



Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Departamento de Comunicações

Padrão de Reuso Microcelular

Autor: Paula Renata Cerdeira Gomez de Aguiar

Orientador: Michel Daoud Yacoub

Tese de Doutorado submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Banca examinadora:

Michel Daoud Yacoub – FEEC/UNICAMP-Presidente

Paul Jean Etienne Jeszensky – EPUSP

Ailton Akira Shinoda – UEL

João Marcos Travassos Romano – DECOM/FEEC/UNICAMP

Dalton Soares Arantes – DECOM/FEEC/UNICAMP

Yuzo Iano – DECOM/FEEC/UNICAMP

Campinas, Novembro de 2001.

Resumo

A expansão e a evolução das redes sem fio devem ser apoiadas por uma vasta estrutura microcelular, tanto para satisfazer as altas demandas de tráfego em regiões densamente urbanas, como para prover serviços de baixa mobilidade. O conceito de redes microcelulares é bastante diferente daquele de redes macrocelulares, empregados em larga escala em sistemas celulares analógicos e digitais. Nestes não se aplica mais a pressuposta simetria de propagação das redes macrocelulares e, portanto, os padrões de reuso hexagonais também não fazem mais sentido. A estrutura “microscópica” do ambiente microcelular constitui um elemento decisivo no desempenho do sistema. Como uma rede microcelular terá que fazer uso de um número muito maior de estações rádio base para cobrir uma mesma área de serviço, e terá de processar um número maior de *handoffs*, é necessário realizar um estudo cuidadoso do desempenho deste tipo de sistemas. O objetivo deste trabalho de tese é propor novos padrões de reuso para sistemas microcelulares e investigar o desempenho de sistemas que fazem uso de tais padrões. Este desempenho é analisado através da relação portadora/interferência inicialmente para a situação de pior caso e, em seguida, para situações mais realistas, que consideram os móveis distribuídos aleatoriamente dentro da microcélula e a atividade do canal de acordo com uma dada intensidade de tráfego.

Abstract

The expansion and the evolution of wireless networks can only be supported by an ample microcellular structure, not only to satisfy the high traffic demand in dense urban regions but also to provide for services requiring low mobility. The microcellular network concept is rather different from that of the macrocellular one, widely employed in wireless systems. In microcellular systems, with low power sites and antennas mounted at the street level (below the roof tops), the supposed propagation symmetry of the macrocellular network no longer applies and the hexagonal cell pattern does not make sense. The "microscopic" structure of the environment constitutes a decisive element influencing the system performance. Because the microcellular network makes use of an exceedingly greater number of base stations to cover the same area and will have to process a greater number of handoffs, a careful performance analysis of this kind of system is made necessary. This thesis proposes new reuse patterns for microcellular systems and makes a study of their performance. This performance is analyzed through the carrier-to-interference ratio initially for the worst-case condition, and then for a more realistic condition, which considers mobiles randomly positioned within their microcell and the channel occupancy depending on the traffic intensity.

*No me mueve mi Dios para quererte
El cielo que me tienes prometido,
Ni me mueve el infierno tan temido
Para dejar por eso de ofenderte.*

*Tú me mueves, Señor; muéveme el verte
Calvado en una Cruz y escarnecido;
Muéveme el ver tu cuerpo tan herido;
Muévenme tus afrentas y tu muerte.*

*Muéveme en fin tu amor, de tal manera,
Que aunque no hubiera cielo, yo te amara
Y aunque no hubiera infierno, te temiera.*

*No me tienes que dar porque te queira,
Porque, aunque lo que espero no esperara,
Lo mismo que te quiero, te quisiera.*

Soneto espanhol do século XVI, do poeta místico San Juan de La Cruz

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao Prof. Michel Daoud Yacoub pela sua orientação neste trabalho, e pelos seus ensinamentos técnicos, profissionais e de vida.

À minha família: meus pais, Fernando Cerdeira e Hilda Alicia Gómez, e minhas irmãs, Adriana Laura Cerdeira e Marcia Eugenia Cerdeira. E a todos os amigos e familiares que me apoiaram e me ajudaram durante meus anos na pós-graduação da Unicamp.

Aos Professores Paul Jean Etienne Jeszensky, Ailton Akira Shinoda, Dalton Soares Arantes, João Marcos Travassos Romano e Yuzo Iano por aceitarem fazer parte da Comissão Julgadora deste trabalho de tese.

À Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, pela oportunidade e ambiente de pesquisa proporcionados.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Dedicatória

Para meu marido, Ayrton Carvalho de Aguiar

“If at first the idea is not absurd,
then there is no hope for it”
Albert Einstein

Índice

<i>Capítulo 1. Introdução</i>	<i>pg 1</i>
1.1 <i>Macro células e Micro células</i>	<i>pg 4</i>
1.2 <i>Objetivo do Trabalho</i>	<i>pg 7</i>
1.3 <i>Estrutura do Trabalho</i>	<i>pg 7</i>
1.4 <i>Contribuições do Trabalho</i>	<i>pg 8</i>
1.5 <i>Conclusão</i>	<i>pg 9</i>
<i>Capítulo 2. Padrões de Reuso Microcelular</i>	<i>pg 11</i>
2.1 <i>Introdução</i>	<i>pg 11</i>
2.2 <i>Formato de Células em Ambientes Microcelulares</i>	<i>pg 12</i>
2.3 <i>Padrão de Reuso Microcelular</i>	<i>pg 14</i>
2.4 <i>Propagação</i>	<i>pg 21</i>
2.4.1 <i>Sistemas Macrocelulares Convencionais</i>	<i>pg 21</i>
2.4.2 <i>Sistemas Microcelulares</i>	<i>pg 23</i>
2.5 <i>Sistema sob Análise</i>	<i>pg 28</i>
2.6 <i>Conclusão</i>	<i>pg 32</i>
<i>Capítulo 3. Limite Inferior de Desempenho</i>	<i>pg 35</i>
3.1 <i>Introdução</i>	<i>pg 35</i>
3.2 <i>Razão Portadora/Interferência</i>	<i>pg 36</i>
3.3 <i>Posicionamento dos Interferentes</i>	<i>pg 47</i>
3.4 <i>Um exemplo de Aplicação</i>	<i>pg 51</i>
3.5 <i>Resultados Considerando uma Única Camada de Interferentes</i>	<i>pg 55</i>
3.6 <i>Conclusão</i>	<i>pg 61</i>
<i>Capítulo 4. Linítante Superior de Desempenho</i>	<i>pg 65</i>
4.1 <i>Introdução</i>	<i>pg 65</i>
4.2 <i>Caso 1: Móveis Interferentes Posicionados Aleatoriamente</i>	<i>pg 66</i>
4.3 <i>Caso 2: Atividade de Canal</i>	<i>pg 76</i>
4.4 <i>Caso 3: Atividade de Canal e Móveis Posicionados Aleatoriamente</i>	<i>pg 83</i>
4.5 <i>Conclusão</i>	<i>pg 92</i>
<i>Apêndice 3A</i>	<i>pg 94</i>
<i>Apêndice 3B</i>	<i>pg 96</i>
<i>Capítulo 5. Conclusões</i>	<i>pg 101</i>
5.1 <i>Conclusões</i>	<i>pg 101</i>
5.2 <i>Trabalhos Futuros</i>	<i>pg 107</i>
5.2.1 <i>Propagação Obstruída</i>	<i>pg 107</i>
5.2.2 <i>Outage Probability</i>	<i>pg 108</i>
5.2.3 <i>Hierarquia Celular</i>	<i>pg 108</i>
<i>Capítulo 6. Bibliografia</i>	<i>pg 109</i>

