

Simulação de Modelo de Propagação Microcelular Urbano e Análise de Desempenho

K. P. S. Chagas, T. C. F. Montenegro, F. R. P. Cavalcanti, W. M. de Sousa Jr.

GTEL – Grupo de Pesquisa em Telecomunicações Sem Fio – UFC

Resumo – A utilização de estações rádio-base (ERBs) microcelulares em ambientes urbanos de alta densidade de usuários constitui uma boa alternativa para garantir uma cobertura eficiente e confiável, além de possibilitar alta capacidade. Entretanto, a propagação em um ambiente microcelular urbano ocorre de maneira distinta dos modelos macrocelulares clássicos. Neste artigo, avaliou-se a cobertura de um sistema microcelular assim como o seu desempenho em cenários limitados por cobertura e por interferência. As análises são realizadas através de simulações computacionais. Avaliou-se ainda o impacto de parâmetros como potência de transmissão, número de ERBs, reuso de frequências e diversos critérios de iniciação de *handover*.

Palavras-Chave – *microcélula, propagação, handover*

Abstract - The use of microcellular radio base-stations (ERBs) in urban environments with high user density is a good alternative to assure efficient and reliable coverage and also to allow for high capacity. However, characterization of the propagation in an urban microcellular environment is very different from classical macrocellular models. In this article, coverage of a microcellular system was analyzed as well as its performance in coverage- (i.e., noise-) and interference-limited scenarios. The analyses have been conducted using computer simulations. The impact of parameters such as the transmission power, the number of ERBs, frequency reuse pattern and several criteria for handover initiation have also been evaluated.

Index Terms – *Microcell, propagation, handover*

I. INTRODUÇÃO

As novas tecnologias de comunicações móveis têm como mercado os grandes centros urbanos, caracterizados por edificações organizadas em avenidas bem definidas. A utilização de estações rádio-base (ERBs) microcelulares nesses centros de alta densidade de usuários constitui uma boa alternativa para garantir uma cobertura eficiente e confiável, além de possibilitar alta capacidade, um maior reuso de frequência, e a utilização de menores potências nas unidades móveis.

Um sistema microcelular possui um custo associado ao número de ERBs maior que um macrocelular, uma vez que utiliza um maior número de ERBs para cobrir uma mesma área, devido à menor potência de transmissão empregada. Exige ainda uma estrutura de interconexão mais complexa, além de um bom planejamento de disposição de estações rádio-base e de reuso de frequências. As microcélulas também são mais sensíveis à interferência que as macrocélulas, seja devido a pequenas variações de tráfego, alterações no ambiente de propagação (por exemplo, por causa de novas edificações), ou até mesmo devido a um aumento incremental da rede celular, isto é, a instalação de uma nova ERB microcelular. Espera-se ainda que num sistema microcelular as taxas de *handovers* por chamada sejam maiores que num sistema macrocelular, haja visto as menores áreas de cobertura das células microcelulares [1].

Em um ambiente microcelular, as edificações dos centros urbanos funcionam como guia de onda e a propagação do sinal ocorre em rotas bem definidas [2]. A propagação possui uma estrutura complexa. O “efeito esquina”, fenômeno típico de ambiente microcelular, acontece quando o móvel muda sua direção, virando em uma esquina, perdendo assim a componente de linha de visada (LOS) com a ERB que o serve. Nesses casos, variações abruptas na potência do sinal (da ordem de 20 dB a 30 dB) podem ocorrer [2].

Este trabalho se propõe a avaliar a cobertura, a influência da interferência em diversos padrões de reuso e o *handover* em ambiente microcelular urbano através de simulações computacionais. O *handover* é o processo de transferência de chamada em curso de um canal de rádio para outro, sejam de ERBs diferentes ou não. Observando-se as taxas de queda de chamadas e de *handovers* realizados por chamada é possível avaliar o desempenho do sistema, determinando, inclusive, deficiências na cobertura. A queda de chamadas em decorrência do efeito esquina pode ser evitada através de uma cobertura uniforme e algoritmos de *handover* eficientes.

O restante deste artigo está assim organizado. Na seção II, detalha-se o modelo de propagação microcelular, incluindo informações sobre a perda de percurso e o desvanecimento. Na seção III, descreve-se o modelo de simulação e os parâmetros utilizados. Os resultados de simulação são mostrados na seção IV e, finalmente, o artigo é concluído na seção V.

