

Compartilhamento Parcial de Banda entre Usuários Não-Cooperativos

Marcio S. Savasini, Gustavo S. Quitério e Helio Waldman

Resumo—O artigo discute o compartilhamento da banda de uma rede de comutação de circuitos entre usuários não-cooperativos, cada um dos quais pode ter sua própria função de utilidade e requisitos de qualidade-de-serviço, sendo esta expressa pela sua probabilidade de bloqueio. Os objetivos econômicos determinam um nível desejado de ocupação de circuitos para cada usuário. O trabalho mostra que a gama de objetivos viáveis pode ser estendida mediante o uso de compartilhamento parcial da banda, no qual apenas um usuário prioritário tem permissão para levar a rede ao estado de ocupação total, ficando os demais autorizados a conduzir a rede apenas até um determinado limiar de ocupação que depende da prioridade atribuída a cada usuário.

Palavras-Chave—Comutação de Circuitos, Compartilhamento de Banda, Função de Utilidade, Probabilidade de Bloqueio, Diferenciação de Serviço.

Abstract—The paper discusses the bandwidth sharing among non-cooperative users in a circuit-switched network, each of which may have his own utility function and quality-of-service requirements, expressed by its blocking probability. The economic targets set the desired circuit occupancy by each user. The work shows that the variety of possible targets may be extended using partial bandwidth sharing, in which only one priority user is allowed to occupy the last resource available, leaving the others only the possibility to use resources until a occupancy limit to each user.

Keywords—Circuit Switching, Bandwidth Sharing, Utility Function, Blocking Probability, Service Differentiation.

I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas se apresentam como as maiores candidatas para as futuras redes de comunicação, devido ao aumento extraordinário da capacidade de transmissão por fibras ópticas utilizando a tecnologia WDM. Estas redes deverão servir como uma plataforma de transporte integrada, utilizando um mesmo conjunto de recursos para o provimento simultâneo de diferentes serviços a seus usuários, como o tradicional serviço de voz, orientado a circuitos, assim como serviços de dados orientados a pacotes. Esse convívio de serviços de naturezas diferentes faz com que a rede deva ter políticas de diferenciação de serviços, já que diferentes aplicações podem exigir diferentes níveis de qualidade de serviço (QoS).

As diferenças na qualidade de serviço podem ser relativas à vazão do tráfego, à probabilidade de bloqueio de conexões, perda de pacotes, ou então, a atrasos enfrentados pelo tráfego. Desta forma, é necessária a garantia da integridade do serviço, feita através de uma negociação entre a operadora e o usuário para a definição dos requisitos de qualidade estipulados para

cada conexão, formando assim um contrato (*Service Level Agreement* - SLA). Neste contrato, o usuário deve escolher as especificações necessárias para a utilização satisfatória do serviço, permitindo à operadora alocar seus recursos de forma eficiente. Assim os objetivos de ambos podem ser atingidos [1].

Redes MPLS montam conexões fim a fim (*Label Switching Path* - LSP) através da atribuição de rótulos. Os dados são encaminhados por cada roteador segundo os rótulos que carregam. Assim um LSP pode agregar tráfego de diferentes fontes oferecendo um mesmo nível de QoS, atribuindo a mesma sequência de rótulos para um mesmo caminho. Acrescentando-se as extensões GMPLS pode-se fazer uso destas facilidades em redes ópticas, facilitando o provimento de diferenciação de serviços.

O preço que um usuário está disposto a pagar está intimamente ligado à qualidade do serviço oferecida pelo provedor, além da garantia de cumprimento do contrato firmado [2]. Além do preço, usuários podem se distinguir em outras características como a exigência de diferentes capacidades mínimas, ou ainda, ter limites de capacidade máxima, acima dos quais o usuário não percebe mais ganho marginal de utilidade com o aumento da capacidade adquirida.

