois todas as três classes acabam utilizando a RS. Portanto, os requisitos de tempo de recuperação são respeitados para todas as três classes de serviço.

A Figura 3 mostra os níveis de QoS obtidos pelos usuários da rede ligados aos diferentes nós de borda em termos de tempo de admissão e capacidade de sobrevivência. As subfiguras 3 a), c) e e) apresentam a QoS considerando o tempo de admissão para os usuários das classes Ouro, Prata e Bronze respectivamente. A capacidade de sobrevivência para cada uma das três classes de serviço é evidenciada nas subfiguras 3 b), d) e f). Destaca-se em vermelho as demandas de carga que impedem a garantia dos níveis de QoS de cada classe de serviço.

Respeitada a composição de 10%, 30% e 60% usuários das classes Ouro, Prata e Bronze por nó e garantindo os respectivos níveis de QoS em termos de tempo de admissão, capacidade de sobrevivência e tempo de recuperação, a infraestrutura de rede considerada é capaz de atender no máximo 50 usuários por nó. Isto é, 5, 15 e 30 usuários respectivamente das classes Ouro, Prata e Bronze.

Para as classes Prata e Bronze sob a análise do tempo de admissão a rede apresentou uma flexibilidade ligeiramente maior quando comparada com a capacidade de sobrevivência. Analisando apenas a métrica de tempo de admissão, a rede teve capacidade de atender pelo menos 18 (30% de 60) e 42 (60% de 70) usuários por nó das classes Prata e Bronze respectivamente.

Destaca-se que o alto custo da alocação de recursos redundantes feita pela estratégia PDC-RS no atendimento de usuários da classe Ouro é justificado pelo compromisso desta classe de serviço em garantir a recuperação de conexões em curtos intervalos de tempo (até 50 ms para falha simples e até 100 ms para falhas simultâneas).

A utilização média da rede em função da carga de tráfego gerada por nó é ilustrada na Figura 4.

a)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
% de conexões da classe Ouro com tempo de admissão > 1 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	1,3%	11,7%	44,9%
Nó 2	0,0%	0,0%	1,3%	12,6%	47,9%
Nó 3	0,0%	0,0%	1,8%	16,6%	57,3%
Nó 4	0,0%	0,0%	1,1%	11,0%	43,1%
Nó 5	0,0%	0,0%	1,6%	16,1%	56,2%
Nó 6	0,0%	0,0%	1,7%	16,4%	58,0%
Nó 7	0,0%	0,0%	1,7%	16,3%	54,9%
Nó 8	0,0%	0,0%	1,7%	15,6%	53,2%
Nó 9	0,0%	0,0%	1,9%	18,1%	59,8%
Nó 10	0,0%	0,0%	1,6%	16,4%	58,0%
Nó 11	0,0%	0,1%	2,1%	17,4%	57,4%
Nó 12	0,0%	0,0%	1,8%	17,7%	59,8%
Nó 13	0,0%	0,1%	2,0%	17,1%	57,4%
Nó 14	0,0%	0,0%	1,6%	16,0%	56,5%
erro < 0,3%					

b)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Ouro					
Nó 1	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%
Nó 2	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%
Nó 3	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	97,0%
Nó 4	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	97,0%
Nó 5	99,0%	98,0%	98,0%	97,0%	97,0%
Nó 6	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%
Nó 7	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%
Nó 8	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%
Nó 9	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%
Nó 10	99,0%	98,0%	98,0%	97,0%	97,0%
Nó 11	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%
Nó 12	98,0%	99,0%	98,0%	97,0%	97,0%
Nó 13	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%	97,0%
Nó 14	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%
erro < 0,7%					

