

Modelagem Analítica para Gerência de Recursos de Rádio em Redes Móveis Celulares Hierárquicas

G. H.S. Carvalho, R.C. M. Rodrigues, S.V.Carvalho, C. R. L. Francês, J.C.W.A.Costa.

Resumo—Neste trabalho é proposto um novo modelo de alocação de recursos para redes móveis celulares hierárquicas que provê QoS para o serviço de dados de forma a não impactar na QoS de voz. A idéia do esquema é rotear as sessões de dados das microcélulas para a macrocélula sempre que a ocupação do buffer e dos recursos de rádio alcançarem um determinado valor. A análise dos resultados mostrará que o esquema proposto melhora consideravelmente a QoS do serviço de dados quando comparado ao esquema prioridade de voz.

Palavras-Chave—Controle de Admissão de Chamadas, Redes Hierárquicas, Análise de desempenho, Cadeia de Markov.

Abstract—A new resource allocation model for hierarchical cellular mobile networks is proposed in the current paper, which does not impact in the voice QoS. The main idea behind its behavior is to route data sessions based on buffer and radio resources occupancies. An analysis of results will show that the proposed scheme outperforms the priority scheme.

Keywords—Call Admission Control, Hierarchical Cellular Mobile Networks Performance Analysis, Markov Chain.

I. INTRODUÇÃO

Redes móveis celulares hierárquicas são uma alternativa atraente para as operadoras de serviço em face à crescente demanda de usuários por serviços de voz e dados [3]. O Controle de Admissão de Chamadas (CAC) nessas redes obedece aos mesmos preceitos seguidos em redes planares [5]. Assim, diferentes políticas de alocação de recursos podem ser usadas em cada nível hierárquico através da combinação de mecanismos como prioridade preemptiva, *thresholds*, reserva de recursos para melhorar a provisão da QoS e a utilização dos recursos de rádio.

A vantagem dessa arquitetura está relacionada à otimização da eficiência espectral (melhor uso dos recursos de rádio) por meio de dois mecanismos: o transbordo e o retorno. Em situações de sobrecarga na rede, uma chamada que solicitou um serviço em uma célula onde não existem recursos de rádio disponíveis pode ser transbordada para células em camadas superiores ou inferiores. Caso não existam recursos nessas células, essa chamada é bloqueada [3][4]. Uma vez que existe uma rota alternativa para o escoamento do tráfego oferecido, a probabilidade de bloqueio nessas redes é bem menor que em uma rede planar [3]. Apresentando recursos disponíveis na camada em que essa chamada originalmente solicitou serviço,

Gláucio Haroldo Silva de Carvalho, Carlos Renato Lisboa Francês, João Crisóstomo Weyl A. Costa, Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, E-mails: ghsc@ufpa.br, rfrances@ufpa.br, jweyl@ufpa.br. Rita de Cássia M. Rodrigues e Solon Venâncio de Carvalho, Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, Brasil, E-mails: rita@lac.inpe.br, solon@lac.inpe.br.

ela pode retornar, liberando os canais de rádio da célula para onde a mesma foi transbordada [3].

Apesar do grande potencial dessa arquitetura poucos trabalhos na literatura apresentam soluções para a integração de voz e dados usando-a. Alguns trabalhos recentes encontrados na literatura apontam para as seguintes direções: Em [1] os autores estudaram a provisão de garantias de QoS para chamadas de *hand off* em redes hierárquicas. A modelagem do tempo de retenção de canal no desempenho do sistema [2]. Em [8] os autores implementaram um forma simples de prover o atendimento de voz e dados. O modelo proposto foi uma generalização do modelo chamado de prioridade de voz apresentado em [5] por permitir o controle de admissão das sessões de dados. Esse modelo aparecerá neste trabalho como um *benchmark*, servindo, portanto, como uma base de comparação.

No trabalho corrente é proposto um modelo para a provisão do atendimento de chamadas de dados de modo a não impactar no serviço de voz. A idéia consiste no roteamento das sessões de dados das microcélulas para a macrocélula. O critério usado para isso se baseia na ocupação do *buffer* e dos recursos de rádio. Assim, se a ocupação do *buffer* for superior a um dado *threshold* e não existirem recursos de rádio disponíveis, o tráfego de dados é roteado para a macrocélula ao invés de forçar o *handover* da chamadas de voz. Como o tráfego de dados utiliza a capacidade sob demanda da rede, não há impacto na macrocélula tão bem como na QoS do serviço de voz que é preponderante na rede. O desempenho desse esquema de alocação de recursos foi estudado na análise de uma rede móvel celular hierárquica (E)GPRS. Os resultados mostrarão que o esquema proposto melhora consideravelmente a QoS do serviço de dados quando comparado ao [8].

