

Análise Comparativa do Desempenho de Sistemas Celulares Hierarquizados

Tiago T. V. Vinhoza e J. Roberto Boisson de Marca

Resumo — Sistemas celulares de múltiplas camadas (ou hierarquizados) são úteis para acomodar densidades altas de tráfego mantendo a qualidade de serviço desejada. Estes sistemas procuram agregar as vantagens tanto dos sistemas micro-celulares, como por exemplo, o aumento da capacidade do sistema, quanto da arquitetura macro-celular que permite a redução do número de handoffs efetuados, implicando em diminuição da carga de sinalização da rede.

Neste trabalho são analisados através de uma ferramenta de simulação aspectos de projeto e desempenho de estruturas hierarquizadas como: compartilhamento do espectro entre as camadas de micro-células e de macro-células e o desempenho de diferentes estratégias de handoff entre essas camadas.

Palavras-Chave — Compartilhamento espectral, células hierarquizadas, comunicações móveis

Abstract— Multilayer cell systems, also known as hierarchical or overlay cell structures, are useful to accommodate high traffic densities while maintaining quality of service (QoS) objectives. These systems combine the advantages typical of microcellular systems such as increase in system capacity and also those usually derived from macro-cellular structures like the reduction in the number of handoffs causing also a decrease in signaling load.

In this work we analyze, through computer simulation, design aspects such as spectrum sharing between the macro-cell and micro-cell layers and the performance of different handoff strategies between the layers.

Index Terms— Cell Overlay, Handoffs, Spectrum Sharing, Mobile Communications

I. INTRODUÇÃO

O número de usuários de sistemas celulares teve um crescimento explosivo na última década. Hoje já existem cerca de 1,5 bilhões de terminais celulares em operação em todo mundo. A vasta maioria destes terminais faz uso de tecnologias das chamadas gerações 2 e 2,5. De forma a atender esta fantástica demanda as operadoras e seus engenheiros necessitam desenvolver continuamente novas técnicas para aumentar a capacidade da rede dentro da faixa de espectro concedida.

Tiago T. V. Vinhoza e J. Roberto B. de Marca, CETUC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, E-mails: vinhoza@cetuc.puc-rio.br, jrbm@cetuc.puc-rio.br
Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Uma das técnicas freqüentemente empregadas para este fim é a implantação de micro-células, ou seja, células que são iluminadas por antenas que se situam abaixo do nível da cumeeira das construções. A infraestrutura de micro-células se mostrou essencial para atender os chamados *hot spots*, que são comuns em ambientes urbanos com alta densidade populacional, e são também o meio de cobertura mais indicado para assinantes pedestres. No entanto, as micro-células não são a melhor opção para atender usuários que se deslocam em alta velocidade. Esses últimos usuários se controlados por micro-células precisarão realizar *handoffs* a uma freqüência muito alta, sobrecarregando os meios da rede de sinalização. Um número excessivo de handoffs também aumenta a probabilidade de perda de chamada em particular devido a degradações rápidas do sinal em esquinas. Por todos esses fatores uma solução híbrida foi desenvolvida que procura tirar partido dos benefícios das micro-células e também de estruturas macro-celulares. Esta solução híbrida é conhecida por estrutura celular hierarquizada e nela o sistema rádio é organizado em duas camadas. A camada superior composta de macro-células tem como objetivo acomodar usuários que se movem rápido e também prover cobertura em pontos que são difíceis de serem atendidos por micro-células. Cada uma dessas macro-células se superpõe a uma camada inferior composta de micro-células.

Na próxima Seção são brevemente descritas algumas técnicas existentes na literatura para gerenciamento de admissão em uma estrutura hierarquizada. A seguir, na Seção III, o ambiente de simulação que é utilizado para avaliar o desempenho dos procedimentos de gerência de recursos em diferentes cenários é detalhado. Na Seção IV é feita uma avaliação do comportamento das estratégias descritas anteriormente para distintas opções de compartilhamento de espectro entre as duas camadas e também quando o percentual de usuários pedestres é variado. Como era de se esperar o perfil de tráfego de entrada irá influenciar a escolha da melhor solução para compartilhamento. Uma análise comparativa limitada ao desempenho de duas estratégias também é apresentada. Finalmente na Seção V são sumarizadas as principais conclusões do trabalho e são indicados alguns desafios que ainda estão por ser vencidos.