c)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
% de conexões da classe Prata com tempo de admissão > 10 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	0,3%	3,2%	16,5%
Nó 2	0,0%	0,0%	0,3%	3,2%	16,0%
Nó 3	0,0%	0,0%	0,5%	6,0%	27,6%
Nó 4	0,0%	0,0%	0,4%	6,0%	28,6%
Nó 5	0,0%	0,0%	0,2%	2,8%	15,2%
Nó 6	0,0%	0,0%	0,4%	3,5%	18,0%
Nó 7	0,0%	0,0%	0,2%	2,2%	11,3%
Nó 8	0,0%	0,0%	0,2%	3,0%	15,0%
Nó 9	0,0%	0,0%	0,3%	3,2%	15,8%
Nó 10	0,0%	0,0%	0,3%	3,3%	17,4%
Nó 11	0,0%	0,0%	0,6%	6,8%	29,6%
Nó 12	0,0%	0,0%	0,5%	6,0%	27,4%
Nó 13	0,0%	0,0%	0,3%	3,4%	16,9%
Nó 14	0,0%	0,0%	0,3%	3,4%	16,8%
erro < 0,2%					

d)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Prata					
Nó 1	99,0%	98,0%	86,0%	53,0%	20,0%
Nó 2	99,0%	98,0%	87,0%	53,0%	21,0%
Nó 3	99,0%	99,0%	93,0%	69,0%	35,0%
Nó 4	99,0%	99,0%	91,0%	62,0%	30,0%
Nó 5	99,0%	98,0%	93,0%	69,0%	36,0%
Nó 6	99,0%	98,0%	87,0%	56,0%	22,0%
Nó 7	99,0%	98,0%	91,0%	58,0%	19,0%
Nó 8	99,0%	98,0%	89,0%	55,0%	17,0%
Nó 9	99,0%	98,0%	89,0%	60,0%	25,0%
Nó 10	99,0%	99,0%	93,0%	71,0%	39,0%
Nó 11	99,0%	99,0%	88,0%	55,0%	20,0%
Nó 12	99,0%	98,0%	94,0%	72,0%	38,0%
Nó 13	99,0%	99,0%	94,0%	73,0%	45,0%
Nó 14	99,0%	99,0%	91,0%	61,0%	27,0%
erro < 1%					

e)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
% de conexões da classe Bronze com tempo de admissão > 100 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	2,0%
Nó 2	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	2,0%
Nó 3	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	6,8%
Nó 4	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	6,2%
Nó 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	1,7%
Nó 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	2,5%
Nó 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%
Nó 8	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	1,6%
Nó 9	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	2,1%
Nó 10	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	2,3%
Nó 11	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	7,1%
Nó 12	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	6,1%
Nó 13	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	1,9%
Nó 14	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	2,0%
erro < 0,1%					

f)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Bronze					
Nó 1	99,0%	98,0%	86,0%	53,0%	21,0%
Nó 2	99,0%	98,0%	86,0%	53,0%	20,0%
Nó 3	99,0%	99,0%	92,0%	69,0%	35,0%
Nó 4	99,0%	99,0%	91,0%	62,0%	29,0%
Nó 5	99,0%	99,0%	93,0%	69,0%	36,0%
Nó 6	99,0%	98,0%	87,0%	56,0%	22,0%
Nó 7	99,0%	98,0%	91,0%	58,0%	19,0%
Nó 8	99,0%	98,0%	90,0%	55,0%	17,0%
Nó 9	99,0%	98,0%	90,0%	59,0%	25,0%
Nó 10	99,0%	99,0%	93,0%	71,0%	39,0%
Nó 11	99,0%	99,0%	88,0%	55,0%	20,0%
Nó 12	99,0%	99,0%	94,0%	72,0%	38,0%
Nó 13	99,0%	99,0%	93,0%	74,0%	45,0%
Nó 14	99,0%	98,0%	91,0%	62,0%	26,0%
erro < 0,9%					

Figura 3: Tempo de admissão e capacidade de sobrevivência das conexões feitas por usuários das classes Ouro, Prata e Bronze ligados aos nós de borda da rede. O número de usuários por nó é composto por 10% de usuários da classe Ouro, 30% de usuários da classe Prata e 60% de usuários da classe Bronze.