II. MODELAGEM

A. Tráfego de voz

Considera-se que os processos de chegada das novas chamadas de voz e sessões de dados são processos de Poisson mutuamente independentes com médias iguais a $\lambda_{n,c}$ e $\lambda_{n,i}$, respectivamente [6]. Da mesma forma, os processos de chegada de *handovers* de voz e dados são processos de Poisson mutuamente independentes com médias iguais a $\lambda_{h,c}$ e $\lambda_{h,i}$. Assim, os tráfegos oferecidos de voz e dados são também processos de Poisson com médias dadas por:

$$\lambda_c = \lambda_{n,c} + \lambda_{h,c}. \quad (1)$$

$$\lambda_i = \lambda_{n,i} + \lambda_{h,i}. \quad (2)$$

Os tempos de residência e duração de uma chamada nas microcélulas e na macrocélula são distribuídos exponencialmente com parâmetros $1/\mu_{h,c}$, $1/\mu_{d,c}$, $1/\mu_{h,c}^M$ e $1/\mu_{d,c}^M$, respectivamente. Da mesma forma, os tempos de residência e duração de uma sessão de dados nas micros e macrocélula são distribuídos exponencialmente com médias $1/\mu_{h,i}$, $1/\mu_{d,i}$, $1/\mu_{h,i}^M$ e $1/\mu_{d,i}^M$. Assim, o tempo de retenção de canal para o serviço de voz e dados são também variáveis aleatórias distribuídas exponencialmente com médias:

$$1/\mu_c = 1/(\mu_{h,c} + \mu_{d,c}). \quad (3)$$

$$1/\mu_i = 1/(\mu_{h,i} + \mu_{d,i}). \quad (4)$$

$$1/\mu_c^M = 1/(\mu_{h,c}^M + \mu_{d,c}^M). \quad (5)$$

$$1/\mu_i^M = 1/(\mu_{h,i}^M + \mu_{d,i}^M). \quad (6)$$

O modelo de tráfego de Internet usado é definido pelo 3GPP, o qual consiste em uma seqüência de chamadas de pacotes (*packet calls*) e tempos de leitura (*reading times*). Esse modelo de tráfego é detalhadamente descrito em [8].

B. Rede hierárquica

A rede móvel celular hierárquica sob análise possui duas camadas, uma inferior contendo ψ microcélulas, e outra superior correspondente à macrocélula. Essa rede é considerada homogênea. Desse modo, todas as células pertencentes a mesma camada são estatisticamente idênticas. Assim, no estado de equilíbrio, o comportamento geral de uma camada pode ser analisado considerando apenas uma célula [3][7]. Além disso, é considerado um transbordo unidirecional, isto é, somente será atendido o transbordo do tráfego de voz das microcélulas para a macrocélula.

Cada microcélula da rede possui N canais de rádio que são usados para escoar o tráfego de voz e dados. As chamadas de voz chegam ao sistema de acordo com uma distribuição de Poisson com taxa dada pela Eq.(1), e são atendidas imediatamente se existirem recursos de rádio disponíveis na microcélula; caso contrário, transbordam para a macrocélula. É atribuído a esse serviço uma prioridade preemptiva sobre o serviço de dados.

As sessões de dados chegam ao sistema de acordo com um processo de Poisson com média dada pela Eq.(2). Após suas chegadas, têm-se início a geração dos pacotes IP. No *buffer* são armazenados os pacotes IP pertencentes a um documento *Web*. O *buffer* possui uma capacidade de armazenamento igual a B_s . No modelo proposto é adicionado a esse sistema um *threshold* (T_h), que é usado como referencial para o roteamento das sessões de dados.

Esse modelo é similar ao esquema prioridade de voz apresentado em [8], sendo a principal diferença entre eles o roteamento das sessões de dados das microcélulas para a macrocélula. O critério empregado para o roteamento é baseado na ocupação do *buffer* e dos canais de rádio. Assim, quando a ocupação do *buffer* for superior a um dado

threshold e não existirem recursos de rádio disponíveis, um documento *Web* (chamada de pacotes) é roteado da micro para macrocélula, o que, em outras palavras representa o roteamento de uma sessão de dados.