II. ESTRATÉGIAS PARA GERÊNCIA DE RECURSOS

Existem diversas estratégias [1-5] de gerências de recursos entre as camadas de macro e micro-células descritas na literatura. Dentre elas aqui podem ser destacadas:

- *Estratégia do Estouro:* Nesta estratégia todas as chamadas são alocadas na micro-célula. Os usuários que encontrarem a micro-célula congestionada são alocados na macro-célula. Não há diferenciação por velocidade na designação de camada para os usuários.
- *Estratégia da Velocidade:* Os usuários são designados para os diferentes níveis de camadas, de acordo com seu grupo de mobilidade. O objetivo desse critério é reduzir a taxa de handoff, que está diretamente relacionada à velocidade do usuário.
- *Estratégia Clássica:* O sistema multicamada clássico pode ser visto como uma combinação das estratégias do estouro e da velocidade. Os usuários são designados para as diferentes camadas de acordo com a sua velocidade. Os usuários lentos que encontrarem a micro-célula congestionada são alocados na macro-célula. A estratégia clássica pode ser reversível ou não reversível. No caso reversível os usuários lentos são re-designados para as micro-células quando houver liberação de recursos na mesma. Na opção não-reversível não existe devolução de usuários pela camada macro para a camada micro. Espera-se que a estratégia reversível utilize mais eficientemente os recursos de rádio do que a não-reversível, principalmente quando a macro-célula sobrepõe muitas micro-células. Resultados de simulação apresentados em [6] mostram que a estratégia clássica reversível apresenta o melhor desempenho em termos de gerência de recursos.

Nesta contribuição o desempenho da estratégia clássica reversível será avaliado em detalhe em função da partição de recursos entre as camadas macro e micro. Será também feita uma análise comparativa com a estratégia de velocidade para as soluções que melhor comportamento apresentaram.

III. DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

O programa utilizado para as simulações foi inspirado na ferramenta implementada em [6]. Nesta seção serão apresentadas algumas características desta Ferramenta de Simulação. O ambiente de simulação considerado é um sistema bidimensional composto por um *cluster* de 7 macro-células reais e 42 macro-células virtuais superpostas a 49 micro-células reais e 84 micro-células virtuais, ou seja, cada macro-célula cobre um *cluster* de 7 micro-células. As células virtuais são utilizadas para conter o chamado efeito de borda,

tornando o sistema mais próximo da realidade e seus resultados mais confiáveis.

No modelo de tráfego adotado, os instantes de chegada de novas chamadas são modelados por um processo estacionário de Poisson. A taxa de chegada de novas chamadas é constante ao longo do tempo em toda a área de simulação. A duração média de cada chamada, nas simulações, é uma variável aleatória exponencial cuja média é um dos parâmetros de entrada da ferramenta.

A área geográfica representada pela simulação é constituída de um conglomerado de blocos de prédios divididos por ruas ou avenidas, com formas tipicamente retangulares. Essa configuração de ruas, conhecida por *Manhattan Grid*, é bem conhecida na literatura. O modelo de mobilidade prevê que mudanças de direção só são permitidas nas regiões de decisão de direção. A área hachureada na Fig. 1 ilustra uma região de decisão localizada entre quatro blocos de prédios. Ao chegar a uma dessas regiões o terminal pode prosseguir na mesma direção com probabilidade $p = 0,5$ ou pode mudar de direção tanto para a esquerda quanto para a direita, cada uma dessas duas opções ocorrendo com probabilidade $p=0,25$.

As antenas das microcélulas são omni-direcionais enquanto nas macrocélulas é usada uma configuração setorizada com antenas com lobo principal idealizado de 120° .

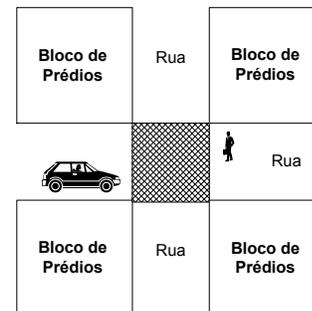


Fig. 1: Modelo de Mobilidade

Os usuários móveis são divididos em dois grupos de acordo com o seu padrão de mobilidade, a saber: pedestres e veiculares. Em ambos os casos os terminais são distribuídos uniformemente pelos segmentos de rua. A fração de usuários pedestres é um parâmetro de entrada do simulador. A velocidade de deslocamento dentro de cada um dos grupos é modelada por uma variável aleatória assim definida:

- Pedestres: a velocidade segue uma distribuição uniforme truncada entre 2,5 e 5 km/h;
- Passageiros veiculares: a velocidade obedece uma distribuição Gaussiana truncada entre 10 e 90 km/h com média igual a 50 Km/h e desvio padrão igual a 10 Km/h.

O modelo de propagação escolhido foi o de Walfisch-Ikegami (COST 231), que vale tanto para micro-células quanto para macro-células [7]. Uma componente de

desvanecimento de larga escala log-normal também é adicionada aos cálculos de propagação.