K. P. S. Chagas, T. C. F. Montenegro, W. M. de Sousa Jr. e F. R. P. Cavalcanti, GTEL – Grupo de Pesquisa em Telecomunicações Sem Fio – UFC, C.P. 6005, CEP: 60.455-760, Fortaleza – CE, Brasil, E-mails: {karla, thiago, waltemar, rod}@gtel.ufc.br

K. S. Chagas é bolsista de mestrado da CAPES.

T. C. F. Montenegro é bolsista de iniciação científica do CNPq.

II. MODELO DE PROPAGAÇÃO

Diversos efeitos compõem a propagação em um ambiente microcelular, entre eles a perda de percurso e o desvanecimento. A potência do sinal é atenuada principalmente devido à perda de percurso. O desvanecimento ocorre como resultado de diversos fenômenos da propagação, como difração, reflexão, refração e espalhamento dos multipercursos, além de efeitos causados pelo relevo e por grandes obstáculos.

A cobertura foi avaliada levando-se em consideração a perda de percurso e o desvanecimento de larga escala (sombreamento). Neste trabalho, utilizou-se o modelo de perda de percurso microcelular para edificações baixas proposto por Bertoni em [2], apresentado na seção II-A. O modelo para o sombreamento é apresentado na seção II-B. Desconsidera-se nessa avaliação os efeitos do desvanecimento de pequena escala, assumindo-se que um determinado ponto da grade de ruas representa, efetivamente, uma região do espaço ao longo da qual a potência recebida é mediada. Tal suposição é válida para o presente trabalho uma vez que os parâmetros aqui analisados, tais como o *handover*, dependem principalmente dos efeitos de propagação de longo prazo.

O cálculo de potência recebida foi feito a partir de parâmetros típicos do sistema GSM [3] considerando ganhos e perdas compreendidas ao longo do enlace de rádio.

A. Perda de percurso

As microcélulas são geralmente instaladas em postes de iluminação e as antenas de transmissão ficam a uma altura entre 3 m e 10 m. Em ambiente urbano, as ruas e avenidas funcionam como guia de onda, como consequência da organização das edificações e da baixa altura das antenas transmissoras.

O modelo de perda de percurso determina a influência da propagação ao longo da grade de ruas, através da definição de rotas para o sinal. Esse modelo baseia-se nos percursos com linha de visada (LOS) e sem linha de visada (NLOS). A Figura 1 apresenta as diferentes possibilidades de rotas previstas, descritas a seguir:

- LOS – corresponde à região com linha de visada em relação à estação rádio-base, ou seja, corresponde à rua na qual a estação base está posicionada;
- NLOS lateral – corresponde às primeiras ruas paralelas e perpendiculares à linha de visada (LOS) próximas ao bloco onde a base se localiza;
- LOS+20 dB – corresponde às regiões entre as ruas laterais e a linha de visada. Utiliza-se a mesma fórmula da LOS acrescida de 20 dB;
- Rotas NLOS combinadas – região que abrange todas as demais rotas.

O modelo de perda de percurso proposto em [2] considera fórmulas empíricas específicas para cada rota, além de fórmulas combinadas de duas ou mais rotas. Neste trabalho, foram utilizadas fórmulas individuais, apresentadas na

Tabela I, para as rotas LOS, NLOS lateral e LOS+20 dB, além de uma fórmula combinada para as demais rotas.

A propagação nas rotas LOS é dividida em dois segmentos descritos por fórmulas diferentes e cuja interface é a chamada distância de *break point*. Verifica-se neste ponto uma descontinuidade no valor da perda de percurso, porém não superior a 3 dB.

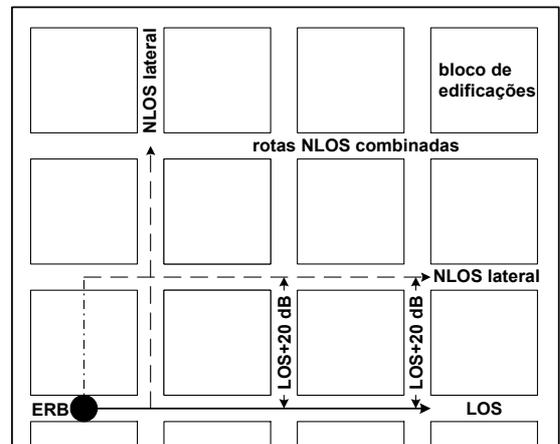


Fig. 1. Rotas de propagação definidas para uma estação rádio-base posicionada no meio de um bloco.