Índice de Figuras

Figura 1.1	Exemplo de layout microcelular	pg 6
Figura 2.1	Contornos de AML constantes de medidas em Manhattan [GOLDS93]	pg 13
Figura 2.2	Geometria de Células Quadradas	pg 17
Figura 2.3	Geometria de Células Hexagonais	pg 17
Figura 2.4	Possíveis padrões microcelulares (N= 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10 e 13 microcelulas por cluster)	pg 20
Figura 2.5	Possíveis padrões macrocelulares (N= 1, 3, 4, 7 e 12 macrocelulas por cluster)	pg 20
Figura 2.6	Tesselagem parcial para reuso de (a) 5 e; (b) 13 células por cluster	pg 21
Figura 2.7	Tesselagem de padrão de reuso macrocelular – fator de reuso de 7	pg 22
Figura 2.8	Perda de percurso para propagação com linha de visada	pg 26
Figura 2.9	Perda de percurso para propagação com linha de visada (LOS) comparada à propagação obstruída (NLOS)	pg 27
Figura 2.10	Microcélulas com antenas alinhadas ao longo da rua	pg 29
Figura 2.11	Disposição de células quadradas com relação às ruas em uma área urbana	pg 30
Figura 2.12	Tesselagem microcelular para clusters com: (a) 5 células; (b) 8 células; (c) 9 células; (d) 10 células; (e) 13 células	pg 31
Figura 3.1	Tesselagem de clusters de 5 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 4: "Não-Colineares Primos"	pg 37
Figura 3.2	Tesselagem de clusters de 8 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 1: "Colineares – $i = j$ "	pg 38
Figura 3.3	Tesselagem de clusters de 9 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 1: "Colineares– $\sqrt{N} \in Z$ "	pg 39
Figura 3.4	Tesselagem de clusters de 10 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo2: "Não-Colineares Pares"	pg 40
Figura 3.5	Tesselagem de clusters de 13 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 4: "Não-Colineares Primos"	pg 41
Figura 3.6	Tesselagem de clusters de 45 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 3: "Não-Colineares Ímpares"	pg 42
Figura 3.7	Três Regiões com Diferentes Condições de Interferência para o Downlink	pg 45
Figura 3.8	Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13	pg 54
Figura 3.9	Razão Portadora/Interferência do enlace direto em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13	pg 54

<i>Figura 3.10</i>	<i>Comparação da razão Portadora/Interferência de um sistema microcelular entre os enlaces reverso e direto dos padrões de reuso 5 e 10</i>	<i>pg 55</i>
<i>Figura 3.11</i>	<i>Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 5</i>	<i>pg 59</i>
<i>Figura 3.12</i>	<i>Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 8</i>	<i>pg 59</i>
<i>Figura 3.13</i>	<i>Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 9</i>	<i>pg 60</i>
<i>Figura 3.14</i>	<i>Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 10</i>	<i>pg 60</i>
<i>Figura 3.15</i>	<i>Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 13</i>	<i>pg 61</i>
<i>Figura 4.1</i>	<i>Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13</i>	<i>pg 72</i>
<i>Figura 4.2</i>	<i>Razão Portadora/Interferência do enlace direto em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13</i>	<i>pg 72</i>
<i>Figura 4.3</i>	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5 e 10</i>	<i>pg 73</i>
<i>Figura 4.4</i>	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 5 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes</i>	<i>pg 73</i>
<i>Figura 4.5</i>	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 8 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes</i>	<i>pg 74</i>
<i>Figura 4.6</i>	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 9 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes</i>	<i>pg 74</i>
<i>Figura 4.7</i>	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 10 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes</i>	<i>pg 75</i>
<i>Figura 4.8</i>	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 13 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes</i>	<i>pg 75</i>
<i>Figura 4.9</i>	<i>Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13</i>	<i>pg 79</i>

Figura 4.10	<i>Razão Portadora/Interferência do enlace direto em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13</i>	<i>pg 79</i>
Figura 4.11	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada os padrões de reuso 5 e 10</i>	<i>pg 80</i>
Figura 4.12	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 5 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal</i>	<i>pg 80</i>
Figura 4.13	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 8 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal</i>	<i>pg 81</i>
Figura 4.14	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 9 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal</i>	<i>pg81</i>
Figura 4.15	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 10 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal</i>	<i>pg 82</i>
Figura 4.16	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 13 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal</i>	<i>pg 82</i>
Figura 4.17	<i>Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para sistemas com 5 células por cluster, atribuindo caráter aleatório para a primeira camada de interferentes, e para as 6 primeiras camadas de interferentes</i>	<i>pg 86</i>
Figura 4.18	<i>Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para sistemas com 8 células por cluster, atribuindo caráter aleatório para a primeira camada de interferentes, e para as 6 primeiras camadas de interferentes</i>	<i>pg 86</i>
Figura 4.19	<i>Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13</i>	<i>pg 87</i>
Figura 4.20	<i>Razão Portadora/Interferência do enlaces direto em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13</i>	<i>pg 87</i>
Figura 4.21	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5 e 10</i>	<i>pg 88</i>
Figura 4.22	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 5 células: comparação entre o pior e o melhor caso</i>	<i>pg 88</i>
Figura 4.23	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 8 células: comparação entre o pior e o melhor caso</i>	<i>pg 90</i>
Figura 4.24	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 9 células: comparação entre o pior e o melhor caso</i>	<i>pg 90</i>

<i>Figura 4.25</i>	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 10 células: comparação entre o pior e o melhor caso</i>	<i>pg 91</i>
<i>Figura 4.26</i>	<i>Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 13 células: comparação entre o pior e o melhor caso</i>	<i>pg 91</i>
<i>Figura 4B.1</i>	<i>Diferença da relação C/I calculada para distintas condições em função da distância para o enlace direto e clusters de 5 microcélulas</i>	<i>pg 99</i>
<i>Figura 4B.2</i>	<i>Diferença da relação C/I calculada para distintas condições em função da distância para o enlace reverso e clusters de 5 microcélulas</i>	<i>pg 99</i>
<i>Figura 4B.3</i>	<i>Figura A3B.3 – Diferença da relação C/I calculada para distintas condições em função da distância para o enlace direto e clusters de 10 microcélulas</i>	<i>pg 100</i>
<i>Figura 4B.4</i>	<i>Diferença da relação C/I calculada para distintas condições em função da distância para o enlace reverso e clusters de 10 microcélulas</i>	<i>pg 100</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1.1</i>	<i>Hierarquia Celular</i>	<i>pg 3</i>
<i>Tabela 3.1</i>	<i>Parâmetros utilizados para o cálculo de desempenho do sistema microcelular na Banda Celular</i>	<i>pg 52</i>
<i>Tabela 3.2</i>	<i>Distâncias da primeira camada de interferentes ao centro da célula alvo para os diferentes padrões de reuso</i>	<i>pg 57</i>
<i>Tabela 3.3</i>	<i>Média dos Erros entre o método exato e aproximado do cálculo de C/I</i>	<i>pg 58</i>
<i>Tabela 4.1</i>	<i>Valores de p_{LOS} para as distintas tesselas</i>	<i>pg 69</i>
<i>Tabela 4B.1</i>	<i>Valores da diferença da relação C/I calculada para distintos números de camadas de interferentes no grupo de camadas internas, para o móvel alvo localizado a uma distância normalizada da ERB igual a 0,5 (50m)</i>	<i>pg 98</i>

Capítulo 1

Introdução

O espectro eletromagnético é um meio escasso mas renovável que, se gerenciado adequadamente, pode ser reutilizado para expandir a capacidade de uma rede sem fio. À eficiência deste gerenciamento se denomina *eficiência espectral*. Quanto maior a eficiência espectral, maior é a capacidade do sistema em relação ao seu espectro eletromagnético. O *reuso de frequências*, na verdade, constitui a idéia básica por trás do conceito celular. A frequência de reuso refere-se ao uso de canais de rádio na mesma frequência portadora para cobrir diferentes áreas separadas umas das outras por distâncias suficientemente grandes para que a *interferência co-canal*, ou interferência entre canais de mesma frequência portadora, não seja problema para o funcionamento do sistema [MCDON79]. Assim, ao invés de cobrir uma área inteira com uma antena transmissora de alta potência e grande

altura, o provedor de serviço pode distribuir os transmissores de baixa potência nesta área de cobertura. O sinal transmitido pelas antenas de cada *estação rádio base*, então, cobre, primordialmente, uma sub-área ao seu redor denominada *célula*. Portanto, uma célula é a área na qual uma determinada estação rádio base tem maior probabilidade de atender uma chamada. Maior probabilidade, pois sempre existe uma área de sobreposição entre células. A cada célula é alocada convenientemente uma parte do espectro disponível. O grupo de células dentre as quais todo o espectro eletromagnético disponível para o serviço é compartilhado (ou todos os canais) constitui um *cluster*. O mesmo grupo de canais só pode ser reutilizado em outro *cluster*. O número de células por *cluster* define o *padrão de reuso*. O padrão de reuso depende da geometria das células utilizadas. Um padrão de reuso não pode ter qualquer valor, pois, devido a restrições geométricas, somente um grupo de padrões pode ser *tesselado*. A tesselação consiste em cobrir a área de interesse com *clusters* sem sobrepô-los ou deixar lacunas. Quanto menor for o padrão de reuso, maior será o número de canais por célula e, portanto, maior a capacidade do sistema (maior a eficiência espectral). No entanto, quanto menor o padrão de reuso, menor é a distância entre co-células, levando a uma maior interferência co-canal.