IV. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados das simulações apresentados a seguir foram obtidos simulando-se 20000 chamadas geradas por usuários pedestres e veiculares. A duração média de cada chamada foi feita igual a 2 minutos. Dois cenários foram considerados para avaliar o desempenho do sistema. O cenário A consiste de 50% de usuários pedestres e 50% de usuários veiculares. O cenário B consiste de 75% de usuários pedestres e 25% de usuários veiculares. Em todas as simulações é assumido que o sistema não comete erros na designação dos usuários para suas respectivas camadas. Neste trabalho todos os usuários pedestres são alocados inicialmente para as micro-células enquanto os usuários veiculares são sempre colocados nas macro-células. Para a estratégia clássica, em caso de congestionamento em uma micro-célula, o usuário pedestre é realocado na macro-célula que cobre a micro-célula em questão.

As medidas de desempenho consideradas foram o número médio de usuários no sistema e a probabilidade de bloqueio de novas chamadas. Para cada um dos cenários (A e B) foi observado o desempenho para 5 partições distintas do espectro. A Tabela I apresenta as partições de espectro avaliadas. Vale ressaltar que nas tabelas e nos respectivos comentários a seguinte notação foi adotada: x/yM , onde x é o número de canais por micro-célula e y é o número de canais por setor de macro-célula

TABELA I
PARTIÇÕES DO ESPECTRO UTILIZADAS NAS
SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS A E B

Divisão do Espectro	Número Total de Canais na Camada de Micro-células	Número Total de Canais na Camada de Macro-células
6m18M	42	378
9m17M	63	357
12m16M	84	336
15m15M	105	315
18m14M	126	294

As tabelas de desempenho apresentadas a seguir têm como parâmetro o tráfego de entrada, expresso em chamadas por hora na região de cobertura de uma micro-célula.

Na Tabela II, é analisada a influência do tráfego de entrada no número médio de usuários ativos no sistema para o cenário A utilizando-se a estratégia clássica reversível. Observa-se desta tabela que na medida em que foi aumentado o tráfego, aumentou também o número de usuários sendo atendidos no sistema. Porém a partir de um certo valor, o comportamento tende a apresentar uma saturação ligada ao aumento da probabilidade de bloqueio de novos usuários. Pode ser notado que à medida que o tráfego aumentou o a divisão de recursos que forneceu o maior número de usuários

atendidos foi a 12m16M. As tabelas III, IV e V explicam estes resultados com maiores detalhes.

TABELA II
NÚMERO MÉDIO DE USUÁRIOS ATIVOS NO SISTEMA
ESTRATÉGIA CLÁSSICA REVERSÍVEL – CENÁRIO A

Tráfego (ch/h)	6m18M	9m17M	12m16M	15m15M	18m14M
100	157,72	155,46	158,11	155,65	157,87
200	232,26	232,74	233,80	234,51	233,15
300	275,30	282,05	281,79	277,27	276,69
400	297,24	305,76	308,32	303,55	303,29

Como pode ser visto da Tabela III, a probabilidade de bloqueio de usuários pedestres, para o cenário em consideração, apresentou um resultado tolerável até mesmo para tráfegos altos. Já na Tabela IV, que apresenta a probabilidade de bloqueio de usuários veiculares, pode-se ver que para tráfegos baixos, a distribuição 6m18M apresentou melhor desempenho, já que praticamente não houve bloqueio de pedestres nas micro-células evitando uma sobrecarga nas macro-células. Na medida em que o tráfego aumentou a distribuição 6m18M não mais apresentou o melhor resultado. Os pedestres bloqueados nas micro-células passaram a disputar canais nas macro-células com usuários veiculares, aumentando assim a probabilidade de bloqueio dos veículos. Com isto observa-se que mais canais precisaram ser alocados nas micro-células para evitar o transbordo excessivo de usuários pedestres. Pode ser observado na Tabela V que para tráfegos médios e altos as distribuições 9m17M e 12m16M apresentaram melhor desempenho tendo em vista que além do transbordo dos usuários pedestres ter sido reduzido, ainda havia canais suficientes nas macro-células para comportar a demanda dos usuários veiculares.