Na Tabela I são mostradas as possíveis transições a partir de cada estado $S = (v, k, m, r)$, juntamente com as condições, as taxas e os eventos. As mudanças na variável v são determinadas pelas chegadas e partidas das chamadas de voz. A chegada de uma sessão de dados incrementa a variável m . Uma sessão pode chegar ao sistema de duas formas: no estado *ON* ou *OFF* com probabilidades $\frac{\beta}{\alpha+\beta}$ e $\frac{\alpha}{\alpha+\beta}$, respectivamente. A partida de uma sessão de dados causa o decremento nas variáveis m e possivelmente r ¹.

A chegada e a partida de um pacote IP provenientes da fragmentação do conteúdo *Web* das sessões de dados, incrementa e decrementa, respectivamente, o valor da variável k . Nesse momento duas situações podem ocorrer: a sessão de dados pode permanecer na microcélula ou ser roteada. O primeiro caso ocorrerá sempre que existam recursos de rádio disponíveis ou a ocupação do *buffer* seja menor ou igual ao *threshold*. Caso essas condições sejam satisfeitas, a sessão será mantida na microcélula na qual foi originada. Caso contrário, esse documento *Web* e juntamente a sessão será roteada para a macrocélula. A variável γ indica quantas sessões concorrentes possuem pacotes IP no *buffer*. A variável η representa o número de sessões que serão roteadas. Como só podem ser roteadas as sessões ativas, ela é o mínimo entre γ e $m - r$. ϕ é o número de pacotes IP retirados do *buffer* pertencentes à essas sessões.

O valor da taxa de chegada do *handover* é calculado através do equilíbrio do fluxo de chegada e saída dos usuários de voz e dados, os quais são dados por [5][6]:

$$\lambda_{h,c} = \mu_{h,c} \sum_{v=1}^N \sum_{k=0}^{B_s} \sum_{m=0}^M \sum_{r=0}^m v \pi_{v,k,m,r} \quad (7)$$

$$\lambda_{h,i} = \mu_{h,i} \sum_{v=0}^N \sum_{k=0}^{B_s} \sum_{m=1}^M \sum_{r=0}^m m \pi_{v,k,m,r} \quad (8)$$

onde $\{\pi_{v,k,m,r}/(v, k, m, r) \in S\}$ são as probabilidades do estado de equilíbrio da cadeia.

Todo o tráfego transbordado de voz das microcélulas será escoado pela macrocélula se existirem recursos. Esse tráfego é dado por:

$$\lambda_{tof} = \psi \lambda_c \sum_{k=0}^{B_s} \sum_{m=0}^M \sum_{r=0}^m \pi_{N,k,m,r}, \quad (9)$$

onde ψ é o número de microcélulas.

A probabilidade de um pacote IP não ser aceito pelo sistema é dado por:

$$P_D = \sum_{v=0}^N \sum_{m=0}^M \sum_{r=0}^m \pi_{v,B_s,m,r}. \quad (10)$$

¹Vide [8] para detalhes da implementação Markoviana do modelo de tráfego Internet

TABELA I
POSSÍVEIS TRANSIÇÕES A PARTIR DO ESTADO $S = (v, k, m, r)$ DA MICROCÉLULA COM O ESQUEMA PROPOSTO.

Estado Sucessor	Condição	Taxa	Evento
$(v+1, k, m, r)$	$v < N$	λ_c	Chegada de uma chamada de voz
$(v-1, k, m, r)$	$v > 0$	$v\mu_c$	Partida de uma chamada de voz
$(v, k, m+1, r)$	$m < M$	$\frac{\beta}{\alpha+\beta} \lambda_i$	Chegada de uma sessão de dados no estado <i>ON</i>
$(v, k, m+1, r+1)$	$m < M$	$\frac{\alpha}{\alpha+\beta} \lambda_i$	Chegada de uma sessão de dados no estado <i>OFF</i>
$(v, k, m-1, r)$	$(m > 0) \wedge (r=0)$	$m\mu_i$	Partida de uma sessão de dados
$(v, k, m-1, r-1)$	$(m > 0) \wedge (r=m)$	$m\mu_i$	
$(v, k, m-1, r-1)$	$(m > 0) \wedge (0 < r < m)$	$\frac{r}{m} m\mu_i$	
$(v, k, m-1, r)$	$(m > 0) \wedge (0 < r < m)$	$\frac{m-r}{m} m\mu_i$	
$(v, k+1, m, r)$	$(v=N) \wedge (m > 0) \wedge (k \leq T_h) \wedge (r < m) \vee$ $(v < N) \wedge (m > 0) \wedge (k < B_s) \wedge (r < m)$	$(m-r)\lambda_{IP}$	Chegada de um Pacote IP sem roteamento
$(v, \phi, m-\eta, r)$	$(v=N) \wedge (m > 0) \wedge (T_h < k < B_s) \wedge (r < m)$ e $\gamma = \lfloor \frac{k-T_h+N_d-1}{N_d} \rfloor$ onde $\lfloor x \rfloor$ é o maior inteiro $\leq x$ e $\phi = \max(k-\eta N_d, 0)$ e $\eta = \min(\gamma, m-r)$	$(m-r)\lambda_{IP}$	Chegada de um Pacote IP com roteamento
$(v, k-1, m, r)$	$(\min(\theta, k) > 0) \wedge (k > 0)$ $\theta = \min(N-v, 7)$	$\min(\theta, k)\mu_s$	Transmissão de um Pacote IP
$(v, k, m, r+1)$	$r < m$	$(m-r)\alpha$	Diminuição da rajada
$(v, k, m, r-1)$	$r > 0$	$r\beta$	Aumento da rajada