Tais aspectos econômicos, como a política de precificação de conexões, estão amarrados com a engenharia de tráfego. Este artigo analisa duas classes de usuários não-cooperativos concorrendo por recursos comuns em três cenários de atendimento de serviços: sem diferenciação de serviços, em que todos os recursos estão disponíveis às duas classes (compartilhamento total de recursos); segregação de recursos para cada uma das classes, em que os recursos são divididos entre as classes; e o compartilhamento parcial de recursos, com reserva de alguns recursos para a classe prioritária e o compartilhamento dos restantes entre as duas classes.

Cada classe de usuário é especificada por uma função de utilidade. Oferecendo-se um preço por unidade de banda comum às duas classes, cada tipo de usuário ocupará uma quantidade de banda que maximizará seu bem-estar. Assim a rede é requisitada para atender uma combinação de capacidades ótimas, pelo ponto de vista dos usuários. Para cada modelo de diferenciação é analisada a viabilidade do atendimento desta combinação de capacidades ótimas, impondo-se restrições à probabilidade de bloqueio para cada classe.

A precificação da banda é feita aplicando-se teoria de jogos em uma ambiente líder-seguidor, no qual o provedor escolhe o preço como líder e os usuários reagem com uma demanda. Os usuários não têm conhecimento da utilização de recursos na rede. Desta maneira as partes envolvidas são não-cooperativas. Um ambiente cooperativo poderia ser estudado

Marcio S. Savasini, Gustavo S. Quitério e Helio Waldman fazem parte do OptiNet - Optical Networking Laboratory/DECOM/FEEC/UNICAMP. Caixa Postal 6101, 13083-852, Campinas, SP, BRASIL. E-mails: {savasini, gustavo, waldman}@decom.fee.unicamp.br.

com a possibilidade de negociação pelas partes ou arbitragem pelo governo [3] [4].

O artigo está dividido em 5 seções. A seção II apresenta a sensibilidade dos usuários com relação ao preço unitário estipulado, determinando o nível desejado de ocupação de circuitos para cada usuário. Os cenários de diferenciação de serviços são detalhados na seção III. Em seguida, na seção IV, são discutidos os resultados obtidos para cada tipo de diferenciação de serviço disponível na rede. E por fim, são apresentadas as conclusões do trabalho na seção V.

II. CONTEXTO ECONÔMICO

Define-se a função utilidade $U(\theta)$ de cada usuário, onde θ é a quantidade de recursos utilizados pelo usuário. Classes mais exigentes de QoS resultam em um consumo maior de recursos para uma mesma intensidade de tráfego. Deste modo, a função $U(\theta)$ deve ser descrita em função da banda requerida para se atender a classe de QoS.

O acesso à Internet apresenta características de serviços elásticos, com ganhos marginais decrescentes com o aumento de banda. A utilidade em se ter uma capacidade maior de transmissão nunca cai, porém ela cresce num ritmo cada vez mais lento. Se o usuário apresentar um limite de capacidade utilizável, a utilidade permanecerá constante com o aumento da banda. Estes serviços têm sua curva de utilidade não-decrescente e côncava, como mostra a Fig. 1.

Para o estudo realizado, foi considerada uma curva de utilidade [5] descrita por:

$$U(\theta) = \begin{cases} m\theta, & 0 \leq \theta \leq \gamma \\ m\gamma \left(1 + \ln\left(\frac{\theta}{\gamma}\right)\right), & \gamma < \theta \leq \pi \\ m\gamma \left(1 + \ln\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)\right), & \pi < \theta, \end{cases} \quad (1)$$

onde θ é a capacidade a ser requisitada pelo usuário, m é o máximo preço por unidade de banda tolerado pelo usuário, γ é a capacidade mínima exigida pelo serviço e π é a capacidade máxima que o usuário consegue usar.

Note que $U(\theta)$ é côncava e não-decrescente. A região abaixo da capacidade mínima exigida pelo usuário é linear. Deste modo, só valores maiores que a banda mínima serão aceitos pelo usuário. Se $\gamma = 0$ e $\pi = \infty$ a função seria estritamente côncava e denotaria um usuário elástico [6]. Esta função utilidade, (1), ilustra um usuário com uma região elástica ($\gamma < \theta \leq \pi$).