Se um móvel com uma comunicação já estabelecida estiver se deslocando no limite de sua célula em direção a uma célula vizinha, este deve ser provido de recursos suficientes para que a sua comunicação não seja interrompida. A comunicação deve ser transferida de estação rádio base sem a intervenção do usuário. A esse processo se denomina *handoff* ou *handover* [YACOU93]. O processo de se determinar a disponibilidade do móvel em receber uma chamada é denominado *paging*.

Se antenas transmissoras omnidirecionais forem posicionadas acima dos obstáculos mais altos de sua região de cobertura, teremos, como situação ideal, uma área de cobertura circular [YACOU93]. Portanto, como é necessário estabelecer-se um formato para as células para possibilitar o modelamento de sistemas celulares, o formato circular seria o ideal. No entanto, círculos não podem preencher um plano sem deixar áreas descobertas ou apresentar áreas sobrepostas, isto é, círculos não *tesselam*, dificultando o planejamento celular. Polígonos regulares como triângulos equiláteros, quadrados e hexágonos regulares

não apresentam este tipo de restrição. Para o caso descrito, que constitui o caso convencional utilizado em sistemas celulares, o hexágono regular é o formato mais conveniente pois é o que mais se assemelha ao círculo. Porém, para distintas aplicações, como por exemplo distintas disposições de antenas, outro formato para as células pode ser mais apropriado para modelar o sistema.

O tamanho das células varia de acordo com o planejamento da rede celular, feito para atingir uma certa demanda de tráfego e de serviços. Para otimizar a eficiência espectral e manter o número de *handoffs* o mais baixo possível, criam-se sistemas com células de diferentes tamanhos e formatos. Criam-se, então, camadas de células, sendo cada camada constituída de células do mesmo tipo, formando uma hierarquia celular. A hierarquia celular faz uso de quatro categorias de células: megacélulas, macrocélulas, microcélulas, e picocélulas [ITU-R M.1035]. As principais características das células pertencentes a essas categorias encontram-se na Tabela 1.1.

Mega células providenciam cobertura a grandes áreas. São úteis particularmente para áreas remotas com pequenas densidades de tráfego ou para área sem acesso a redes de telecomunicações terrestres. Mega células são servidas por satélite de baixa órbita e o raio da célula é uma função da altitude do satélite, da potência e da abertura da antena. Por causa dos seus tamanhos, estas células devem ser flexíveis e robustas para acomodar uma grande gama de cenários de usuários.

Categoria de Células	Tamanho (raio)	Densidade de Tráfego	Velocidade Máxima do móvel
Picocélulas	até 50m	média e alta	10km/h
Microcélulas	até 1km	média e alta	100km/h
Macrocélulas	até 35km	baixa e média	500km/h
Megacélulas	100-500km	baixa	Baixa e alta mobilidade

Tabela 1.1 – Hierarquia Celular

Macro células providenciam cobertura a grandes áreas. Raios de células maiores podem ser providenciados com a utilização de antenas direcionais. As macrocélulas são células *outdoor*, ou seja, células que funcionam ao ar livre, que são iluminadas por estações base com antenas montadas acima do nível dos prédios, em torres ou no topo dos edifícios.

Micro células providenciam cobertura a pequenas áreas. São células *outdoor* que são iluminadas por estações rádio base com antenas montadas abaixo dos níveis dos prédios – em postes de luz ou nas paredes dos edifícios.

Pico células são células *indoor* que providenciam cobertura para pequenas áreas.

Na verdade, mega células, macro células, micro células e pico células co-existem no mesmo ambiente e são dispostas em hierarquia, de modo a formar a chamada Estrutura Hierárquica Celular (HCS). Em sistemas HCS os serviços multimídia - em qualquer lugar a qualquer hora – são providos para baixas e altas mobilidades e para coberturas *indoor* até de satélite. Em sistemas HCS vários níveis de células podem co-existir, com as células menores ocupando a menor camada na hierarquia. A mobilidade e a classe de serviço do usuário determinam a camada dentro da qual o serviço pedido deve ser provido [YACOU2001-B].

1.1 Macrocélulas e Microcélulas

A expansão e a evolução das redes sem fio devem ser apoiadas por uma vasta estrutura microcelular, tanto para satisfazer as altas demandas de tráfego em regiões densamente urbanas, como para prover serviços de baixa mobilidade. O conceito de redes microcelulares é bastante diferente daquele de redes macrocelulares, empregados em larga escala em sistemas celulares analógicos e digitais. Em particular, as redes macrocelulares fazem uso de um mosaico de células hexagonais com padrões de reuso estabelecidos de acordo com a suposição que as distâncias de reuso são isotrópicas e que um *cluster* é constituído de um conjunto contíguo de células. Em teoria, as altas potências utilizadas em conjunto ao posicionamento das antenas das estações rádio base bem acima do topo dos

edifícios provêm uma propagação simétrica, e, para tal caso, a cobertura utilizando-se células de formato hexagonal provou ser apropriada para o propósito de planejamento de sistemas.

Já os sistemas microcelulares utilizam-se de baixas potências de transmissão e de antenas das estações rádio base montadas abaixo do nível dos prédios, por exemplo, em postes de luz ou semáforos [STEEL89]. Posicionando as antenas desta forma, as características de propagação são largamente determinadas pelo formato das ruas. Portanto, neste caso já não se aplica mais a pressuposta simetria de propagação das redes macrocelulares e os padrões de reuso hexagonais também não fazem mais sentido. A estrutura “microscópica” do ambiente microcelular (por exemplo, a orientação das ruas, a largura das ruas, o *layout* dos edifícios) constitui um elemento decisivo no desempenho do sistema. Segundo [STEEL89] o tipo de antena sendo utilizado tem uma influência marginal nas dimensões de uma microcélula urbana.

A cobertura ubíqua de uma área de serviço baseada em uma rede microcelular terá que fazer uso de um número de estações rádio base muito maior que aquele utilizado por uma rede macrocelular. Os maiores requisitos de capacidade de processamento e o grande aumento no número de *handoffs* efetuados (devido ao pequeno tamanho das células) chama a atenção para os custos de tal tipo de projeto. Portanto, dentre os fatores importantes a serem levados em conta no planejamento de um sistema microcelular, o custo por assinante é determinante. Este custo, por sua vez, é intimamente relacionado com a eficiência com a qual os recursos de rádio são re-utilizados em uma dada área de serviço. A eficiência de reuso depende do ambiente interferente da rede e da habilidade da tecnologia envolvida em lidar com as fontes interferentes.

Os estudos de interferência em sistemas macrocelulares é muito facilitado pela simetria do problema. No caso microcelular, a assimetria inerente ao problema implica em um fator complicador adicional. Neste caso, a interferência depende tanto da distância entre o transmissor e o receptor quanto, e principalmente, da condição de visibilidade (LOS – *Line-of-Sight*) do caminho de rádio. Por exemplo, considere um sistema com suas estações rádio

base posicionados nas interseções das ruas, como mostra a Figura 1.1. Usuários móveis deslocando-se nas ruas radiais a estas estações rádio base podem encontrar um padrão de interferência que varia ao longo da rua, à medida que partem da vizinhança de suas estações rádio base servidoras, onde o sinal desejado é forte e os sinais interferentes relevantes estão obstruídos por edifícios (NLOS - *non-Line-of-Sight*) e se aproximam de novas interseções, nas quais podem ter condição de visibilidade não só para sua estação rádio base servidora, mas também para estações rádio base interferentes. Portanto, a situação de interferência seguirá um padrão completamente distinto em ruas perpendiculares. Novamente, a assimetria do problema é agravada pela distribuição de tráfego, que tem maior probabilidade de ter configurações não uniformes, com as ruas e avenidas principais tendo mais usuários móveis do que as ruas secundárias.