A vazão média de pacotes IP na microcélula é dado pela Eq.(11), enquanto que, o tempo médio de espera por serviço de um pacote IP no *buffer* é dado pela Eq.(12):

$$X = \mu_s \sum_{v=0}^N \sum_{k>0}^{B_s} \sum_{m=0}^M \sum_{r=0}^m \min(\min(N-v, 7), k) \pi_{v,k,m,r}. \quad (11)$$

$$W_q = \frac{\sum_{v=0}^N \sum_{k=1}^{B_s} \sum_{m=0}^M \sum_{r=0}^m k \pi_{v,k,m,r}}{X}. \quad (12)$$

Considerando que o tráfego roteado possui um comportamento Poissoniano, a taxa na qual uma sessão de dados é roteada da micro para a macrocélula é dada por:

$$\mu_{rot} = \lambda_{IP} \sum_{k=T_h+1}^{B_s} \sum_{m=1}^M \sum_{r=0}^m \eta(m-r) \pi_{N,k,m,r} \quad (13)$$

assim, o tráfego oferecido roteado de sessões é dado por $O_{rot} = \psi \mu_{rot}$.

No esquema proposto, a macrocélula agrega as classes de serviço que são oriundas das microcélulas. Assim, através dela é escoado o tráfego de transbordo de voz e o tráfego roteado de dados. Novamente, os recursos de rádio são completamente compartilhados. O serviço de voz possui prioridade preemptiva. Uma fila $M/M/N^M/N^M$ pode ser usada para representar o seu comportamento, onde N^M é o número de canais da macrocélula. Um *buffer* de capacidade B_s^M é usado para armazenar os pacotes IP pertencentes aos documentos *Web* que são roteados das microcélulas.

Essa cadeia é similar a apresentada na Tabela I. As diferenças entre elas são destacadas na Tabela abaixo, e estão

relacionadas ao tráfego transbordado de voz (λ_{tof}) e roteado de sessões (O_{rot}).

A probabilidade de uma chamada de voz ser transbordada da microcélula e não ser escoada pela macrocélula é dada pela Eq.(14), onde P_{bv}^M , é dada pela fórmula de Erlang-B, e é a probabilidade de uma chamada de voz ser bloqueada na macrocélula.

$$P_B = P_{bv}^M \sum_{k=0}^{B_s} \sum_{m=0}^M \sum_{r=0}^m \pi_{N,k,m,r}. \quad (14)$$

A probabilidade de um pacote IP não ser aceito pelo sistema devido ao transbordo do *buffer* da macrocélula, a vazão média dos pacotes IP na macrocélula e o tempo médio de espera por serviço de um pacotes IP no *buffer* são dados por Eq.(10), Eq.(11) e Eq.(12), respectivamente.

III. RESULTADOS

Na Tabela III são fornecidos os valores usados na obtenção dos resultados que serão apresentados a seguir. Se não for especificada qualquer mudança, eles serão tomados como base em todos os experimentos. Uma portadora de rádio é, novamente, considerada na análise [5]. Uma vez que, o serviço conversacional é proeminente na rede, considera-se que a proporção entre os tráfegos de voz e dados é de 90% e 10%, respectivamente. Além disso, considera-se que, na média, uma chamada de voz faça dois *handovers* entre microcélulas, isto é, $1/\mu_{d,c} = 2/\mu_{h,c}$ [6]. Os tempos médios na macrocélula são considerados oito vezes maior que os da microcélula para ambos serviços [5]. O tempo médio de leitura é reduzido de 412s para 41,2s como em [5] para se obter um tráfego

TABELA II
POSSÍVEIS TRANSIÇÕES A PARTIR DO ESTADO $S^M = (v, k, m, r)$ DA MACROCÉLULA.