TABELA III
PROBABILIDADE DE BLOQUEIO DE USUÁRIOS PEDESTRES (%)
ESTRATÉGIA CLÁSSICA REVERSÍVEL – CENÁRIO A

Tráfego (ch/h)	6m18M	9m17M	12m16M	15m15M	18m14M
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300	1,50	0,08	0,00	0,00	0,00
400	9,50	1,20	0,35	0,00	0,00

TABELA IV
PROBABILIDADE DE BLOQUEIO DE USUÁRIOS VEICULARES (%)
ESTRATÉGIA CLÁSSICA REVERSÍVEL – CENÁRIO A

Tráfego (ch/h)	6m18M	9m17M	12m16M	15m15M	18m14M
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,90	0,16	0,30	0,40	0,00
300	8,42	1,89	4,10	5,00	8,88
400	18,45	15,60	14,20	16,30	25,30

TABELA V
PROBABILIDADE DE MÉDIA DE BLOQUEIO (%)
ESTRATÉGIA CLÁSSICA REVERSÍVEL – CENÁRIO A

Tráfego (ch/h)	6m18M	9m17M	12m16M	15m15M	18m14M
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,45	0,08	0,15	0,20	0,00
300	4,96	0,99	2,05	2,50	4,44
400	13,98	8,40	7,28	8,15	12,65

É interessante notar, que no caso do cenário B, a partição do espectro que apresentou maior capacidade foi a 18m14M como mostra a Tabela VI. Isto pode ser explicado pelo fato de que quanto maior o percentual de usuários pedestres, maior também é o número de canais necessários nas micro-células para reduzir a probabilidade de bloqueio (ver Tabela VII). Para os usuários veiculares (Tabela VIII), a configuração 18m14M foi uma das duas configurações que apresentou a menor probabilidade de bloqueio. A justificativa para esse resultado é que quanto menor o número de canais nas micro-células maior a quantidade de usuários pedestres transbordados às macro-células resultando em um aumento significativo da probabilidade de bloqueio de chamadas de usuários veiculares. Este fenômeno é demonstrado pelo comportamento da distribuição 6m18M à medida que o tráfego aumenta. Portanto, conforme esperado, para um perfil de tráfego com mais pedestres do que veículos, um maior número de canais deve ser alocado nas micro-células. A tabela IX mostra que a probabilidade média de bloqueio foi menor para a configuração 18m14M.

TABELA VI
NÚMERO MÉDIO DE USUÁRIOS ATIVOS NO SISTEMA
ESTRATÉGIA CLÁSSICA REVERSÍVEL – CENÁRIO B

Tráfego (ch/h)	6m18M	9m17M	12m16M	15m15M	18m14M
100	157,38	155,77	158,05	155,41	157,66
200	231,11	232,19	233,44	235,46	234,31
300	275,03	282,43	283,99	281,94	283,64
400	300,86	311,49	316,37	316,14	318,93

TABELA VII
PROBABILIDADE DE BLOQUEIO DE USUÁRIOS PEDESTRES (%)
ESTRATÉGIA CLÁSSICA REVERSÍVEL – CENÁRIO B

Tráfego (ch/h)	6m18M	9m17M	12m16M	15m15M	18m14M
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300	0,94	0,10	0,00	0,00	0,00
400	8,18	2,32	0,44	0,06	0,06

TABELA VIII
PROBABILIDADE DE BLOQUEIO DE USUÁRIOS VEICULARES (%)
ESTRATÉGIA CLÁSSICA REVERSÍVEL – CENÁRIO B

Tráfego (ch/h)	6m18M	9m17M	12m16M	15m15M	18m14M
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
300	1,60	0,28	0,12	0,08	0,08
400	14,21	5,98	2,61	1,24	1,24

TABELA IX
PROBABILIDADE MÉDIA DE BLOQUEIO (%)
ESTRATÉGIA CLÁSSICA REVERSÍVEL – CENÁRIO B

Tráfego (ch/h)	6m18M	9m17M	12m16M	15m15M	18m14M
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
300	1,11	0,15	0,03	0,02	0,02
400	9,69	3,24	0,98	0,36	0,36

Passamos agora a uma análise comparativa do desempenho de duas estratégias, a saber: clássica reversível e da velocidade. Para o cenário A, a estratégia da velocidade apresentou um comportamento próximo a aquele observado para a estratégia clássica reversível. À medida que o tráfego gerado foi aumentando a divisão de canais 12m16M foi também a que propiciou a maior capacidade. Os valores obtidos para o número médio de usuários ativos e para probabilidade de bloqueio foram bastante próximos, como mostra a Tabela X. A maior diferença encontrada é inferior a 2%. A pequena vantagem oferecida pela estratégia clássica reversível em termos de capacidade pode ser explicada pela probabilidade de bloqueio. Para o caso de usuários pedestres, a estratégia da velocidade apresentou pior desempenho por não permitir o transbordo dos pedestres bloqueados nas micro-células para as macro-células. No caso dos usuários veiculares, a probabilidade de bloqueio destes na estratégia da velocidade foi a que apresentou melhor desempenho justamente pelo fato de não ter havido usuários pedestres sendo alocados na macro-célula.