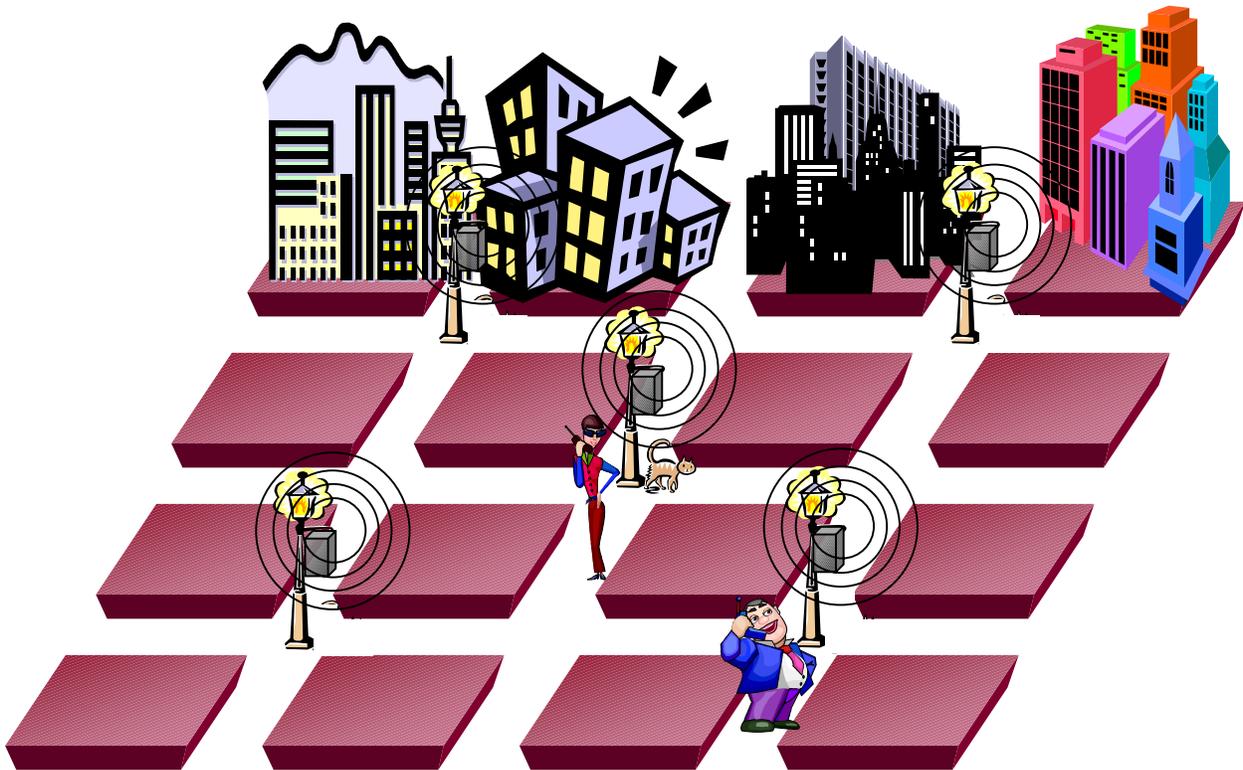


Figura 1.1 – Exemplo de layout microcelular

Para sistemas operando na faixa de 900MHz, esquemas de múltiplo acesso ortogonais (ex.: divisão por tempo), e um conjunto típico de parâmetros, estimamos que a eficiência de reuso em redes microcelulares urbanas pode ser até 50% mais eficiente que em redes celulares convencionais com antenas tri-setorizadas.

Além de proverem uma capacidade de tráfego maior que a de sistemas macrocelulares, os sistemas microcelulares trazem outros benefícios como o demonstrado por Green e Hata [GREEN91]. Conduzindo um experimento com uma microcélula suburbana sobreposta a uma macrocélula, operando a 900MHz, eles demonstraram que a microcélula operava com uma BER (*bit error rate* ou taxa de erro de bit) menor que a macrocélula quando o nível de sinal de ambas as estações rádio base estava acima de um determinado limiar de operação.

1.2 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho de tese é propor novos padrões de reuso para sistemas microcelulares e investigar o desempenho de sistemas que fazem uso de tais padrões. O desempenho dos sistemas microcelulares será analisado através da relação portadora/interferência (C/I - *carrier-to-interference ratio*) inicialmente para os móveis interferentes posicionados na situação de pior caso e com o sistema funcionando em plena carga e, em seguida, para situações mais realistas, com os móveis interferentes posicionados aleatoriamente e para uma dada atividade de canal.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho apresenta padrões de reuso apropriados para ambientes microcelulares, e o estudo do desempenho de sistemas que fazem uso desses padrões, baseado na análise da relação portadora/interferência média.

No Capítulo 2, “Padrões de Reuso Microcelular”, faz-se um apanhado da literatura mostrando-se como se dá a propagação em sistemas microcelulares e qual seria o formato

geométrico ideal para se modelar células em tal tipo de sistemas. Desenvolve-se, também, a teoria de formação dos padrões de reuso celular, assim como a metodologia de suas tesselações. Finalmente, apresenta-se o sistema microcelular sob análise neste trabalho de tese.

Os Capítulos 3 e 4 apresentam a análise de desempenho do sistema proposto no Capítulo 2. No Capítulo 3, “Limite inferior de Desempenho”, desenvolvem-se fórmulas exatas para o cálculo da relação portadora/interferência. Mostra-se também como encontrar a distância de uma determinada microcélula a qualquer um de seus interferentes para todos os possíveis padrões de reuso microcelulares. Apresentam-se resultados e faz-se uma análise de desempenho da situação de pior caso, na qual consideram-se infinitos interferentes posicionados de forma a gerarem a maior interferência possível e com seus canais sempre ativos. Finalmente, apresenta-se uma forma simplificada de cálculo de desempenho para tal situação.

No Capítulo 4, “Limite Superior de Desempenho”, analisa-se o desempenho do sistema para uma situação mais realista, na qual se consideram todos os móveis interferentes posicionados aleatoriamente dentro de suas microcélulas e atividade do canal de acordo com uma dada intensidade de tráfego.

O Capítulo 5 conclui o trabalho, fazendo uma análise geral de todos os resultados obtidos.

1.4 Contribuições do Trabalho

Este trabalho propõe novos padrões de reuso para sistemas microcelulares. Desenvolve uma metodologia de formação destes padrões de reuso e da tesselação destes para a formação das redes de comunicações móveis em centros urbanos.

Para a análise de desempenho destes sistemas, o trabalho desenvolve fórmulas exatas para o cálculo da relação portadora/interferência média tanto para a situação de pior caso, como

para situações considerando a distribuição de tráfego e a distribuição espacial dos interferentes em suas microcélulas.

O trabalho demonstra que os padrões de reuso microcelulares podem ser divididos em quatro grupos distintos, dentre os quais encontram-se características em comum como, por exemplo, uma regra comum de disposição das co-células interferentes. Esta característica é importante para a análise de desempenho, pois permite que se façam cálculos exatos, considerando-se quantas camadas de interferentes forem necessárias.

A tese propõe regras de cálculo para a atribuição de propriedades aleatórias aos sistemas para possibilitar que estes sejam feitos em tempo hábil com uma boa precisão.

Além disso, o trabalho encontra limitantes inferiores e superiores de desempenho de sistemas microcelulares, mostrando-se o resultado gráfico destes para casos de sistemas com padrões de reuso iguais a 5, 8, 9, 10 e 13.

Finalmente, demonstrou-se que para obter o mesmo desempenho de sistema, padrões de reuso microcelulares podem ser menores que os macrocelulares, obtendo-se assim uma maior eficiência espectral.

Este trabalho de tese gerou sete publicações. Uma publicação em revista internacional [YACOU99], três publicações em congressos internacionais, [YACOU98-A], [YACOU98-B] e [GOMEZ2000-A], duas em congressos nacionais [GOMEZ2000-B] e [GOMEZ99], e uma publicação de capítulo no livro “The Communications Handbook”, CRC and IEEE Press [YACOU2001-A].