Na prática, cada usuário irá tentar maximizar o seu bem-estar (2), demandando θ^* . O bem-estar de um usuário pode ser expresso como a utilidade menos o custo de se adquirir θ recursos.

$$\begin{aligned} \max \quad & [U(\theta) - M\theta] \\ \therefore \quad & \theta^*(M) = (U')^{(-1)}(M), \end{aligned} \quad (2)$$

onde M é o preço unitário praticado na rede.

Se traçarmos $\theta_i^*(M)$ teremos a demanda, Fig. 2, por banda de cada cliente. Observe que na região elástica ($\gamma < \theta \leq \pi$) a solução da equação $U'(\theta) = M$ resulta em $M\theta = m\gamma =$ constante, indicando que o usuário maximiza o seu bem-estar

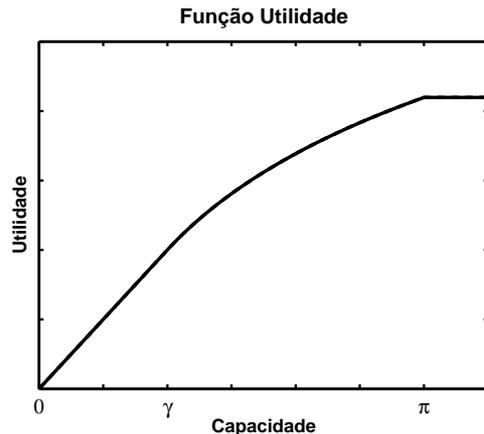


Fig. 1. Função Utilidade Elástica

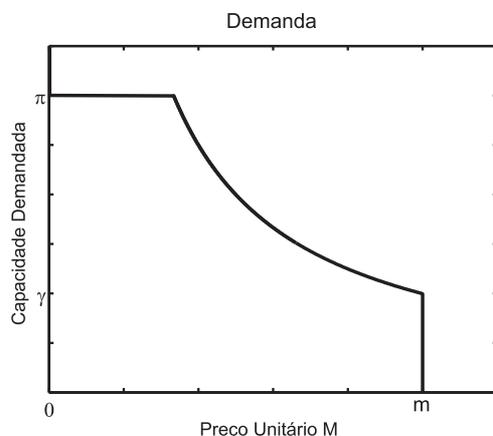


Fig. 2. Demanda Elástica

pagando um preço total $M\theta$ fixo, independente da quantidade consumida, θ , dentro do intervalo aceitável. Esse valor zera quando o preço unitário M supera o valor máximo m , e satura em π quando o preço unitário cai abaixo de $\left(\frac{m\gamma}{\pi}\right)$.

Desta maneira, cada classe de usuários demandará uma quantidade θ_i^* para a ativação dos serviços. A operadora conseguirá atender o conjunto de capacidades ótimas desde que a soma delas não ultrapasse a capacidade oferecida.

III. DIFERENCIAÇÃO DE SERVIÇOS

Consideremos um conjunto de K circuitos entre um nó de origem e um nó destino: no contexto óptico, por exemplo, poderia ser um enlace WDM com K comprimentos de onda. Os circuitos podem ser requisitados por um conjunto pequeno de N usuários que não cooperam entre si, na medida em que cada usuário só tem conhecimento de quantos circuitos está usando, sem saber quantos circuitos estão sendo usados pelos demais usuários, nem mesmo no total. Os usuários tampouco “competem” entre si, no sentido de tentar maximizar a sua participação no uso da capacidade total: com base em algum cálculo de natureza econômica (por exemplo a maximização do seu bem-estar individual), o usuário i apenas determina uma quantidade θ_i de circuitos que ele deseja deter na média. Para isso, ele elevará a sua taxa de requisições gradualmente a

partir do zero até que essa capacidade média lhe seja atribuída com uma probabilidade de bloqueio aceitável, estabelecida em contrato. A cada preço praticado para a utilização de recursos, um conjunto diferente de capacidades poderá ser pedida por cada classe de usuários.