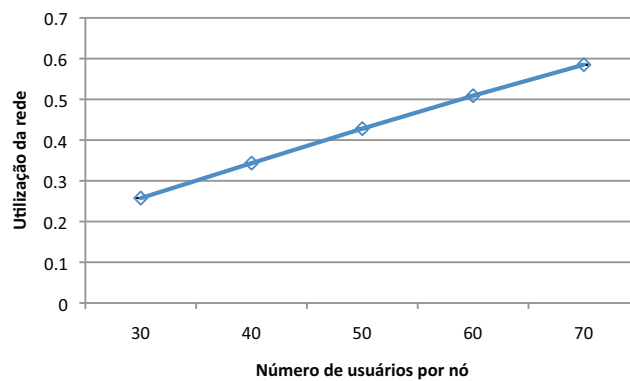


Figura 4: Utilização média da rede.

Sob a ponderação de 10% Ouro, 30% Prata e 60% Bronze, a rede é capaz de atender o número ideal máximo comum de 50 usuários por nó acarretando uma utilização de aproximadamente 43% dos recursos da rede. A capacidade residual da rede pode ser utilizada para atender usuários sem respeitar a ponderação do número de usuários por nó das classe Ouro, Prata e Bronze ou para atender uma quarta classe de serviço com tráfego de menor prioridade.

Note que a rede pode ainda ter a capacidade de atender outros usuários (além dos 50 usuários por nó) sem seguir a ponderação de 10%, 30% e 60% usuários das classes Ouro, Prata e Bronze. Estudos complementares com o emprego dessa metodologia podem ser conduzidos para conhecer a capacidade da rede em atender novos usuários, além dos 50 usuários por nó. Acrescida à demanda de 50 usuários por nó, pode ser investigada a capacidade da rede em atender outros novos usuários da classe Prata, por exemplo. Para isso deve ser feito um estudo de simulação para obter as métricas de QoS sob a demanda de 50 usuários + 1 usuário da classe Prata por nó. Em seguida 50 usuários + 2 usuários da classe Prata e assim por diante. O objetivo é saber quantos usuários a mais da classe Prata a rede consegue atender sem desrespeitar os requisitos de QoS das classes de serviço. Essa análise pode ser feita para cada uma das classe de serviço e também para conhecer a capacidade de atender novos usuários em cada nó de borda da rede individualmente.

Considera-se agora que a rede possui capacidade de conversão total (utiliza a arquitetura de conversão *Full Complete Wavelength Conversion (FCWC)*), eliminando totalmente a restrição de continuidade obrigatória de comprimento de onda [11]. Esse estudo avalia o impacto da arquitetura FCWC na capacidade da rede em atender um número maior de usuários em relação ao mesmo cenário sem capacidade de conversão.

A Figura 5 mostra os níveis QoS obtidos pelos usuários quando a rede faz uso da arquitetura de conversão FCWC. Assume-se que a capacidade de conversão de comprimento de onda não modifica os tempos máximos de recuperação. Em termos gerais, a capacidade de conversão aumenta o potencial de recuperação as conexões afetadas por falhas de enlace, mas o tempo para efetuar a recuperação é o mesmo da rede sem capacidade de conversão de comprimento de onda.

A arquitetura FCWC viabiliza o atendimento de 6 usuários da classe Ouro por nó respeitando os limites de QoS contratados. As facilidades da arquitetura FCWC proporcionam o atendimento de mais 1 usuário da classe Ouro em cada nó da rede quando comparada com a rede sem a capacidade de conversão de comprimento de onda. Houve também um impacto positivo na capacidade da rede em atender usuários da classe Prata. Em ter-