1.5 Conclusão

Sistemas microcelulares serão muito utilizados em redes futuras. O conceito de redes microcelulares é bastante diferente daquele de redes macrocelulares, empregados em larga escala em sistemas celulares analógicos e digitais. Eles utilizam-se de baixas potências de

transmissão e de antenas das estações rádio base montadas abaixo do nível dos prédios. Posicionando as antenas desta forma, as características de propagação são largamente determinadas pela estrutura “microscópica” do ambiente. Portanto, já não se aplicam mais os modelos de redes macrocelulares. Novos modelos de propagação e novos padrões de reuso devem ser utilizados para este tipo de ambiente.

Neste trabalho, estudamos a forma de propagação neste ambiente através de medidas feitas por vários autores [MEDIDAS]. Propomos padrões de reuso aplicáveis e analisamos o desempenho de redes que fazem uso dos mesmos. Para tanto foram desenvolvidas fórmulas e metodologias específicas.

Capítulo 2

Padrões de Reuso Microcelular

2.1 Introdução

Neste capítulo mostraremos como se dá a propagação em sistemas microcelulares, e, com base nesta, chegaremos ao formato geométrico ideal para se modelar uma célula em tal tipo de sistemas. A partir deste formato desenvolvemos, em seguida, a teoria de formação dos padrões de reuso celular, assim como a metodologia de suas tesselas. Finalmente, apresentamos o sistema microcelular sob análise neste trabalho de tese.

2.2 Formato de Células em Ambientes Microcelulares

Em estações rádio base de sistemas celulares tradicionais, as antenas são montadas entre 30m e 100m [GOLDS93] para se comunicar com estações móveis a grandes distâncias. A natureza da propagação de rádio nesses ambientes celulares foi medida e caracterizada [RAPPA96], [YACOU93], [PARSO89], e modelos de propagação celular já foram incorporados a ferramentas de engenharia e são largamente utilizados.

No entanto, existe um grande contraste com relação aos sistemas microcelulares, nos quais pequenas estações base são montadas nos postes ou semáforos com antenas de altura inferior a 10m e distâncias de cobertura medidas em metros. A caracterização da propagação em microcélulas não é óbvia. Esta é bem diferente daquela de sistemas celulares tradicionais e pode ser dividida, como vimos anteriormente, em duas categorias: propagação em linha de visada (LOS), ou seja, quando o usuário está na mesma rua que a estação rádio base; e propagação obstruída (NLOS), ou seja, pertencente a caminhos que estão bloqueados por edifícios, que seria quando os usuários estão em ruas paralelas ou perpendiculares àquela da estação rádio base. Uma grande quantidade de dados foi coletada e reportada sobre os dois tipos de propagação [MEDIDAS].

Vale ressaltar aqui o trabalho realizado em [GOLDS93], o qual utiliza dados medidos de uma portadora de 900MHz ao longo de várias ruas de Manhattan (Nova Iorque), feitos anteriormente por [RUST89-A], [RUST89-B] e [RUST91]. Os autores afirmam que os resultados são válidos para cidades com planos de ruas retilíneos e para frequências próximas de 900MHz. Posteriormente, [ERCEG94] verificou que os mesmos resultados se aplicam para frequências mais altas, como 2GHz, próximos à faixa PCS (*Personal Communication Services*). O trabalho analisa a média espacial de curto prazo da atenuação da potência do sinal, mais especificamente a atenuação da média local (AML) e as pequenas flutuações ao redor desta média.

Os dados foram utilizados para criar contornos de AML constantes, o que levou a constatar que o contorno para qualquer valor especificado de AML tem essencialmente o formato de

um losango côncavo centralizado na estação base, como pode ser visto na Figura 2.1. O losango de formato quadrado que pode ser inscrito dentro de cada losango côncavo define a forma proposta por [GOLDS93] como o bloco construtor da geometria microcelular.

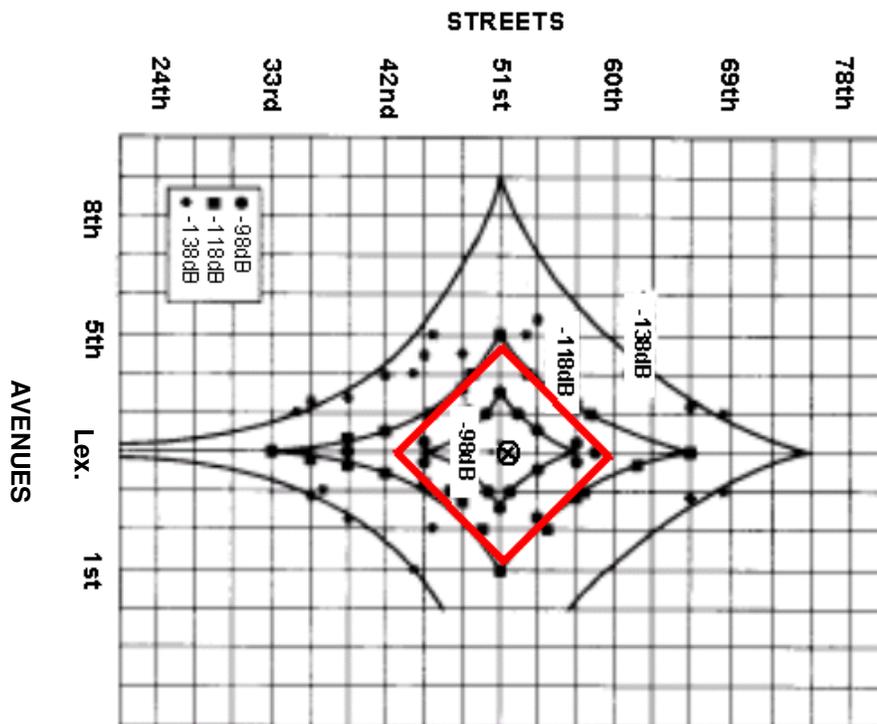


Figura 2.1 - Contornos de AML constantes de medidas em Manhattan [GOLDS93]

O mecanismo de propagação de sinais de rádio em microcélulas urbanas ocorre como se segue: A energia transmitida flui ao longo da rua principal, e parte dela é transmitida para as ruas transversais; igualmente, parte da energia que flui nessas ruas transversais é passada para as ruas paralelas. Baseado neste mecanismo, a queda da potência do sinal recebido em relação à distância na rua em condição de visada (propagação LOS) com a estação transmissora decresce com $(distância)^{-\alpha}$, com α tendo valores típicos na faixa de 2 a 4 [RUSTA91],[LOTSE90]; α é aproximadamente igual a 2 para pontos próximos à antena transmissora e aproximadamente igual a 4 para pontos distantes da mesma. Para usuários nas ruas transversais ou paralelas (propagação NLOS), a potência recebida a uma dada distância da estação base é em geral bem menor do que seria aquela recebida à mesma

distância se estivesse em linha de visada. Isto se deve tanto à distância extra percorrida pelas ondas quanto às perdas adicionadas nas esquinas [GOLDS93].

Podemos ver pela Figura 2.1 um padrão consistente, que pode ser resumido da seguinte forma: os contornos de AML constantes são losangos côncavos, bastante simétricos ao redor da localização da estação base, e claramente alongados ao longo da rua principal (que contém a ERB). Vale ressaltar que a antena transmissora utilizada encontrava-se dentro de uma quadra (e não em uma esquina) da *Lexington Avenue*, marcada na figura como centro do losango. O alongamento é relacionado ao fato da propagação LOS ser mais forte que a propagação NLOS. Para uma estação base montada numa interseção de rua (como é o caso do sistema objeto de estudo neste trabalho) o alongamento seria igual nas duas direções ortogonais pois a propagação LOS existiria nas duas ruas. A natureza côncava dos losangos é interessante e sugere que o casamento entre ruas transversais se dá principalmente por via de difração nas quinas dos prédios ao invés de por reflexões dos edifícios. Se o mecanismo dominante fosse a reflexão, os lados do losango seriam retos [GOLDS93].

Para cada contorno é possível inscrever um quadrado que é rotacionado de 45° com respeito ao contorno das ruas, como mostrado para o contorno de -118dB da Figura 2.1. Como os quadrados tessalam, estes formatos interiores podem ser utilizados como “blocos construtores” de uma geometria celular.