Já para o cenário B a divisão de canais 18m14M foi a que apresentou o melhor resultado para ambas estratégias. A Tabela XI apresenta para este cenário os valores de

probabilidade de bloqueio com a configuração 18m14M para ambas as estratégias em consideração. O fato de a estratégia clássica permitir o transbordo de usuários pedestres faz com que esta apresente um ganho de capacidade bem mais substancial neste cenário, uma vez que os canais que estariam ociosos nas macro-células quando se utiliza a estratégia da velocidade passam a receber os usuários pedestres. No caso do cenário A este ganho é menor, pois a utilização das macro-células pelos usuários veiculares é maior.

TABELA X
NÚMERO DE USUÁRIOS ATIVOS E PROBABILIDADE MÉDIA DE BLOQUEIO
COMPARAÇÃO ENTRE ESTRATÉGIAS - CENÁRIO A (12m16M)

Tráfego (ch/h)	Estratégia Clássica		Estratégia da Velocidade	
	Número de Usuários	Prob. Bloqueio	Número de Usuários	Prob. Bloqueio
100	158,11	0,00	158,11	0,00
200	233,80	0,15	233,29	0,17
300	281,79	2,05	280,04	2,13
400	308,32	7,28	303,70	7,77

TABELA XI
NÚMERO DE USUÁRIOS ATIVOS E PROBABILIDADE MÉDIA DE BLOQUEIO
COMPARAÇÃO ENTRE ESTRATÉGIAS - CENÁRIO B (18m14M)

Tráfego (ch/h)	Estratégia Clássica		Estratégia da Velocidade	
	Número de Usuários	Prob. Bloqueio	Número de Usuários	Prob. Bloqueio
100	157,66	0,00	157,66	0,00
200	234,31	0,00	233,16	0,00
300	283,64	0,02	275,29	0,08
400	318,93	0,36	301,61	0,63

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi abordado o conceito de sistemas celulares hierarquizados cuja motivação é combinar as vantagens das estruturas macro e micro-celulares visando aumentar a eficiência da gerência dos recursos de rádio. Dentre as propostas existentes de sistemas hierarquizados foram apresentadas as principais estratégias de gerência de chamadas e handoffs, a saber: clássica reversível, clássica não-reversível, da velocidade e do estouro. Os resultados das simulações com a estratégia clássica reversível e com a estratégia da velocidade mostraram que a partição ótima do espectro, no que tange ao número de usuários atendidos simultaneamente, variou de acordo com o perfil do tráfego de entrada. Portanto, os resultados obtidos sugerem o estudo de sistemas celulares hierarquizados com controle adaptativo dos recursos de rádio. Uma estratégia que permita que o número

de canais distribuídos para cada camada varie de acordo com o perfil de tráfego pode resultar em grande melhoria na eficiência do uso dos recursos de um sistema celular.

REFERÊNCIAS

- [1] K.Y. Yeung e S.Nanda, *Channel Management in Microcell/Macrocell Cellular Radio Systems*, IEEE Trans. on Vehicular Tech., vol. 45, no.4, pp.601 –612, Novembro de 1996.
- [2] L.-R. Hu e S.S. Rappaport, *Personal Communication Systems Using Multiple Hierarchical Cell Overlays*, IEEE J. on Selected Areas on Comm., vol. 13, no.2, pp.406 – 415, Fevereiro de 1995.
- [3] X. Lagrange e P. Godlewski, *Teletraffic Analysis of a Hierarchical Cellular Network*, Proc. IEEE Vehicular Technology. Conf., VTC-95, pp.882-886, Chicago, Junho de 1995.
- [4] K.Ivanov e G. Spring, *Mobile Speed Sensitive Handover in a Mixed Cell Environment*, Proc. IEEE Vehicular Technology. Conf., VTC-95, pp.892-896, Chicago, Junho de 1995.
- [5] B.Jabbari e W.F. Fuhrmann, *Teletraffic Modeling and Analysis of Flexible Hierarchical Cellular Networks with Speed-Sensitive Handoff Strategy*, IEEE J. on Selected Areas on Comm., vol.15, no.8, pp.1539-1548, Outubro de 1997.
- [6] J. Roberto B. de Marca e I.F. da Silva, *Further Simulation Results on Hierarchical Cell Structures*, Proc., IEEE Wireless Networking and Comm. Conf. –WCNC, New Orleans, Março de 2003.
- [7] J.D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd edition, Wiley: Chichester, 2000.