a)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
% de conexões da classe Ouro com tempo de admissão > 1 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	0,5%	5,6%	27,0%
Nó 2	0,0%	0,0%	0,5%	5,7%	27,1%
Nó 3	0,0%	0,0%	0,6%	6,1%	29,8%
Nó 4	0,0%	0,0%	0,5%	4,2%	20,6%
Nó 5	0,0%	0,0%	0,4%	4,5%	23,6%
Nó 6	0,0%	0,0%	0,6%	6,1%	29,9%
Nó 7	0,0%	0,0%	0,4%	4,4%	21,3%
Nó 8	0,0%	0,0%	0,5%	4,9%	24,3%
Nó 9	0,0%	0,0%	0,6%	6,3%	29,8%
Nó 10	0,0%	0,0%	0,6%	6,0%	29,8%
Nó 11	0,0%	0,0%	0,6%	6,0%	29,4%
Nó 12	0,0%	0,0%	0,6%	6,0%	29,6%
Nó 13	0,0%	0,0%	0,5%	5,6%	27,0%
Nó 14	0,0%	0,0%	0,5%	4,8%	23,7%
erro < 0,3%					

b)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Ouro					
Nó 1	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 2	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 3	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 4	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%	98,0%
Nó 5	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%	97,0%
Nó 6	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 7	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 8	99,0%	98,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 9	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%	97,0%
Nó 10	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 11	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 12	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%	97,0%
Nó 13	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%	98,0%
Nó 14	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%	97,0%
erro < 0,6%					

c)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
% de conexões da classe Prata com tempo de admissão > 10 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	0,1%	1,2%	7,3%
Nó 2	0,0%	0,0%	0,1%	1,3%	7,3%
Nó 3	0,0%	0,0%	0,1%	1,4%	9,3%
Nó 4	0,0%	0,0%	0,1%	1,6%	10,3%
Nó 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	5,0%
Nó 6	0,0%	0,0%	0,1%	1,2%	7,6%
Nó 7	0,0%	0,0%	0,1%	1,2%	6,7%
Nó 8	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	6,5%
Nó 9	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	6,5%
Nó 10	0,0%	0,0%	0,1%	1,2%	7,5%
Nó 11	0,0%	0,0%	0,1%	1,6%	9,8%
Nó 12	0,0%	0,0%	0,1%	1,5%	9,3%
Nó 13	0,0%	0,0%	0,1%	1,2%	7,6%
Nó 14	0,0%	0,0%	0,1%	1,1%	6,7%
erro < 1%					

d)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Prata					
Nó 1	99,0%	99,0%	95,0%	77,0%	48,0%
Nó 2	99,0%	99,0%	95,0%	80,0%	52,0%
Nó 3	99,0%	99,0%	97,0%	88,0%	66,0%
Nó 4	99,0%	99,0%	97,0%	88,0%	65,0%
Nó 5	98,0%	99,0%	96,0%	85,0%	60,0%
Nó 6	99,0%	99,0%	95,0%	79,0%	50,0%
Nó 7	99,0%	99,0%	97,0%	86,0%	58,0%
Nó 8	99,0%	98,0%	96,0%	83,0%	54,0%
Nó 9	99,0%	99,0%	96,0%	84,0%	59,0%
Nó 10	99,0%	99,0%	97,0%	89,0%	71,0%
Nó 11	99,0%	99,0%	96,0%	82,0%	55,0%
Nó 12	99,0%	99,0%	98,0%	90,0%	70,0%
Nó 13	99,0%	99,0%	97,0%	89,0%	69,0%
Nó 14	99,0%	99,0%	97,0%	89,0%	69,0%
erro < 1%					

e)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
% de conexões da classe Bronze com tempo de admissão > 100 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%
Nó 2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%
Nó 3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%
Nó 4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%
Nó 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%
Nó 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%
Nó 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%
Nó 8	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%
Nó 9	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%
Nó 10	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%
Nó 11	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%
Nó 12	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%
Nó 13	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%
Nó 14	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%
erro < 0,04%					