No início dos anos 90, autores como [GOLDS93], [STEEL89] acreditavam ser possível encontrar uma modelagem de propagação para microcélulas suficientemente precisa e independente da disposição dos prédios nas ruas, de forma a se evitar as custosas e demoradas medidas de campo associadas com grandes células.

2.3 Padrão de Reuso Microcelular

Como visto na Seção 2.1 deste capítulo, trabalhos anteriores [GOLDS93], [ERCEG94], [CLARK97], [RUSTA91], [WHITTE88] mostram que um sistema microcelular de um ambiente urbano pode ser modelado com boa precisão por células quadradas. Nesta seção

do capítulo será desenvolvida a teoria necessária para a determinação dos padrões de reuso microcelulares e de seu modo de tesselação. Além disso, serão feitas as devidas comparações aos padrões de reuso macrocelulares, já bastante conhecidos.

Iniciaremos a seção com os principais conceitos de teoria de padrões e simetria aplicada aos nossos propósitos, ou seja, aos sistemas rádio móveis celulares [YACOU93].

1. Qualquer padrão de repetição plano sempre pode ser decomposto em regiões fundamentais, denominadas áreas ou células, com um formato geral de um paralelogramo. De fato, os lados das células podem ter qualquer formato, mas lados opostos devem ter o mesmo formato.
2. Um padrão completo pode ser obtido transladando-se a região fundamental, ou a célula, de modo regular. Em um plano, isto significa colocar cada célula em uma posição $X^m Y^n$, onde X^m representa m passos de X na direção OX e Y^n representa n passos de Y na direção OY . No caso, m e n são inteiros, e O é a origem dos eixos. Este procedimento se repete até o completo preenchimento da área em questão.
3. Define-se *tesselação* como um padrão tendo um polígono como região fundamental, ou célula. Polígonos fundamentais geram tesselações regulares. Triângulos equiláteros, quadrados, retângulos, losangos e hexágonos são os únicos polígonos regulares que podem ser tesselados.
4. Simetria de cores é uma característica apresentada por figuras ou padrões que possuem partes simétricas com escolha de cor. Em sistemas rádio móveis celulares, isto equivale a um conjunto de canais (ou seja, cada conjunto de canais é uma cor).

Como vimos anteriormente, uma estrutura macrocelular faz uso de um padrão de células hexagonais, enquanto que a estrutura de um sistema microcelular faz uso de um padrão de células quadradas. Seguiremos, então, os passos para a formação de padrões de células quadradas, de nosso interesse neste trabalho de tese, comparando-os aos passos de formação de padrões de células hexagonais, que são de conhecimento mais difundido.

Padrão de Reuso Microcelular
[YACOU98-A]

Como a estrutura microcelular se utiliza de células quadradas, é conveniente escolher um sistema de coordenadas ortogonais, como o mostrado na Figura 2.2. Na Figura 2.2, tal sistema é representado pelos eixos u e v . A unidade de distância do sistema é dada por $\sqrt{2}R$, onde R é o raio da célula. A distância d entre o centro de duas células, cujas coordenadas são (u_1, v_1) e (u_2, v_2) é dada por:

$$d^2 = 2R^2[(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2] \quad \text{Equação 2.1}$$

Definindo, $i = (u_2 - u_1)$, $j = (v_2 - v_1)$ e $\sqrt{2}R = 1$, então

$$d^2 = i^2 + j^2 \quad \text{Equação 2.2}$$

onde i e j são números inteiros.

Fator de Reuso

Definimos fator de reuso como sendo o número de células por *cluster*.

Seja D a distância entre duas co-células. Portanto, a distância entre duas co-células quaisquer é dada por

$$D^2 = i^2 + j^2 \quad \text{Equação 2.3}$$

A teoria de padrão de reuso celular é baseada no conceito que um padrão é dado replicando-se uma área chamada de *cluster*. Dado que as distâncias de reuso são isotrópicas e que um *cluster* é um conjunto contíguo de células, todos os *clusters* devem ser idênticos e o formato do *cluster* deve ser quadrado. Uma explicação mais detalhada deste fato pode ser encontrada em [MCDON79].

Padrão de Reuso Macrocelular
[YACOU93]

Como a estrutura macrocelular se utiliza de células hexagonais, é conveniente escolher um conjunto de dois eixos (u, v) com suas porções positivas formando um ângulo de 60° , como mostrado na Figura 2.3. A unidade de distância neste sistema é dada por $\sqrt{3}R$, onde R é o raio da célula. A distância d entre o centro de duas células, cujas coordenadas são (u_1, v_1) e (u_2, v_2) é dada por:

$$d^2 = 3R^2 \left[(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 + 2 \cos(60^\circ)(u_2 - u_1)(v_2 - v_1) \right]$$

Equação 2.7

Definindo, $i = (u_2 - u_1)$, $j = (v_2 - v_1)$ e $\sqrt{3}R = 1$, então

$$d^2 = i^2 + ij + j^2 \quad \text{Equação 2.8}$$

onde i e j são números inteiros.

Fator de Reuso

Definimos fator de reuso como sendo o número de células por *cluster*.

Seja D a distância entre duas co-células. Portanto, a distância entre duas co-células é dada por

$$D^2 = i^2 + ij + j^2 \quad \text{Equação 2.9}$$

Considerando que as distâncias de reuso são isotrópicas e que um *cluster* é um conjunto contíguo de células, todos os *clusters* devem ser idênticos e o formato do *cluster* deve ser de tipo hexagonal.