Estado Sucessor	Condição	Taxa	Evento
$(v+1, k, m, r)$	$v < N^M$	λ_{tof}	Chegada de uma chamada de voz
$(v, k, m+1, r)$	$m < M^M$	$\frac{\beta}{\alpha+\beta} O_{rot}$	Chegada de uma sessão GPRS roteada no estado ON
$(v, k, m+1, r+1)$	$m < M^M$	$\frac{\alpha}{\alpha+\beta} O_{rot}$	Chegada de uma sessão GPRS roteada no estado OFF

mais intenso. A capacidade de armazenamento do *buffer* foi diminuída, neste trabalho, em relação a [5] e [6]. Isso foi feito, pois, em [5] foi mostrado que para esse modelo de tráfego a ocupação média do *buffer* é de 10%. O número de microcélulas por camada também foi escolhido de acordo com [5]. O tempo médio de serviço do pacote IP é dado como aquele no qual um pacote IP é escoado por um canal usando um dado esquema de codificação. Assim, ele é dado por:

$$t_s = \frac{1}{\mu_s} = \frac{480 \cdot 8}{1024} \frac{(kbits)}{th_{CS}(kbits/s)} \quad (15)$$

onde, th_{CS} é o *throughput* do esquema de codificação de canal usado.

TABELA III
VALORES USADOS PARA A OBTENÇÃO DOS RESULTADOS.

Parâmetro	Valor
$N = N^M$	7
$M = M^M$	10
$B_s = B_s^M$	50
T_h	25, 35, 40
ψ	19
$1/\mu_{d,c}$	120
$1/\mu_{h,c}$	60
$1/\mu_{h,i}$	120
$1/\mu_{d,c}^M$	120
$1/\mu_{h,c}^M$	$8/\mu_{d,c}$
$1/\mu_{h,i}^M$	$8/\mu_{d,i}$
D_{pc}	41, 2
th_{CS}	13, 4

A. Desempenho do serviço de voz

É importante que a introdução do serviço de dados não altere o desempenho do serviço de voz, pois, sendo a aplicação preponderante na rede, ele é a fonte mais rentável das operadoras. Assim, desde que não haja reserva de recursos para o escoamento do tráfego de dados e seja mantida a prioridade preemptiva dos serviços de voz, o desempenho desse serviço não é afetado pelo serviço de dados.

Na Fig.(1) são mostradas as probabilidades de bloqueio de voz na microcélula e a probabilidade de bloqueio total dada pela Eq.(14). Na Fig.(1.a) observa-se que o bloqueio se mantém dentro dos valores normalmente usados de 1% e 2%. Como já esperado, constata-se na Fig.(1.b) que a utilização de uma estrutura hierárquica é uma ótima alternativa para o escoamento do tráfego de voz que seria bloqueado em uma célula congestionada da rede.

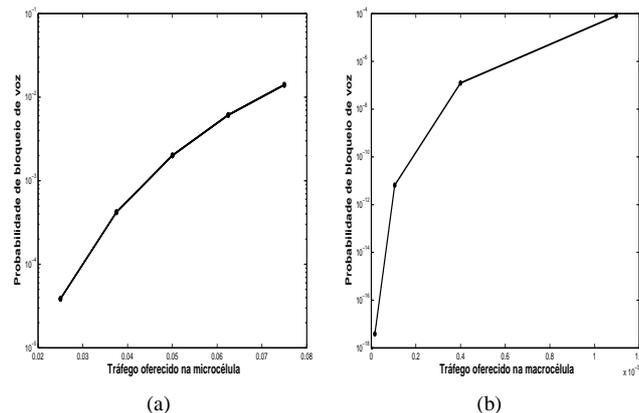


Fig. 1. Probabilidade de bloqueio de voz (a)Microcélula; (b) Total

B. Efeito do threshold

Nesta seção é analisado o efeito do *threshold* no desempenho do sistema. O seu valor tem um papel importante no esquema proposto, já que, sua escolha deve ser feita de forma a balancear a carga de tráfego entre as microcélulas e a macrocélula. Para esse experimento foi usado uma fonte de tráfego de 8kbits/s e valores de *threshold* de 25, 35 e 40 que correspondem à 50%, 70% e 80% de ocupação do *buffer*.