f)	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Bronze					
Nó 1	99,0%	99,0%	95,0%	78,0%	49,0%
Nó 2	99,0%	99,0%	95,0%	80,0%	52,0%
Nó 3	99,0%	99,0%	97,0%	87,0%	66,0%
Nó 4	99,0%	99,0%	97,0%	88,0%	65,0%
Nó 5	99,0%	99,0%	96,0%	85,0%	60,0%
Nó 6	99,0%	99,0%	95,0%	78,0%	50,0%
Nó 7	99,0%	99,0%	97,0%	86,0%	57,0%
Nó 8	99,0%	99,0%	96,0%	83,0%	54,0%
Nó 9	99,0%	99,0%	96,0%	84,0%	59,0%
Nó 10	99,0%	99,0%	97,0%	90,0%	71,0%
Nó 11	99,0%	99,0%	96,0%	82,0%	55,0%
Nó 12	99,0%	99,0%	98,0%	90,0%	70,0%
Nó 13	99,0%	99,0%	97,0%	89,0%	69,0%
Nó 14	99,0%	99,0%	97,0%	89,0%	68,0%
erro < 0,8%					

Figura 5: Tempo de admissão e capacidade de sobrevivência das conexões feitas por usuários da classe Ouro, Prata e Bronze ligados aos nós de borda da rede. Arquitetura FCWC. O número de usuários por nó é composto por 10% de usuários da classe Ouro, 30% de usuários da classe Prata e 60% de usuários da classe Bronze.

mos de tempo de admissão apenas o Nó 4 não tem capacidade de atender 21 usuários da classe Prata (30% de 70 usuários por nó). Observa-se ainda uma melhora na capacidade de sobrevivência dos usuários ligados aos nós 3, 4, 5, 7, 10, 12, 13 e 14, podendo atender pelo menos 18 usuários cada um.

Para a classe Bronze a rede apresentou uma capacidade de atender 36 usuários por nó. Destaca-se que sob a carga relativa a 60 usuários por nó (sendo 36 da classe Bronze), os níveis de QoS para os usuários da classe Bronze ficaram bem acima dos limites inferiores definidos. Por exemplo, não houveram restrições de QoS em termos de tempo de admissão para uma carga total de até 70 usuários por nó (sendo 42 da classe Bronze). Sob a carga de 60 usuários por nó (sendo 36 da classe Bronze) os usuários ligados aos nós 1 e 6 apresentaram os piores desempenhos com capacidade de sobrevivência igual a 78% enquanto o mínimo desejável é 70%. Isso sinaliza que os usuários da classe Bronze possuem mais recursos do que eles realmente precisam.

De fato, respeitando a ponderação no número de usuários da cada classe de serviço, a rede é capaz de atender apenas 50 usuários por nó. O mesmo número máximo ideal comum obtido com a rede sem capacidade de conversão de comprimento de onda.

Para reverter esse cenário pode-se dar privilégios aos usuários da classe Prata em relação aos usuários da classe da classe Bronze. Essa é a política de alocação de recursos proposta na estratégia *Fair-Fit* [9]. Para isso utilizou-se o conceito de *waveband* também presente na estratégia *Fair-Fit*. Após alguns experimentos variando o número de comprimentos de onda do *waveband* da classe Bronze, definiu-se que os seus usuários somente podem utilizar os comprimentos de onda da posição 1 até a posição 35. Apenas as conexões $C(1, 6)$ da classe Bronze acessam do comprimento de onda 1 até o 36. Essa política acaba por privilegiar o atendimento dos usuários da classe Prata. Vale destacar que essa classificação não pode privilegiar os usuários da classe Prata de forma a penalizar os requisitos de QoS dos usuários da classe Bronze. Por exemplo, ao limitar o acesso das conexões $C(1, 6)$ da classe Bronze do comprimento de onda 1 até o 35 a capacidade de sobrevivência dos usuários ligados ao Nó 1 fica abaixo de 70%. Por isso, permite-se que essas conexões acessem também o comprimento de onda 36. A Figura 6 mostra a separação dos comprimentos de onda em *wavebands* e quais classes de serviço podem acessá-los.

<i>Waveband</i> 1: de w_1 até w_{35}	Disponível para conexões das classes Ouro, Prata e Bronze.
<i>Waveband</i> 2: w_{36}	Disponível para conexões das classes Ouro e Prata e para conexões $C(1,6)$ da classe Bronze.
<i>Waveband</i> 3: de w_{37} até w_{40}	Disponível para conexões das classes Ouro, Prata.