TABELA I
MODELO DE PERDA DE PERCURSO MICROCELULAR
PARA EDIFICAÇÕES BAIXAS*.

Rota	Fórmula de Perda de Percurso
LOS	$P_L(R_k) = 81,14 + 39,40 \log(f_G) - 0,09 \log(h_b) + [15,80 - 5,73 \log(h_b)] \log(R_k), R_k < R_{bk}$ $P_L(R_k) = [48,38 - 32,10 \log(R_{bk})] + 20 \log(1,6 / h_m) + 45,70 \log(f_G) + [25,34 - 13,90 \log(R_{bk})] \log(h_b) + [32,10 + 13,90 \log(h_b)] \log(R_k), R_k > R_{bk}$
NLOS lateral	$P_L(R_k) = [127,39 + 31,63 \log(f_G)] - [13,05 + 4,35 \log(f_G)] \operatorname{sgn}(\Delta h) \log(1 + \Delta h) + [29,18 - 6,70 \operatorname{sgn}(\Delta h) \log(1 + \Delta h)] \log(R_k)$
NLOS combinada	$P_L(R_k) = [138,31 + 38,88 \log(f_G)] - [13,74 + 4,58 \log(f_G)] \operatorname{sgn}(\Delta h) \log(1 + \Delta h) + [40,06 - 4,35 \operatorname{sgn}(\Delta h) \log(1 + \Delta h)] \log(R_k)$

R_k = distância do móvel ao transmissor [km]

f_G = frequência do sistema [GHz]

Δh = altura relativa do transmissor à altura média das edificações [m]
($\Delta h = h_b - h_{BD}$)

h_{BD} = altura média das edificações [m]

h_b = altura da antena transmissora a partir do solo [m]

h_m = altura da antena do móvel a partir do solo [m]

λ = comprimento de onda [m]

R_{bk} = distância do *break point* [km] ($R_{bk} \cong 4h_b h_m / 1000\lambda$)

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

* O modelo é válido para:

$$0,9 \text{ GHz} < f_G < 2 \text{ GHz}; -8 \text{ m} < \Delta h < 6 \text{ m}; 0,05 \text{ km} < R_k < 3 \text{ km}.$$

B. Sombreamento

O modelo de sombreamento utilizado corresponde a um modelo correlacionado descrito em [3]. O sombreamento espacialmente correlacionado segue uma distribuição log-normal com média nula e desvio padrão dependente do ambiente de propagação. Neste trabalho, assumiu-se desvio padrão de 8 dB e uma distância de decorrelação de 5 metros.

O grau de correlação espacial depende, dentre outros fatores, da topografia do local e do ângulo de chegada do sinal recebido. A equação 1 mostra que o sombreamento entre a i -ésima estação rádio-base e o j -ésimo usuário é formado por duas componentes. A primeira (X_{T-ERBi}) caracteriza o terreno em que a ERB está localizada e a segunda ($X_{ERBi-Mj}$) representa as edificações e topografia entre a ERB e o móvel. O coeficiente de correlação do terreno ρ utilizado é de 0,5.

$$X_{\sigma_{i,j}} = \sqrt{\rho} X_{T-ERBi} + \sqrt{1-\rho} X_{ERBi-Mj} \quad (1)$$

O valor do sombreamento para pontos localizados entre dois pontos decorrelacionados é calculado através de interpolação linear, conforme mostra a equação 2 [4].

$$u = \frac{(Z)u_B + (1-Z)u_A}{\sqrt{(1-2Z+2Z^2)}} \quad (2)$$

onde u_A e u_B são respectivamente os valores de sombreamento nos pontos de maior e menor abscissa ou ordenada e Z é distância entre o ponto interpolado e o ponto correspondente a u_A normalizada pela distância de decorrelação.

III. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

A área de serviço, mostrada na Figura 2, é delimitada por um quadrado de 2.400 m de lado e composta por blocos de edificações de 80 m de lado e ruas com 20 m de largura. As estações rádio-base estão localizadas nas ruas da grade, entre os blocos. O modelo de disposição de estações rádio-base Manhattan [5] é utilizado. O posicionamento das ERBs é feito de forma a minimizar a interferência e garantir uma cobertura uniforme, evitando o efeito esquina e as quedas de chamadas. O procedimento envolve o agrupamento de um conjunto de blocos de edificações, organizando-os em blocos maiores, denominados macroblocos, e efetuando a disposição das ERBs em diagonais. A quantidade de blocos em cada macrobloco é configurável e é o fator responsável pela determinação do número de ERBs. A Figura 2 também ilustra a disposição de ERBs utilizada nas simulações.

Uma simulação é composta de um grande número de iterações em que são feitas medições que resultam nas métricas de desempenho do sistema, isto é, a taxa de queda de chamadas e o número médio de *handovers* por chamada. A cada simulação são calculadas matrizes com amostras espaciais da perda de percurso e da componente do sombreamento (X_{T-ERBi}), a qual é considerada uma componente estática, pois caracteriza a região coberta por

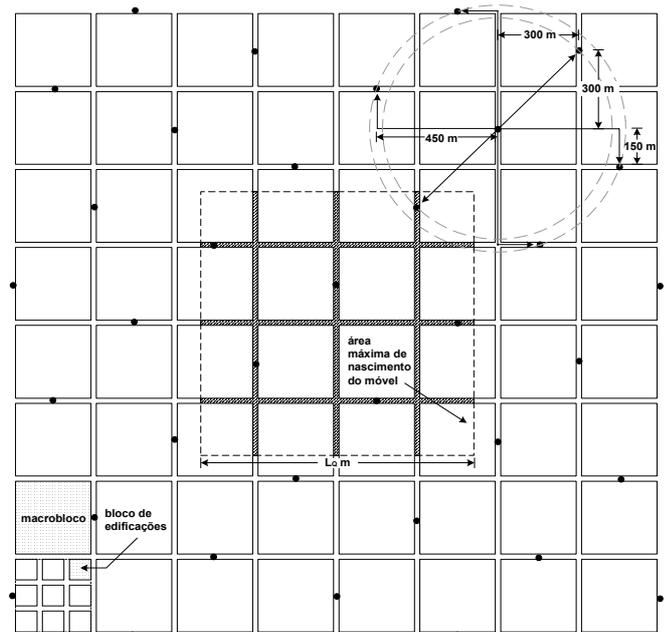


Fig. 2. Posicionamento das 36 ERBs na área de serviço.

TABELA II
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.

Parâmetro	Valor
Frequência do sistema	1,8 GHz
Taxa de símbolo	270.833,33 baud
SINR mínima requerida ($SINR_{min}$)	10 dB
Potência de transmissão	22-32 dBm [6]
Altura da antena transmissora	5 m
Ganho da antena transmissora	5-8 dBi
Perdas de cabos e conectores	2 dBi
Densidade espectral do ruído	174 dBm/Hz
Figura de ruído no receptor	5 dB
Altura média das edificações	10 m
Altura da estação móvel	1,8 m
Número de ERBs	21, 36 ou 78
Padrão de Reuso	1, 3 e 4
Fator de Atividade	18, 75%, 56,25% e 75%

uma determinada ERB, sendo calculada apenas uma vez a cada simulação. Já a componente $X_{ERBi-Mj}$ é considerada dinâmica, a fim de modelar o efeito de dois móveis verificarem sombreamentos distintos, embora correlacionados entre si, quando conectados a uma mesma ERB num mesmo ponto do espaço, e, portanto, é calculada a cada iteração. Utilizou-se uma resolução espacial de 1m. A partir desses valores, pode-se calcular a potência recebida de cada estação rádio-base em qualquer ponto da malha discreta de possíveis posições do móvel.