Esse contexto de compartilhamento de banda por usuários não-cooperativos tem sido estudado extensivamente [5] [7]. As hipóteses mais comuns são as seguintes: todos os usuários apresentam requisições com regime Poissoniano de chegada; as chamadas apresentam duração exponencialmente distribuída; e o compartilhamento é total sobre os K circuitos disponíveis, o que impede a diferenciação de serviço. Mesmo assim, o compartilhamento total pode resultar em desigualdades por causa das assimetrias entre os usuários e suas funções de utilidade. De um modo geral, um ponto unívoco de equilíbrio é alcançado sempre que a soma das demandas for inferior à capacidade total (3). À medida que essa soma se aproximar da capacidade da rede, porém, um ou mais usuários poderá ter violadas suas garantias de QoS.

$$\sum_{n=1}^N \theta_n \leq K \quad (3)$$

Neste trabalho, pretendemos estender o âmbito destas análises através do relaxamento da hipótese de compartilhamento total acima mencionada. Ao invés de tratar igualmente usuários desiguais, a rede estabelece uma diferenciação entre eles, com os seguintes atributos:

- 1) cada usuário ou classe de usuários poderá contratar com a rede uma máxima probabilidade de bloqueio aceitável diferente das demais;
- 2) o compartilhamento da banda não precisará ser total, mas poderá ser parcial.

Neste caso, apenas um usuário prioritário terá direito a ocupar o único circuito livre quando $K - 1$ circuitos estiverem ocupados. A cada um dos demais usuários a rede atribuirá um limiar $T_i < K$ de maneira que uma requisição do usuário i será bloqueada quando T_i circuitos já estiverem ocupados.

A diferenciação de serviço estabelece o pressuposto necessário para uma diferenciação de preços, que poderá alterar o cálculo econômico dos usuários, levando-os a modificar a quantidade θ_i de circuitos desejados, gerando assim um novo ponto de equilíbrio econômico e operacional. Neste trabalho, porém, não estamos ainda preocupados em estudar o comportamento deste equilíbrio global. Nossa preocupação é tão somente investigar como o compartilhamento parcial pode contribuir para ampliar a gama de vetores $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ que podem ser suportados pela rede em condições de equilíbrio operacional sem violação dos contratos de garantia de probabilidade de bloqueio máxima de cada usuário.

A. Compartilhamento Total de Recursos

Sem a diferenciação de classes, todas as classes disputam os mesmos recursos. A probabilidade de haver um bloqueio é dada pela fórmula de Erlang-B (4), onde $\nu = \frac{\lambda}{\mu}$ é a soma das intensidades de tráfego das classes. A chance de haver um bloqueio é igual para todas as classes:

$$P_b(\nu) = \frac{\nu^K}{\frac{K!}{\sum_{i=0}^K \frac{\nu^i}{i!}}} \quad (4)$$

O número de circuitos ocupados por um tráfego ν é dado por:

$$\theta_n(\nu) = \nu_n(1 - P_{b_n}(\nu)) \quad (5)$$

O tráfego de cada classe será proporcional à sua demanda por recursos frente à capacidade total disponibilizada. Aquela classe que requerer mais capacidade para maximizar seu bem-estar para um dado preço poderá oferecer mais tráfego aos recursos (5). Isto acontece com classes de usuários m -assimétricos e γ -assimétricos, devido às diferenças de sensibilidade ao preço nas suas curvas de demanda. Os usuários π -assimétricos só diferem na região onde a capacidade desejada é π_i . Nas outras regiões as utilidades são idênticas [5].

Sem diferenciação de serviços, a restrição na probabilidade de bloqueio imposta ao tráfego deve ser a menor daquelas acordadas com os usuários. Deste modo garante-se o cumprimento de todos os contratos. Entretanto, aqueles usuários menos exigentes em termos de bloqueio receberão de graça uma qualidade de serviço melhor. Portanto, mostra-se interessante a diferenciação na utilização dos recursos disponíveis, dando prioridade àqueles que desejarem níveis de QoS melhores.