Figura 6: Divisão de *wavebands* para privilegiar o acesso as conexões da classe Prata.

O QoS em termos de tempo de admissão e capacidade de sobrevivência com aplicação dessa política de acesso aos comprimentos de onda da rede são mostrados na Figura 7

Observa-se que utilizando a classificação através de *wavebands* de forma a privilegiar os usuários da classe Prata a rede passa a ser capaz de atender 60 usuários por nó.

	Número de usuários por nó				
	30	40	50	60	70
a) % de conexões da classe Ouro com tempo de admissão > 1 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	0,3%	4,6%	24,2%
Nó 2	0,0%	0,0%	0,3%	4,6%	24,2%
Nó 3	0,0%	0,0%	0,4%	4,9%	26,3%
Nó 4	0,0%	0,0%	0,3%	3,4%	18,4%
Nó 5	0,0%	0,0%	0,3%	3,7%	21,0%
Nó 6	0,0%	0,0%	0,4%	4,9%	26,6%
Nó 7	0,0%	0,0%	0,3%	3,6%	18,9%
Nó 8	0,0%	0,0%	0,3%	3,9%	21,5%
Nó 9	0,0%	0,0%	0,4%	4,9%	26,6%
Nó 10	0,0%	0,0%	0,4%	4,7%	26,3%
Nó 11	0,0%	0,0%	0,3%	4,8%	26,0%
Nó 12	0,0%	0,0%	0,4%	4,9%	26,1%
Nó 13	0,0%	0,0%	0,3%	4,5%	23,9%
Nó 14	0,0%	0,0%	0,3%	3,8%	21,1%
erro < 0,4%					
b) Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Ouro					
Nó 1	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 2	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 3	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%
Nó 4	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 5	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%
Nó 6	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%
Nó 7	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 8	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 9	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
Nó 10	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%
Nó 11	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%
Nó 12	99,0%	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%
Nó 13	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	98,0%
Nó 14	99,0%	99,0%	99,0%	98,0%	97,0%
erro < 0,7%					
c) % de conexões da classe Prata com tempo de admissão > 10 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	6,3%
Nó 2	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	6,3%
Nó 3	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	7,9%
Nó 4	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	8,9%
Nó 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	4,3%
Nó 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	6,5%
Nó 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	5,8%
Nó 8	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	5,5%
Nó 9	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	5,5%
Nó 10	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	6,5%
Nó 11	0,0%	0,0%	0,1%	1,3%	8,5%
Nó 12	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%	7,8%
Nó 13	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	6,5%
Nó 14	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	5,7%
erro < 0,2%					
d) Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Prata					
Nó 1	99,0%	99,0%	97,0%	86,0%	58,0%
Nó 2	99,0%	99,0%	98,0%	87,0%	61,0%
Nó 3	99,0%	99,0%	98,0%	91,0%	72,0%
Nó 4	99,0%	99,0%	98,0%	92,0%	72,0%
Nó 5	99,0%	99,0%	98,0%	90,0%	68,0%
Nó 6	99,0%	99,0%	97,0%	86,0%	60,0%
Nó 7	99,0%	99,0%	98,0%	90,0%	65,0%
Nó 8	99,0%	99,0%	98,0%	88,0%	61,0%
Nó 9	99,0%	99,0%	98,0%	90,0%	68,0%
Nó 10	99,0%	99,0%	99,0%	93,0%	78,0%
Nó 11	99,0%	99,0%	98,0%	88,0%	64,0%
Nó 12	99,0%	99,0%	98,0%	93,0%	75,0%
Nó 13	99,0%	99,0%	98,0%	93,0%	75,0%
Nó 14	99,0%	99,0%	98,0%	93,0%	75,0%
erro < 1,5%					
e) % de conexões da classe Bronze com tempo de admissão > 100 min					
Nó 1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%
Nó 2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%
Nó 3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%
Nó 4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,4%
Nó 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%
Nó 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%
Nó 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%
Nó 8	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%
Nó 9	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,4%
Nó 10	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%
Nó 11	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,8%
Nó 12	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%
Nó 13	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%
Nó 14	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%
erro < 0,07%					
f) Capacidade de sobrevivência de conexões da classe Bronze					
Nó 1	99,0%	98,0%	91,0%	72,0%	44,0%
Nó 2	99,0%	98,0%	90,0%	73,0%	44,0%
Nó 3	99,0%	98,0%	94,0%	82,0%	60,0%
Nó 4	99,0%	98,0%	94,0%	82,0%	57,0%
Nó 5	99,0%	98,0%	92,0%	77,0%	53,0%
Nó 6	99,0%	98,0%	89,0%	70,0%	42,0%
Nó 7	99,0%	98,0%	93,0%	79,0%	50,0%
Nó 8	99,0%	98,0%	92,0%	75,0%	46,0%
Nó 9	99,0%	98,0%	92,0%	76,0%	51,0%
Nó 10	99,0%	99,0%	95,0%	82,0%	63,0%
Nó 11	99,0%	98,0%	91,0%	74,0%	48,0%
Nó 12	99,0%	99,0%	95,0%	83,0%	62,0%
Nó 13	99,0%	98,0%	94,0%	84,0%	62,0%
Nó 14	99,0%	98,0%	94,0%	82,0%	61,0%
erro < 1%					