Foram testados três padrões de reuso de frequência, reusos 1, 3 e 4, com os seguintes fatores de atividade: 18,75%, 56,25% e 75%, respectivamente. O fator de atividade para o reuso 4 foi escolhido arbitrariamente e corresponde a uma carga moderadamente elevada de tráfego no sistema. Os valores para os reusos 1 e 3 foram derivados assumindo-se a

mesma banda total do sistema e uma carga oferecida semelhante à do reuso 4.. As antenas utilizadas são omnidirecionais. A Tabela-II apresenta os principais parâmetros de simulação.

A. Comportamento do usuário

A localização inicial do móvel é limitada a um quadrado de lado $L_Q = 500$ m centrado na grade de ruas, conforme mostra a Figura 2. O móvel se desloca sempre em linha reta com velocidade constante dada por uma distribuição normal com média 3 km/h e desvio padrão 0,3 km/h. Assume-se que os móveis deslocam-se no meio das ruas e podem mudar de direção no meio de cada cruzamento, com probabilidades mostradas na Figura 3. A chamada tem duração total de 120 s.

B. Algoritmo de handover

O protocolo MCHO (*Mobile-Controlled Handoff*), é utilizado na simulação. Este protocolo descentralizado é aplicado em sistemas microcelulares e é caracterizado por seu curto tempo de reação (da ordem de 0,1 s) [7]. Assume-se que o móvel é capaz de monitorar a potência do sinal das ERBs vizinhas e a SINR de todos os canais. O processo de *handover* pode ser iniciado de acordo com diversos critérios. As condições abaixo são avaliadas nesse trabalho:

- 1) Há uma ERB com potência P_h dB maior que a potência da ERB servidora, onde P_h é um valor de histerese para execução do *handover*;
- 2) Há uma ERB com potência P_h dB maior que a potência da ERB servidora e SINR maior que um dado limiar $SINR_{min}$.

Como o *handover* é um processo de alta prioridade, geralmente canais de guarda são alocados exclusivamente para esse fim. Considerou-se que canais estão sempre disponíveis em todas as ERBs para a realização de *handover* e que, portanto, não há queda de chamada por bloqueio. Uma chamada é desconectada quando ao menos um dos critérios a seguir é verificado por um período superior a 5 segundos:

- A potência recebida no móvel é menor que a sensibilidade do receptor;
- A SINR do canal em uso é menor que $SINR_{min}$.

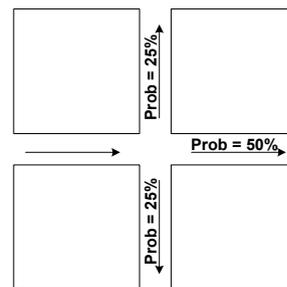


Fig. 3. Probabilidades de mudança de direção do móvel a cada cruzamento.

IV. RESULTADOS

Nesta seção, apresenta-se uma análise da cobertura microcelular (subseção IV-A) seguida de duas avaliações de desempenho, medido em termos de taxa de queda de chamadas e número médio de *handovers* por chamada, em cenários limitados por cobertura e por interferência (subseções IV-B e C, respectivamente).

A. Cobertura microcelular

Inicialmente, verificou-se a cobertura de apenas uma estação rádio-base no ambiente microcelular descrito na seção III. A Figura 4-a ilustra o decaimento do nível do sinal recebido, desconsiderando-se o efeito do desvanecimento, conforme a distância do móvel aumenta em relação à ERB servidora. As Figuras 4-b e 4-c evidenciam as regiões devidamente cobertas por uma dada ERB (i.e., as regiões em que o nível do sinal recebido é maior que a sensibilidade do receptor) respectivamente sem e com o efeito do desvanecimento de larga escala.

B. Cenário limitado por ruído

O cenário em questão objetiva analisar apenas a influência do ruído sobre o sinal transmitido, assumindo-se uma baixa densidade de usuários no sistema e, portanto, níveis desprezíveis de interferência. Nesse caso, uma chamada é desconectada simplesmente quando o nível da potência recebida é menor que a sensibilidade do receptor.