Na Fig.(2.a) observa-se que quanto menor o *threshold*, maior é a taxa média de roteamento. Esse comportamento é esperado, pois, com um *threshold* maior, o *buffer* da microcélula suporta mais pacotes IP, e conseqüentemente, um número maior de sessões de dados concorrentes. Esse efeito é ratificado nas figuras Fig.(2.b) e Fig.(2.c), onde nota-se que o bloqueio e o atraso médio são maiores na célula com maior *threshold*, uma vez que, seu *buffer* acomoda mais pacotes.

Com pode-se observa na Fig.(3), na macrocélula esse efeito é contrário, isto é, a probabilidade de bloqueio e o tempo médio de espera por serviço do pacote IP diminuem com o aumento do *threshold*, pois, a microcélula suporta um tráfego maior de documentos *Web*. Note ainda que os tempos médios de espera por serviço de um pacote IP são praticamente os mesmos para os três *thresholds* usados.

Assim, através da seleção do valor do *threshold* é possível inferir na interação entre as microcélulas e a macrocélula balanceando a carga de tráfego de dados entre elas.

C. Comparação entre os esquemas de alocação de recursos

Nesta seção é apresentada uma análise comparativa do desempenho dos dois esquemas de alocação de recursos descritos

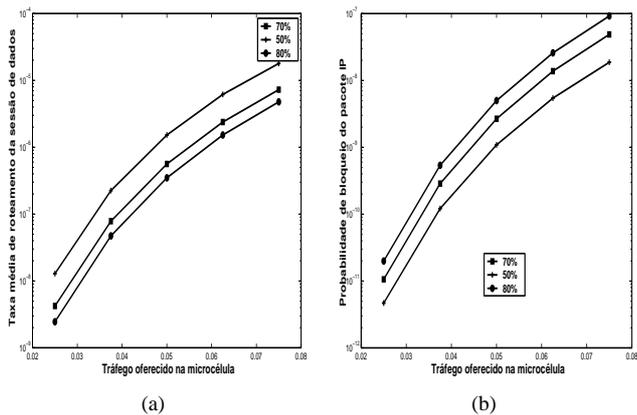


Fig. 2. Microcélula:(a) taxa média de roteamento de uma sessão de dados (b) Probabilidade de bloqueio de pacotes IP (c) Tempo médio de espera por serviço

anteriormente . O valor escolhido do *threshold* foi $T_h=35$, ou seja, uma ocupação de 70% do tamanho do *buffer*. A análise é feita considerando os fatores de atividades da fonte de 8 kbits/s, 32 kbits/s e 64 kbits/s de modo que possa analisar o impacto dessa atividade no desempenho do sistema.

A Fig.(4.a) mostra que o esquema proposto melhora o desempenho da microcélula em relação ao atendimento do serviço de dados para todos os três fatores de atividade da fonte. Na Fig.(4.b) ilustra-se a redução na probabilidade de bloqueio conseguida pelo esquema proposto em relação ao prioridade de voz. Nota-se que a vantagem do esquema proposto chega a 100% no caso de uma fonte de 8kbits/s. Para as demais fontes ela também é bastante significativa. O mesmo ganho em desempenho se observa para o tempo médio de espera por serviço, Fig.(4.c) e Fig.(4.d).

Na Fig.(5) é mostrada a característica do atendimento das sessões de dados roteadas das micros para as macrocélulas. Nota-se que esse tráfego roteado é facilmente escoado, mantendo valores bastante aceitáveis para a probabilidade de bloqueio e o tempo médio de espera por serviço de um pacote IP.

Os resultados apresentados até então quantificaram a melhora já esperada no desempenho do sistema obtido pelo emprego do esquema proposto, pois, ao se rotear uma sessão de dados da microcélula para a macrocélula durante uma sobrecarga, libera-se o espaço no *buffer* dos pacotes IPs per-

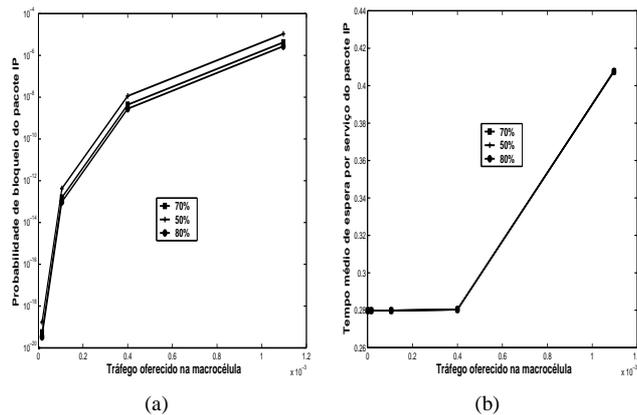


Fig. 3. Macrocélula:(a) Probabilidade de bloqueio de pacotes IP (b) Tempo médio de espera por serviço

tencentes a essa sessão. Assim, os pacotes IP que chegarão ao sistema encontrarão uma maior capacidade de armazenamento e assim experimentarão um menor bloqueio e atraso.