Figura 7: Tempo de admissão e capacidade de sobrevivência das conexões feitas por usuários da classe Ouro, Prata e Bronze ligados aos nós de borda da rede. A rede faz uso da Arquitetura FCWC e da classificação de *wavebands* ilustrado em 6. O número de usuários por nó é composto por 10% de usuários da classe Ouro, 30% de usuários da classe Prata e 60% de usuários da classe Bronze.

Vale lembrar que desses 60 usuários 6 são da classe Ouro, 18 são da classe Prata e 36 são da classe Bronze. Nota-se também que de maneira geral, a limitação do acesso para as conexões da classe Bronze proporcionou uma melhora discreta do desempenho dos usuários da classe Ouro. Por exemplo, o percentual de conexões da classe Ouro admitidas em mais de 1 minuto diminuiu para todos os nós da rede.

O uso da arquitetura FCWC na topologia da rede NSFnet demanda um total de 1600 conversores de comprimento de onda (Wavelength Converters - WC). Conforme discutido em [11], esses dispositivos apesar de eliminarem a restrição de continuidade obrigatória de comprimento de onda, possuem um custo elevado. Por isso é interessante o uso da arquitetura com conversão esparsa parcial (Sparse-Partial Wavelength Conversion - SPWC) e de estratégias de posicionamento de WCs nos nós da rede para alcançar um desempenho próximo da conversão total, mas minimizando o número de WCs na rede [11].

A estratégia FLP descrita e proposta em [11] é aplicada para descobrir o número de WCs e o seus posicionamentos visando atender 60 usuários por Nó. Portanto, a carga FL para aplicar a estratégia FLP é a carga relativa a 60 usuários por nó que corresponde à aproximadamente a 315 Erlangs. A Tabela 1 mostra a atividade máxima de conversão nos nós ($P(i)$) da rede NSFnet fazendo uso da arquitetura FCWC.

Tabela 1: Atividade máxima de conversão em cada nó da rede.

Nó i	1	2	3	4	5	6	7
$P(i)$	18	24	24	53	17	46	31
Nó i	8	9	10	11	12	13	14
$P(i)$	10	35	35	26	26	12	18

De fato, a rede precisou de no máximo de 376 WCs para ser capaz de atender 60 usuários por nó. Isso significa que a arquitetura SPWC utilizando o posicionamento de WCs baseado na Tabela 1 terá o mesmo desempenho da arquitetura FCWC. 376 WCs representam apenas aproximadamente 23,4% do total de WC requeridos pela arquitetura FCWC.