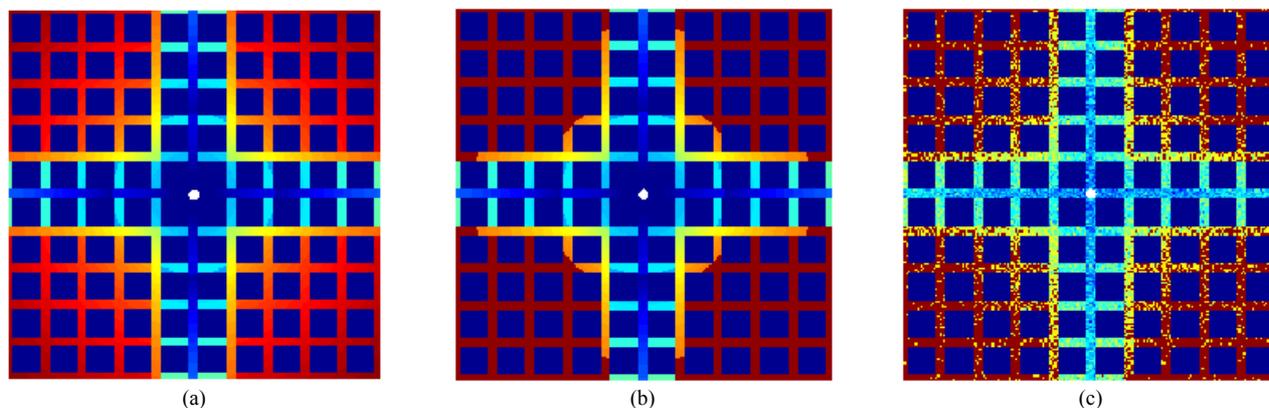


Fig. 4. (a) Decaimento do nível do sinal de uma ERB; (b) Região de cobertura de uma célula desconsiderando-se o efeito do sombreamento; (c) Área de cobertura da célula considerando-se o sombreamento. (cores mais frias representam maior potência recebida)

O planejamento celular visa minimizar o número de ERBs necessárias para garantir uma cobertura adequada, diminuindo os custos da rede, enquanto mantém um nível aceitável de taxa de queda de chamadas. A Figura 5 compara o percentual da área coberta (área de serviço descrita na seção III) utilizando três diferentes configurações de disposição de ERBs (21, 36 e 78 ERBs) com diferentes valores de potência isotrópica efetivamente radiada (EIRP igual a 25 dBm, 35 dBm e 38 dBm). A taxa de queda de chamadas para as mesmas configurações é analisada na Figura 6.

De acordo com as Figuras 5 e 6, a escolha de 21 ERBs não é adequada, pois embora minimize o número de ERBs, não possibilita simultaneamente uma cobertura satisfatória e uma taxa de queda de chamadas aceitável. A configuração de 78 ERBs também não é apropriada, uma vez que seu desempenho é semelhante ao da opção de 36 ERBs para EIRPs de 33 dBm e 38 dBm, porém utilizando um maior número de estações rádio-base. Dessa forma, conclui-se que a configuração de 36 ERBs com EIRP de 33 dBm é a melhor opção por apresentar uma boa relação entre taxa de desconexão e percentual de área coberta, sem incorrer em um número demasiado de ERBs nem na utilização de uma potência de transmissão muito elevada.

C. Cenário limitado por interferência

Os sistemas microcelulares são comumente instalados em áreas urbanas densas, onde a interferência co-canal é normalmente um fator limitante. O reuso de frequências é uma forma de diminuir essa interferência ao custo de um menor número de canais disponíveis por célula, o que pode limitar a capacidade do sistema por bloqueio. Outra forma de lidar com a interferência co-canal é o controle de admissão em reusos mais agressivos, tais como o reuso unitário. Em ambos os casos, para assegurar a manutenção de uma chamada, o canal deve manter uma boa qualidade de enlace, além de possuir um nível de sinal acima da sensibilidade do receptor. Adicionalmente, um bom desempenho sistêmico requer que o número de *handovers* por chamada seja o menor possível a fim de reduzir o *overhead* provocado por esse procedimento.