Porém, é importante analisar se os pacotes IPs das sessões roteadas serão melhor servidos do que seriam se permanecessem na microcélula. Esse resultado é apresentado na Fig(6) o qual mostra o ganho no antedimento do esquema proposto em relação ao prioridade de voz. A Fig(6.a) mostra que para os três fatores de atividade da fonte, o pacote IP roteado será atendido com uma probabilidade 100% maior na macrocélula. Para o atraso esse ganho chega aproximadamente a 50%, 40% e 20% para as fontes de 64 kbits/s, 32 kbits/s e 8 kbits/s; no pior caso, esses valores chegam, respectivamente, para as fontes de 8 kbits/s, 32 kbits/s e 64 kbits/s à 75%, 53% e 34% para o bloqueio e 0,19% 2% e 15% para o atraso.

Essa última análise demonstra que o esquema proposto melhora consideravelmente o desempenho da provisão de QoS para o serviço de dados. Adicionalmente, ele não impacta na QoS dos serviços de voz. Assim, conclui-se a sua viabilidade, e recomenda-se o seu emprego em ambientes hierárquicos.

Um ponto observado em todos os resultados mostrados anteriormente mostra que o fator de atividade da fonte degrada consideravelmente a QoS dos serviços de dados. Para os dois esquemas de alocação de recursos, tanto na micro quanto na macrocélula, observa-se uma grande disparidade entre os valores assumidos das medidas de desempenho em relação à característica da fonte.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto e analisado um novo esquema de alocação de recursos em redes móveis celulares hierárquicas. Os resultados mostraram um desempenho superior do esquema proposto em relação ao sistema com prioridade de voz apresentado em [8]. Um ponto importante desse esquema é que ele não impacta na QoS do serviço de voz. Essa característica é muito importante já que esse serviço é preponderante na rede e, assim, a garantia do seu provimento deve ser a máxima possível. Um parâmetro importante no desempenho da rede é o valor do *threshold*, uma vez que, sua escolha permite

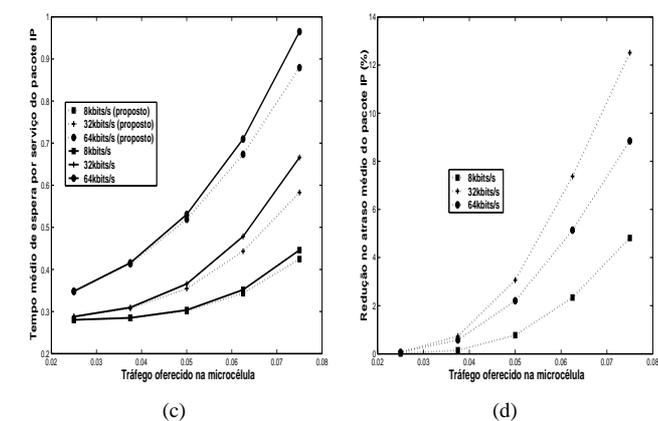
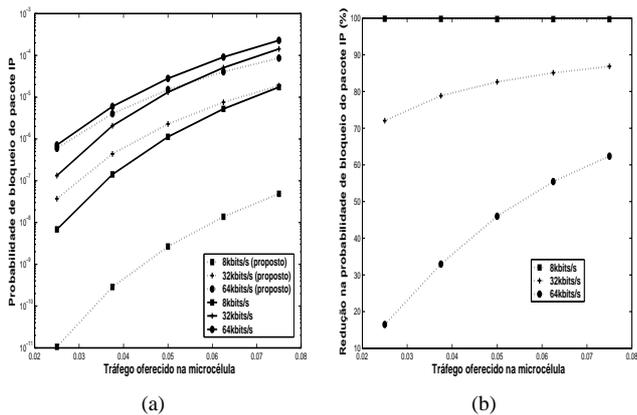


Fig. 4. Microcélula:(a) Taxa média de roteamento da sessão de dados (a) Probabilidade de bloqueio do pacote IP, (b) Tempo médio por serviço do pacote IP

balancear a carga de tráfego de dados entre as células das diversas camadas da rede.