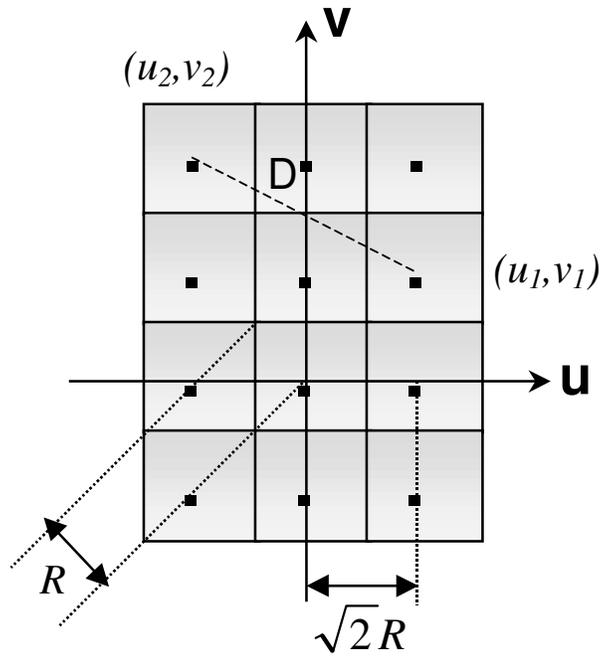


Figura 2.2 – Geometria de Células Quadradas

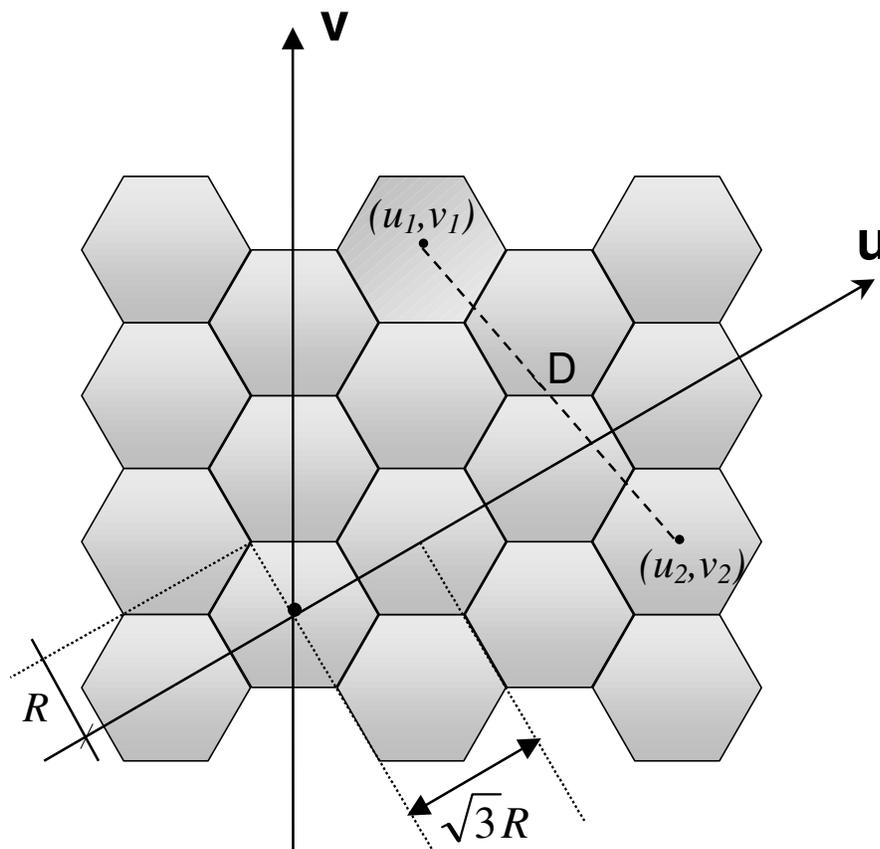


Figura 2.3 – Geometria de Células Hexagonais

... continuação do padrão microcelular

Sabendo que o *cluster* de sistemas microcelulares se assemelha a um quadrado, basta dividir a área deste *cluster* pela área das células deste *cluster* para saber qual é o número N de células por *cluster*, ou o fator de reuso. Para dois *clusters* adjacentes, temos que a distância entre duas co-células é dada por D , definido na Equação 2.3. Sendo assim, D também é a distância entre os centros de dois *clusters*, e portanto também é o tamanho do lado do quadrado que define esse *cluster*. Temos como consequência, que a área A do *cluster* é dada por:

$$A = D^2 \quad \text{Equação 2.4}$$

Temos também que a área a da célula é dada por:

$$a = (2R \cos 45^\circ)^2 = 2R^2 = 1 \times 1 = 1$$

Equação 2.5

E, portanto,

$$N = \frac{A}{a} = \frac{D^2}{1} = i^2 + j^2 \quad \text{Equação 2.6}$$

Como i e j são números inteiros, não podemos ter *clusters* de qualquer tamanho. Pela Equação 2.6 temos que os *clusters* de células quadradas podem acomodar 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 13, 16, ... células. A Figura 2.4 apresenta alguns padrões microcelulares sugeridos ($N = 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10$ e 13).

A disposição das células no *cluster* leva em conta que este deve ser o mais simétrico e compacto possível.

... continuação do padrão macrocelular

Para encontrar qual é o número N de células por *cluster*, ou o fator de reuso do sistema, basta dividir a área do *cluster* pela área das células deste *cluster*, ou seja, a área de um hexágono pela de outro hexágono. Para dois *clusters* adjacentes, temos que a distância entre duas co-células é dada por D , definido na Equação 2.9. Sendo assim, D também é a distância entre os centros de dois *clusters*. Portanto, o tamanho do raio do hexágono que define esse *cluster* é dado por

$$\frac{D/2}{\cos 30^\circ} \quad \text{Equação 2.10}$$

Temos como consequência, que a área A do *cluster* é dada por:

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} \left(\frac{D/2}{\cos 30^\circ} \right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} D^2$$

Equação 2.11

Temos também que a área a da célula é dada por:

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{Equação 2.12}$$

E, portanto,

$$N = \frac{A}{a} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} D^2}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = D^2 = i^2 + ij + j^2$$

Equação 2.13

Como i e j são números inteiros, não podemos ter *clusters* de qualquer tamanho. Pela Equação 2.13 temos que os *clusters* de células hexagonais podem acomodar 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19 ... células. A Figura 2.5 apresenta alguns padrões macrocelulares sugeridos ($N = 1, 3, 4, 7$ e 12).

Para tesselar os *clusters* sobre o plano deve-se dispor cópias do primeiro de forma isotrópica. Portanto teremos quatro co-células equidistantes de uma co-célula de referência. O procedimento básico é o de dispor essas co-células em pontos equidistantes da co-célula de referência, e, em seguida, nomear uma outra co-célula como referência e seguir o mesmo procedimento anterior.

Devemos, então, determinar a localização dos pontos onde se encontrarão as co-células. Utilizando-se a Equação 2.3, podemos ver que se posicionarmos as células quadradas nas coordenadas (p,q) , $(-q,p)$, $(-p,-q)$ e $(q,-p)$, suas distâncias à célula referência, localizada nas coordenadas $(0,0)$, é sempre dada por $p^2 + q^2$. Encontramos, assim, os pontos equidistantes requisitados. Os quatro *clusters* ao redor do *cluster* de referência são replicados da mesma forma, a partir das co-células recém encontradas. A Figura 2.6 ilustra como se dá este procedimento para $(i, j) = (1,2)$, ou seja, fator de reuso de $N = 5$, e $(i, j) = (2,3)$, ou seja, fator de reuso de $N = 13$.

Na Figura 2.12 tem-se as tesselações completas para *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas, respectivamente. A Figura 3.6 mostra a tesselação para *clusters* de 45 células.

Um procedimento equivalente seria utilizar um sistema de quatro eixos positivos i, j, k, l , com cada par de eixos consecutivos i e j , j e k , k e l , l e i , formando um ângulo de 90° . Então, as coordenadas (p,q) são posicionadas utilizando-se os quatro pares de eixos consecutivos, ou seja, $(i, j) = (p, q)$, $(j, k) = (p, q)$, $(k, l) = (p, q)$, $(l, i) = (p, q)$.

A disposição das células no *cluster* leva em conta que este deve ser o mais simétrico e compacto possível. Para tesselar os *clusters* sobre o plano deve-se dispor cópias do primeiro de forma isotrópica. Portanto teremos seis co-células equidistantes de uma co-célula de referência.

Se escolhermos o padrão de reuso de forma que $i = p$ e $j = q$, então, para a célula de referência localizada nas coordenadas $(0,0)$, as seis co-células correspondentes equidistantes desta estão posicionadas em (p,q) , $(p+q,-p)$, $(-q,p+q)$, $(-p,-q)$, $(-p-q,p)$ e $(q,-p-q)$.

Podemos ver que, pela Equação 2.9 a distância destes pontos à célula referência, é sempre dada por $p^2 + pq + q^2$. Os seis *clusters* ao redor do *cluster* de referência são replicados da mesma forma, a partir das co-células recém encontradas.

A Figura 2.7 mostra como se dá este procedimento para $(i, j) = (2,1)$, ou seja, fator de reuso de $N = 7$.

Um procedimento equivalente seria usar um sistema de seis eixos positivos i, j, k, l, m, n , com cada par de eixos consecutivos i e j , j e k , k e l , l e m , m e n , e n e i formando um ângulo de 60° .

Então, as coordenadas (p,q) são posicionadas utilizando-se os seis pares de eixos consecutivos, ou seja, $(i, j) = (p, q)$, $(j, k) = (p, q)$, $(k, l) = (p, q)$, $(l, m) = (p, q)$, $(m, n) = (p, q)$ e $(n, i) = (p, q)$.