B. Segregação de Recursos

Uma maneira de se diferenciar o atendimento de requisições é segregar os recursos para cada classe [8] [9]. Esta política de diferenciação pode melhorar o atendimento do tráfego de uma classe de maior prioridade. Para isto é necessária a separação lógica dos recursos para o atendimento de conexões que exigem níveis de QoS diferentes. Quanto maior a exigência de QoS, mais recursos deverão ser reservados somente para a classe prioritária.

Desta maneira, cada conjunto de recursos atende somente a uma classe de serviço. O bloqueio que cada serviço irá enfrentar dependerá exclusivamente do tráfego de sua classe e do número de recursos alocados para esta classe. A probabilidade de bloqueio segue a fórmula de Erlang-B para cada classe-conjunto de recursos. Com mais recursos alocados, menor será a probabilidade de bloqueio para uma mesma intensidade de tráfego.

A melhoria na probabilidade de bloqueio da classe prioritária acontece, porém, em detrimento da probabilidade de bloqueio das outras classes. Recursos exclusivos à classe prioritária podem ficar ociosos em certos instantes, enquanto poderiam ser usados para atender tráfegos de menor prioridade e possivelmente de maior intensidade. No caso de um agrupamento estático de recursos [10] é necessário um dimensionamento perfeito das capacidades alocadas para cada classe no intuito de se minimizar este efeito negativo. Neste cenário um grupo fixo de recursos fica dedicado a cada classe de tráfego.

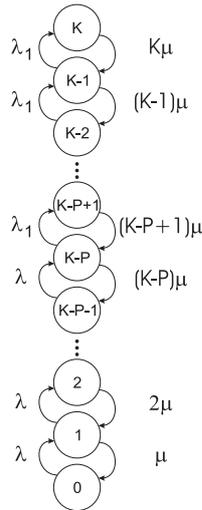


Fig. 3. Cadeia de Markov

C. Compartilhamento Parcial de Recursos

A fim de ilustrar os possíveis ganhos operacionais de atendimento sob compartilhamento parcial, consideremos um caso simples, com apenas dois usuários, sendo o usuário 1 prioritário e o usuário 2 não-prioritário. Assim, as requisições do usuário 1 só serão bloqueadas quando todos os K circuitos estiverem ocupados, e as do usuário 2 quando pelo menos $T_2 = K - P$ estiverem ocupados, onde P é um inteiro positivo menor que K . Neste cenário um número fixo de recursos fica reservado à classe prioritária, mas não necessariamente um grupo fixo de recursos. Este agrupamento dinâmico de recursos consegue melhorar o atendimento da classe prioritária, com um menor impacto sobre a classe não prioritária em relação à segregação de recursos.

Sejam λ_1 e λ_2 as taxas de requisição dos usuários 1 e 2 no equilíbrio (se viável), respectivamente; e sejam μ_1 e μ_2 nas respectivas taxas de desligamento. Sejam ainda $k_1(t)$ e $k_2(t)$ as quantidades de circuitos em poder dos usuários 1 e 2 no instante t , respectivamente; e seja $k(t) = k_1(t) + k_2(t)$ o número de circuitos ocupados no instante t . No equilíbrio, se houver, teremos pelo Teorema de Little:

$$\theta_1 = E[k_1(t)] = \frac{\lambda_1}{\mu_1}(1 - P_{b_1}) \quad (6)$$

$$\theta_2 = E[k_2(t)] = \frac{\lambda_2}{\mu_2}(1 - P_{b_2}), \quad (7)$$

onde P_{b_1} e P_{b_2} são as probabilidades de bloqueio das requisições dos usuários 1 e 2, respectivamente.