O modelo proposto melhora a utilização do espectro de frequência, visto que, o tráfego de dados utiliza os recursos de rádio ociosos das células em todas as camadas. Essa eficiência pode ser ainda melhorada considerando no modelo o procedimento de retorno. Assim, futuros trabalhos podem incluir esse tema. Uma outra questão que pode ser explorada é a modelagem do tráfego de roteamento das sessões de dados. Por simplicidade, considerou-se que ele assume um comportamento Poissoniano, porém, um estudo mais aprofundado pode ser feito para identificar qual é o verdadeiro comportamento desse tráfego.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo CPNq.

REFERÊNCIAS

[1] S.-P. Chung e M.-T. Li. Performance Evaluation of Hierarchical Cellular CDMA Networks with Soft Handoff Queueing, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 2, 2005
 [2] Y. Zhang, B.-H. Soong. Channel holding time in hierarchical cellular systems, IEEE Communications Letters, Vol 8, No. 10, 2004.
 [3] X. Wu, B.Mukherjee e D. Ghosal. Hierarchical architectures in the third-generation-cellular Network, Wireless communication, vol. 11, no. 3, 2004, pp. 62–71.

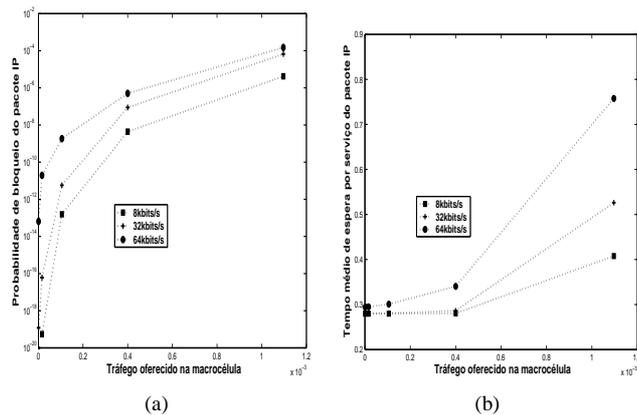


Fig. 5. Macro célula: (a) Probabilidade de bloqueio do pacote IP, (b) Tempo médio de espera por serviço do pacote IP

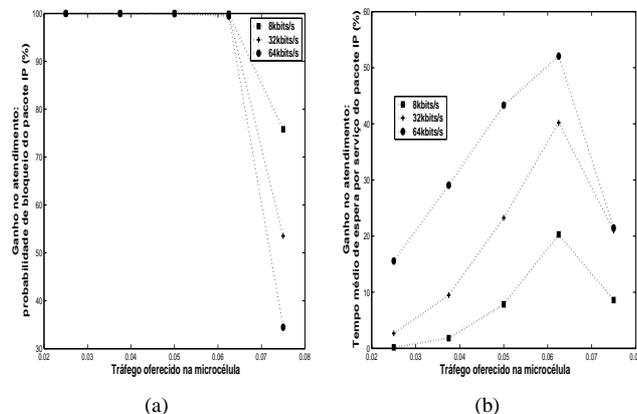


Fig. 6. Ganho no atendimento: (a) Probabilidade de bloqueio do pacote IP (b) Tempo médio de espera por serviço do pacote IP

[4] K. Yeo e C.H. Jun. Modeling and analysis of hierarchical cellular networks with general distributions of call and cell residence times, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 51, no.6, Novembro, 2002, pp.1361 - 1374.
 [5] M.Meo e M. A. Marsan. Resource management policies in GPRS systems, Performance Evaluation, Vol. 56, no. 1-4, Março, 2004, pp. 73-92.
 [6] C. Lindemann e A. Thümmel. Performance analysis of the general packet radio service, Comput. Networks, vol. 41, no. 1, 2003, pp. 1–17.
 [7] B.Jabbari e F.Fuhrmann. Teletraffic Modeling and Analysis of Flexible Hierarchical Cellular Networks with Speed-Sensitive Handoff Strategy, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 15, no. 8, Outubro, 1997, pp. 1539-1548.
 [8] G. H. S. Carvalho, J. C. W. A. Costa, C. R. L. Frances, R. C. M. Rodrigues, S. V.Carvalho, *Alocação de Recursos em Redes Móveis Celulares Hierárquicas GSM/GPRS*, Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2004, Belém, Pará.