A influência da histerese no critério de iniciação de *handover* sobre o desempenho do sistema é analisada na Figura 7. Avaliou-se o critério baseado no nível de potência recebido que considera também o nível de SINR (critério 2 da seção III-B). O valor ótimo de histerese é aquele que mantém uma baixa probabilidade de queda de chamada com o menor número de *handovers* possível. As Figuras 7-a e 7-b mostram respectivamente como varia o percentual de queda de chamadas e o número médio de *handovers* por chamada. Conclui-se dos gráficos que a histerese de 5 dB é satisfatória, uma vez que a taxa de queda de chamadas é mantida num patamar baixo (~1%) e o número médio de *handovers* por chamada também é satisfatório (~2). Há ainda a possibilidade de se reduzir ainda mais esse valor através da utilização de algoritmos simples que, baseando-se no nível de qualidade de

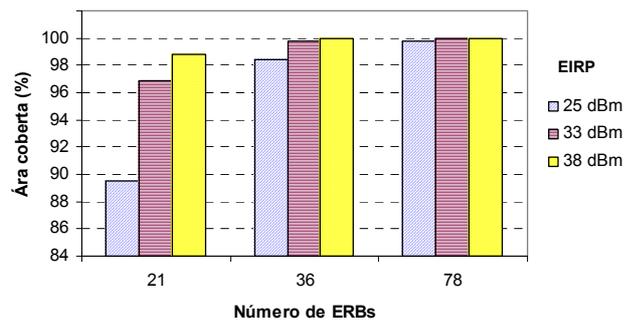


Fig. 5. Análise de cobertura para diversas configurações de ERBs.

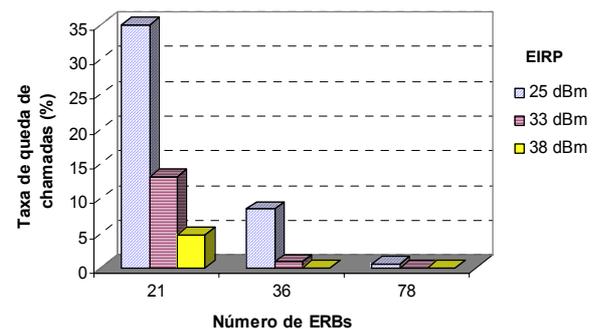
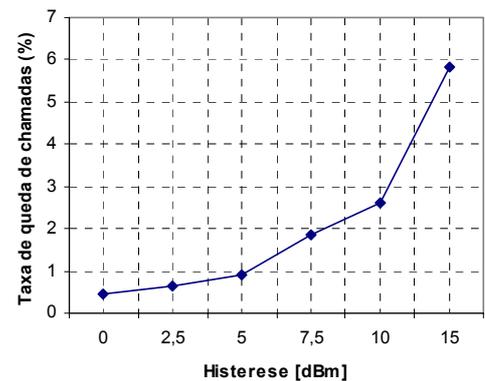
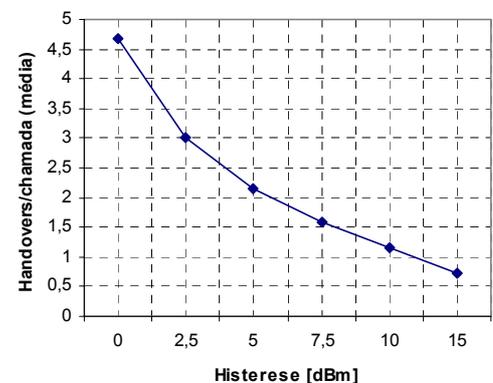


Fig. 6. Taxa de queda de chamadas para diversas configurações de ERBs.



(a)



(b)

Fig. 7. Taxa de queda de chamadas (a) e número médio de *handovers* por chamada (b) para uma histerese de 0 a 15 dB.

serviço requerida pelo usuário, evitam *handovers* desnecessários [8]. Tais estratégias, entretanto, não foram avaliadas nesse trabalho.

Outros parâmetros a serem analisados no planejamento de um sistema microcelular são o padrão de reuso e o critério de decisão de *handover*. Nos cenários discutidos a seguir, comparou-se os critérios 1 e 2 de iniciação de *handover* da seção III-B, ambos baseados no nível do sinal recebido. O critério 2 diferencia-se por avaliar também a qualidade do enlace em termos de SINR na escolha da ERB. Desconsiderou-se a histerese para execução de *handover* em ambos os casos. Além disso, conforme mencionado na seção III, aplicou-se um fator de atividade específico para cada padrão de reuso a fim de normalizar a carga oferecida em função da banda disponível no sistema.