Inicialmente suporemos $\mu_1 = \mu_2 = \mu$. Essa hipótese simplifica extraordinariamente os cálculos de P_{b_1} e P_{b_2} , na medida em que ela faz com que o processo $k(t)$ tenha o comportamento de uma cadeia de Markov de tempo contínuo com a propriedade da reversibilidade [11]. A cadeia está mostrada na Fig. 3, onde $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, e sua reversibilidade pode ser estabelecida pelas seguintes propriedades [12]:

- 1) sendo q_{ij} a taxa de transição do estado i para o estado j , q_{ji} é positivo sempre que q_{ij} também é; e

- 2) a remoção de uma aresta bidirecional ij em que q_{ij} e q_{ji} são positivos divide a cadeia em duas cadeias separadas, caracterizando que o grafo formado por estas arestas é uma árvore.

A reversibilidade permite que as probabilidades estacionárias π_i dos estados da cadeia sejam obtidas das chamadas equações de equilíbrio local, dadas por:

$$\pi_i q_{ij} = \pi_j q_{ji} \quad (8)$$

Aplicando esta equação à cadeia mostrada na Fig. 3, temos:

$$\pi_i = \frac{\lambda}{i\mu} \pi_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, K - P \quad (9)$$

$$\pi_i = \frac{\lambda_1}{i\mu} \pi_{i-1}, \quad i = K - P + 1, \dots, K$$

Usando essas equações de recorrência para colocar todas as probabilidades estacionárias em função de π_0 , temos, sendo $\nu = \frac{\lambda}{\mu}$ e $\nu_1 = \frac{\lambda_1}{\mu}$:

$$\pi_i = \pi_0 \frac{\nu^i}{i!}, \quad i = 1, 2, \dots, K - P \quad (10)$$

$$\pi_i = \pi_0 \frac{\nu^{(K-P)} \nu_1^{(i-K+P)}}{i!}, \quad i = K - P + 1, \dots, K$$

Finalmente, lembrando que $\sum_{i=0}^K \pi_i = 1$ e resolvendo para π_0 , temos para $i = 1, 2, \dots, K$:

$$\pi_i = \frac{\nu^{\min(i, K-P)} \nu_1^{\max(0, i-K+P)}}{\left[\sum_{j=0}^{K-P} \frac{\nu^j}{j!} + \left(\frac{\nu}{\nu_1}\right)^{(K-P)} \sum_{j=K-P+1}^K \frac{\nu_1^j}{j!} \right] i!} \quad (11)$$

A partir dessas equações podemos expressar as probabilidades de bloqueio das duas classes de forma fechada:

$$P_{b_1} = \pi_K = \frac{\nu^{(K-P)} \nu_1^P}{\left[\sum_{j=0}^{K-P} \frac{\nu^j}{j!} + \left(\frac{\nu}{\nu_1}\right)^{(K-P)} \sum_{j=K-P+1}^K \frac{\nu_1^j}{j!} \right] K!} \quad (12)$$

$$P_{b_2} = \sum_{i=K-P}^K \pi_i = \frac{\nu^{(K-P)} \sum_{i=K-P}^K \frac{\nu_i^{(i-K+P)}}{i!}}{\sum_{j=0}^{K-P} \frac{\nu^j}{j!} + \left(\frac{\nu}{\nu_1}\right)^{(K-P)} \sum_{j=K-P+1}^K \frac{\nu_1^j}{j!}} \quad (13)$$

Inserindo-se essas expressões em (6) e (7), temos duas equações em ν_1 e $\nu_2 = \frac{\lambda_2}{\mu}$ que nos permitem determinar as taxas de requisição λ_1 e λ_2 que os usuários precisam gerar para alcançar o atendimento de suas demandas θ_1 e θ_2 , e verificar se P_{b_1} e P_{b_2} estão dentro das condições contratuais no equilíbrio. Assim sendo, podemos determinar a região de viabilidade contratual da demanda (θ_1, θ_2) .