Percebe-se portanto, que o uso de *waveband* para customizar o atendimento dos usuários associado ao posicionamento de 376 WCs pela estratégia FLP viabiliza o atendimento de um número maior de usuários. Sem o uso dessas estratégias a rede apresentou capacidade em atender apenas 50 usuários por nó (número ideal máximo comum).

5. Conclusão

Este artigo apresentou uma metodologia composta de uma modelagem e um conjunto de métricas apropriadas para o planejamento de redes de circuitos ópticos dinâmicos com garantia de QoS no nível do usuário.

A metodologia proposta permite a realização de estudos de simulação que auxiliam a escolha das estratégias de otimização de recursos possibilitando um planejamento otimizado da rede. Uma vez definida a infraestrutura de rede, a carga de tráfego gerada por cada usuário da rede e as classes de serviço com os respectivos níveis de QoS, deve ser feito um estudo inicial via simulação a fim de escolher quais as estratégias de sobrevivência e de alocação de recursos que serão aplicadas em cada classe de serviço. Esse estudo também indica se os níveis de QoS exigidos podem ser realmente alcançados

com a infraestrutura de rede especificada. Em seguida, deve-se incrementar o número de usuários por nó e medir, via simulação, os níveis de QoS em termos de tempo de admissão, capacidade de sobrevivência e tempo de recuperação obtidos por cada usuário da rede. O maior número de usuários por nó que garantir os requisitos de QoS para cada usuário da rede é o número máximo ideal de usuários por nó.

Referências

- [1] Gilvan M. Durães, André Soares, José R. Amazonas, and William Giozza. The choice of the best among the shortest routes in transparent optical networks. *Computer Networks*, 54(14):2400 – 2409, 2010.
- [2] Jing and B. Mukherjee. A review of fault management in wdm mesh networks basic concepts and research challenges. *IEEE Network*, pages 41– 48, Mar-Apr 2004.
- [3] Hwa-Chun Lin, Sheng-Wei Wang, and Chung-Peng Tsai. Traffic intensity based fixed-alternate routing in all-optical wdm network. In *ICC 2006*, pages 2439 – 2446, June 2006.
- [4] K. Mosharaf, J. Talim, and I. Lambadaris. Optimal resource allocation and fairness control in all-optical wdm networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(8):1496–1507, Aug. 2005.
- [5] Canhui Ou, Jing Zhang, Hui Zang, L.H. Sahasrabudhe, and B. Mukherjee. New and improved approaches for shared-path protection in wdm mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, pages 1223 – 1232, May 2004.
- [6] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan. *Optical Network - A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann Publishers, 2th edition, 2002.
- [7] André Soares. *Uma Metodologia para Planejamento de Redes de Circuitos Ópticos Transparentes com QOS no Nível do Usuário*. PhD thesis, CIn-UFPE, 2009.
- [8] André Soares, Gilvan Durães, William Giozza, and Paulo Cunha. Tonets: Simulador para avaliação de desempenho de redes Ópticas transparentes. In *SBC - Wperformance 2007*, Julho 2007.
- [9] André Soares, William Giozza, and Paulo Cunha. Classification strategy to mitigate unfairness in all-optical networks. In *15th IEEE International Conference on Networks - ICON2007*, pages 161 – 165, Nov 2007.
- [10] André Soares, William Giozza, and Paulo Cunha. A new approach for performance evaluation of survivability services in all-optical networks. In *14th IEEE International Conference on Telecommunication*, pages 307 – 312, May 2007.
- [11] André Soares, José Maranhão, William Giozza, and Paulo Cunha. First load priority: A wavelength converter placement scheme for optical networks with sparse-partial wavelength conversion. *Revista Brasileira de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 23–35, Jun 2008.
- [12] Andrzej Szymanski, Artur Lason, Jacek Rzasca, and Andrzej Jajszczyk. Grade-of-service-based routing in optical networks. *IEEE Communications Magazine*, pages 82–87, Feb 2007.
- [13] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM network. *SPIE Optical Networks Magazine*, Jan 2000.