A Figura 8 compara os dois critérios de *handover* para diferentes padrões de reuso de frequência. Em todos os cenários, a utilização do critério 1 resultou em desempenho inferior ao critério 2, tendo atingido níveis inaceitáveis de taxa de queda de chamadas para os casos com reusos 1 e 3. Isso é uma consequência de o critério 1 levar em consideração apenas o nível de potência recebida na decisão de *handover* e de os níveis de interferência em reusos mais apertados apresentarem maior variância. Ocasionalmente, embora o nível do sinal da ERB escolhida para *handover* seja melhor que o da ERB servidora, a qualidade do enlace não atinge o mínimo para manutenção da conexão. Nesses casos, o critério 2 obtém um desempenho substancialmente melhor ao considerar também a SINR na tomada de decisão. O cenário com reuso 4 e critério 2 apresentou o melhor resultado, satisfazendo a condição de taxa de queda de chamadas com um valor de aproximadamente 0,4%.

V. CONCLUSÃO

O uso de microcélulas é uma maneira eficiente de aumentar a capacidade dos sistemas celulares, apesar de tornar a gerência de recursos de rádio mais complexa. Numa rede microcelular, por exemplo, o maior número de estações rádio-base em relação a um sistema correspondente macrocelular provoca um aumento no número médio de *handovers* por chamada. As características desse ambiente de propagação também são tais que mesmo um percentual de cobertura elevado pode resultar em taxas de desconexão inaceitáveis devido, principalmente, ao chamado “efeito esquina”. As duas métricas ora expostas são importantes na avaliação de desempenho sistêmico.

Neste trabalho, descreve-se uma ferramenta de simulação e metodologia de análise de desempenho que permite avaliar a cobertura de um sistema microcelular assim como o seu desempenho em cenários limitados por cobertura e por interferência. Verificou-se também o impacto de parâmetros como potência de transmissão, número de ERBs, reuso de frequências e diversos critérios de iniciação de *handover*. Finalmente, evidenciou-se que, em sistemas limitados por

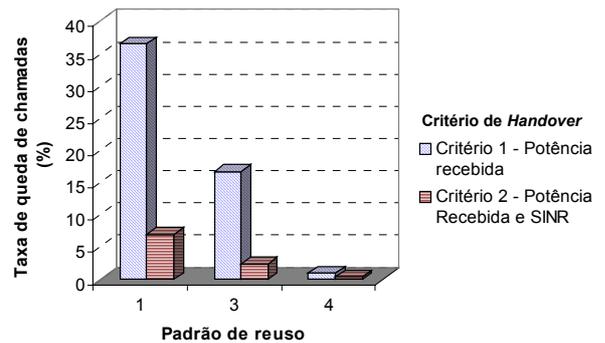


Fig. 8. Taxa de queda de chamadas em função do padrão de reuso e dos critérios de iniciação de *handover*.

interferência, o tradicional critério de *handover* baseado somente no nível de sinal recebido é muito ineficiente. Uma solução baseada num critério adicional de qualidade do enlace mostrou-se mais adequada.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Beck e H. Panzer, “Strategies for handover and dynamic channel allocation in micro-cellular mobile radio systems”, Anais do 39º IEEE VTC, pp. 178-185, 1989.
- [2] Dongsoo Har, Howard H. Xia e Henry L. Bertoni, “Path-Loss Prediction Model for Microcells”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, pp. 1453-1462, Setembro, 1999.
- [3] Michel Mouly e Marie-Bernadette Pautet, *The GSM System for Mobile Communications*, Telecom Publishing, Junho, 1992.
- [4] Paulo Cardieri, *Resource Allocation and Adaptive Antennas in Cellular Communications*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Tese de Ph.D., Setembro, 2000.
- [5] ETSI, “Universal Mobile Telecommunications System - UMTS, Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS”, ETSI UMTS 30.03 V3.2.0, pp. 31-66, Abril, 1998.
- [6] 3GPP, “Radio transmission and reception”, ETSI TS 145 005 V5.6.0 Release 5, Novembro, 2002.
- [7] Nishith D. Tripathi, Jeffrey H. Reed e Hugh F. VanLandingham, “Handoff in Cellular Systems”, IEEE Personal Communications, pp. 26-37, Dezembro, 1998.
- [8] Gordon L. Stüber, *Principles of Mobile Communication*, Kluwer Academic Publishers, 2a. ed, Fevereiro, 2001.