IV. RESULTADOS

A fim de verificar, avaliar e comparar diferentes configurações da rede no que diz respeito à capacidade de acomodar diversas combinações de demanda, foi considerado o caso de um enlace com $K = 16$ canais sendo acessados por dois usuários não-cooperativos. O usuário 1 teve prioridade nas configurações de compartilhamento parcial. As probabilidades máximas de bloqueio garantidas por contrato em condições de equilíbrio foram fixadas em 1% e 10%, respectivamente para os usuários 1 e 2.

Em cada configuração de atendimento às demandas a seguir, a região de viabilidade de equilíbrio satisfatório (em conformidade com as condições contratuais) foi obtida sobre o plano (θ_1, θ_2) :

- 1) Compartilhamento total, com probabilidade de bloqueio limitada a 1% para ambos os usuários, já que não é possível discriminá-los nesta configuração;
- 2) Segregação dos usuários em duas redes separadas, uma com K_1 canais e outra com $(K - K_1)$ canais, para $K_1 = 1, 2, \dots, K - 1$;
- 3) Compartilhamento parcial, com limiar de compartilhamento $K - P = 1, 2, \dots, K - 1$.

Cada uma das $2K - 1$ configurações acima gerou uma região de demandas (θ_1, θ_2) viáveis. As curvas apresentadas na Fig. 4 limitam a região de atendimento possível para cada configuração de atendimento. Sem a diferenciação de recursos, a rede consegue atender uma intensidade de tráfego total máxima ν_{max} , sob a restrição de bloqueio (4). A soma das capacidades requeridas $(\theta_1 + \theta_2)$ pelos usuários fica limitada por θ_{max} (5). Os pontos de cruzamento desta curva com os eixos mostram o atendimento da rede a somente uma das classes.

Utilizando-se uma política de segregação de recursos para se fazer a diferenciação de serviços, há ganho de atendimento com valores de $K_1 = 1, 2, 3, 4$ e 5 . Para valores maiores de K_1 , os recursos disponíveis para o atendimento do usuário não-prioritário são insuficientes para atender os mesmos valores de capacidades requeridas quando comparados ao desempenho do compartilhamento total.

Já com o uso do compartilhamento parcial, a região de atendimento foi obtida pelo atendimento máximo que a rede consegue suportar em qualquer uma das $K - 1$ possibilidades para o valor de P . As regiões de $3 \leq P \leq 15$ estão contidas nas regiões de $P \leq 2$, sendo, então, a fronteira superior formada por trechos das curvas de $P = 1$ e 2 . Fixando-se a capacidade de qualquer usuário, a rede tem condições de oferecer mais recursos para os outros usuários, ainda atendendo os contratos, levando a uma maior utilização dos recursos e gerando maior receita.

O compartilhamento parcial só não se apresenta como melhor alternativa se segregarmos a rede com $K_1 = 1$ canal para o atendimento do tráfego prioritário. Neste caso, entretanto, a capacidade θ_1 é muito pequena, atendendo um tráfego prioritário muito baixo e o ganho não é expressivo.

V. CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que existem ganhos significativos com a utilização do compartilhamento parcial como política de

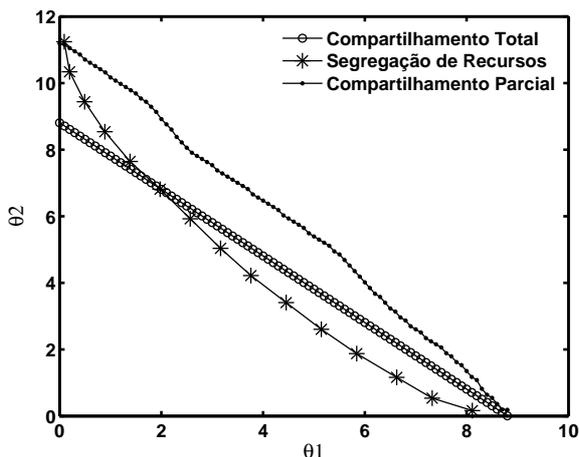


Fig. 4. Regiões de viabilidade de capacidades

diferenciação de serviços, reservando-se um número adequado P de canais para uso exclusivo do usuário prioritário. A segregação de recursos entre as classes de usuários pode ser uma alternativa para um tráfego prioritário pequeno e uma separação com $K_1 = 1$. Porém, este é um caso muito particular.

É interessante a extensão da análise do item III-C deste trabalho para o caso de $\mu_1 \neq \mu_2$. Neste caso, não parece possível aplicar a propriedade da reversibilidade a uma cadeia de Markov da qual se possa extrair as probabilidades de bloqueio. Assim sendo, a formulação analítica ficará mais complexa, exigindo a solução das equações de equilíbrio global, de custo computacional muito maior que as de equilíbrio local. Além disso, os estados serão caracterizados pelo par (k_1, k_2) (recursos utilizados por cada classe de usuário) e não por K , de maneira que o número de estados passará de $K + 1$ para $(K + 1)(K + 2)/2 - P(P + 1)/2$.

Outro assunto a ser focado é considerar o efeito combinado da diferenciação de serviços e da diferenciação de preços, introduzindo os efeitos desta sobre as demandas diferenciadas dos usuários, levando-se em conta suas funções de utilidade e estratégias de maximização individual de bem-estar. A diferenciação de preços é um modo eficaz de se recuperar custos de instalação, aumentar a competição entre provedores de serviço e reduzir o congestionamento através do controle da intensidade de tráfego [3].

Finalmente, o estudo da utilidade dos recursos através de teoria de jogos pode ser realizada para ambientes cooperativos, sendo o preço estipulado pela negociação entre as partes ou arbitragem do governo, o que pode levar a uma solução mais “justa”.

VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo CPqD (Projeto GIGA/FINEP) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

REFERÊNCIAS

- [1] T. G. Papaioannou, S. Sartzetakis, and G. D. Stamoulis, "Efficient agent-based selection of diffserv SLAs over MPLS networks within the ASP service model," *Journal of Network and Systems Management* **10**, pp. 63–90, Mar. 2002.
- [2] R. Edell and P. Varaiya, "Providing internet access: What we learn from INDEX," *IEEE Network* **13**(5), pp. 18–25, 1999.
- [3] X.-R. Cao, H.-X. Shen, R. Milito, and P. Wirth, "Internet pricing with a game theoretical approach: Concepts and examples," *IEEE/ACM Trans. Networking* **10**, pp. 208–216, Apr. 2002.
- [4] Z. Dziong and L. G. Mason, "Fair-efficient call admission control policies for broadband networks – a game theoretic framework," *IEEE/ACM Trans. Networking* **4**(4), pp. 123–136, 1996.
- [5] B. M. Ninan, G. Kesidis, and M. Devetsikiotis, "A simulation study of non-cooperative pricing strategies for circuit-switched optical networks," *Proc. ACM/IEEE MASCOTS*, 2002.
- [6] S. Shenker, "Fundamental design issues for the future internet," *IEEE J. Select. Areas Commun.* **13**, pp. 1176–1188, 1995.
- [7] B. Ninan and M. Devetsikiotis, "Pricing mediated bandwidth allocation for the next generation internet," *Proc. Globecom 2003*, pp. 3030–3034, 2003.
- [8] X. Q. et al., "Supporting integrated voice and data traffic over EGPRS," *Proc. IEEE Intl. Conf. on Commun. ICC'01* **6**, pp. 1748–1753, 2001.
- [9] N. Andriolli, T. Jakab, L. Valcarenghi, and P. Castoldi, "Separate wavelength pools for multiple-class optical channel provisioning," *Proc. Networks*, pp. 1748–1753, 2004.
- [10] Q. Zhang, V. M. Vokkarane, J. P. Jue, and B. Chen, "Absolute QoS differentiation in optical burst-switched networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.* **22**, pp. 1781–1795, Nov. 2004.
- [11] R. Wolff, *Stochastic Modelling and the Theory of Queues*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- [12] A. Kumar, D. Manjunath, and J. Kuri, *Communication Networking: an Analytical Approach*, Elsevier, 2004.