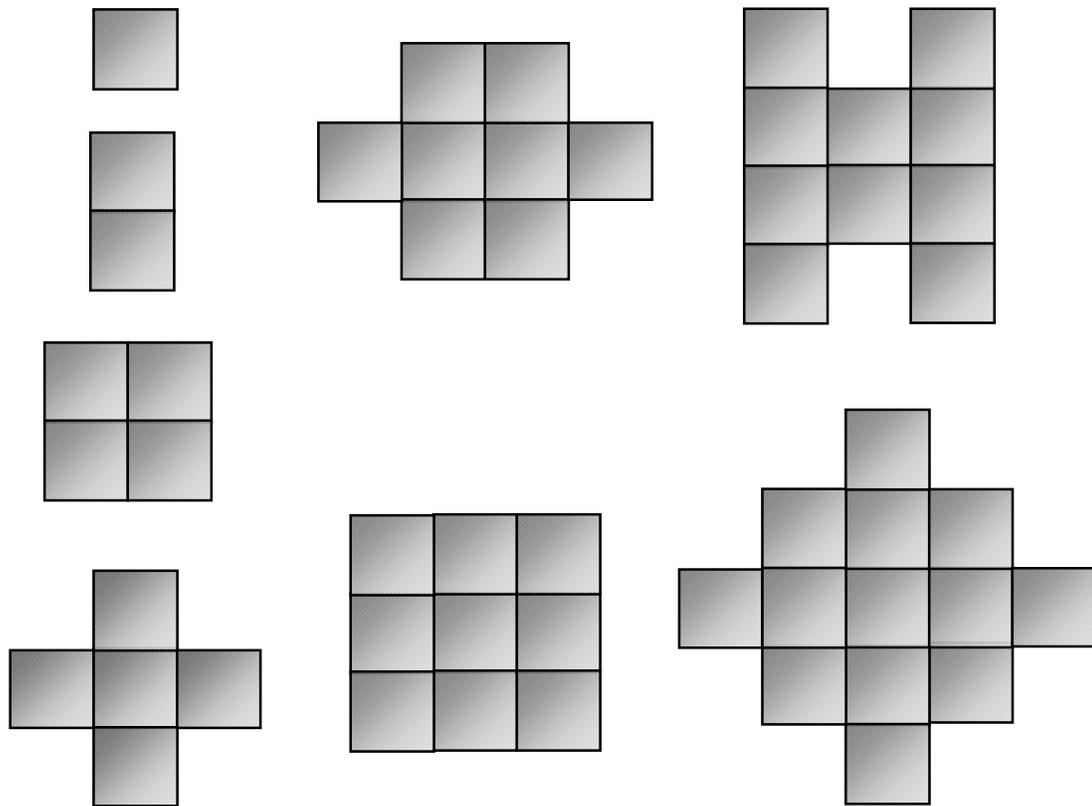


Figura 2.4 – Possíveis padrões microcelulares ($N= 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10$ e 13 microcélulas por cluster)

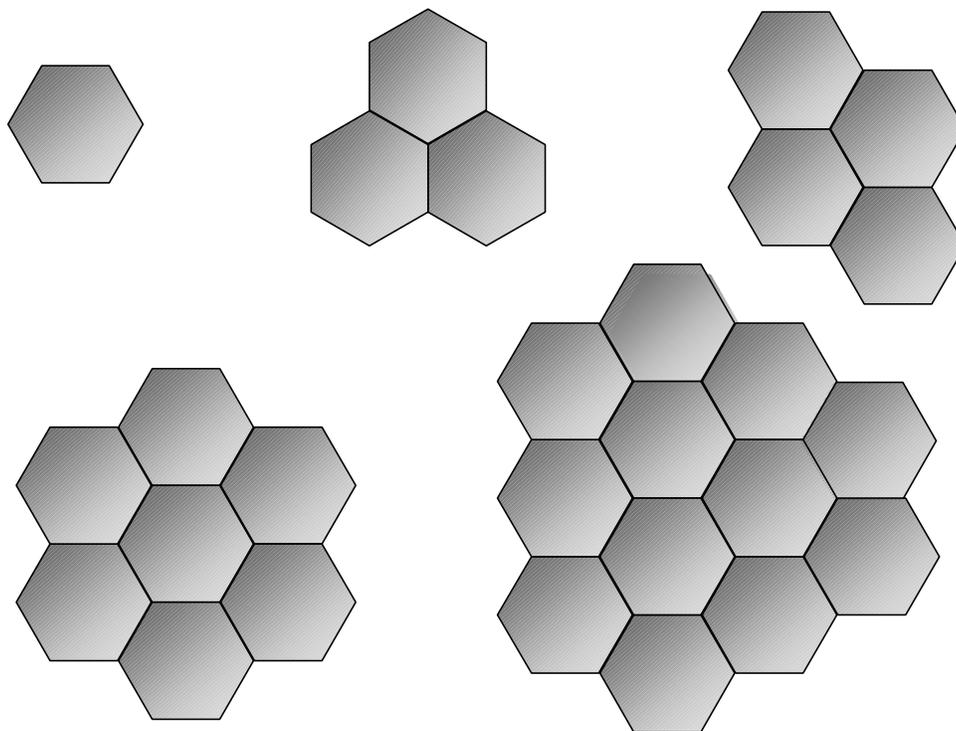


Figura 2.5 – Possíveis padrões macrocelulares ($N= 1, 3, 4, 7$ e 12 macrocélulas por cluster)

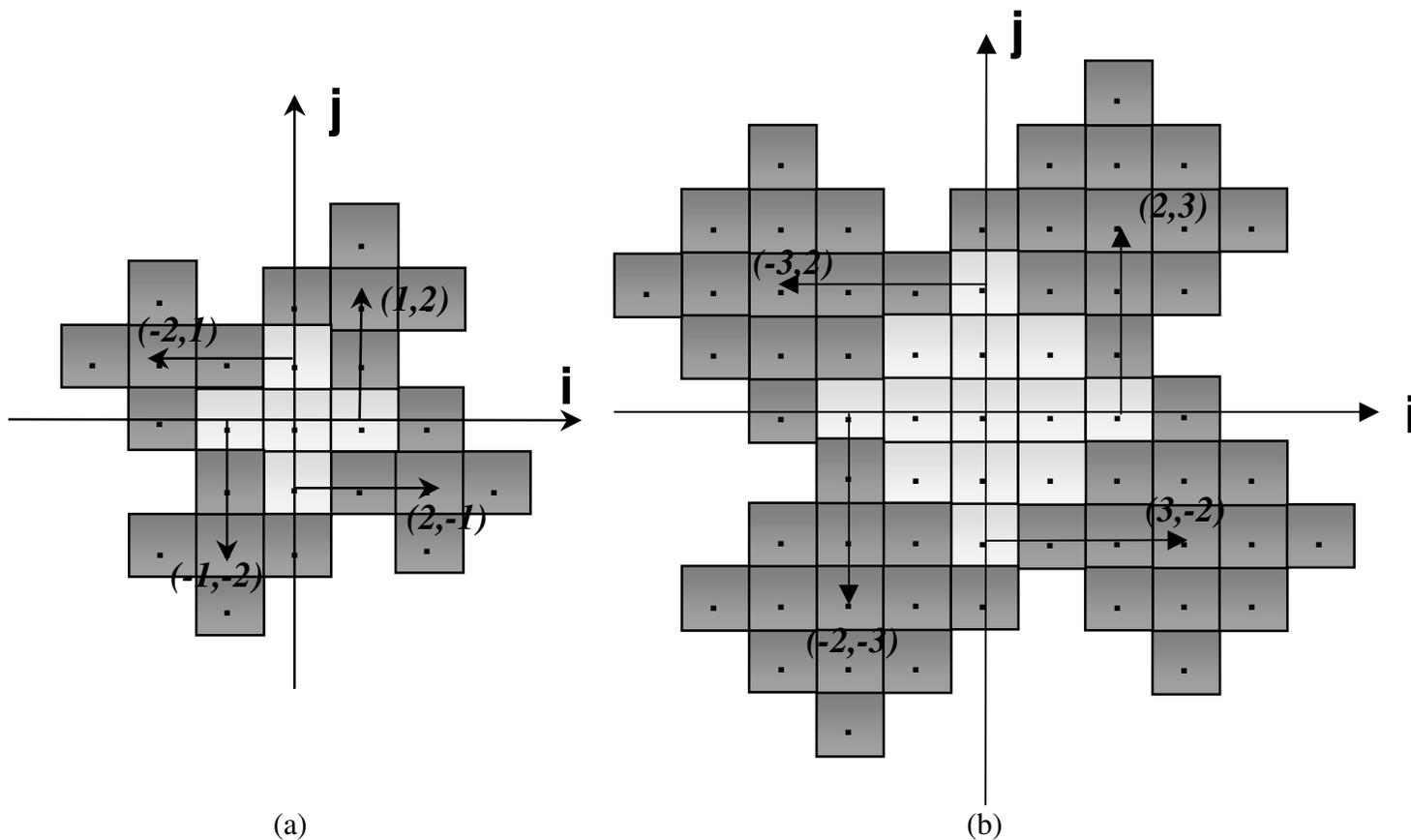


Figura 2.6 – Tesselação parcial para reuso de (a) 5 e; (b) 13 células por cluster

2.4 Propagação

2.4.1 Sistemas Macrocelulares Convencionais

Em redes macrocelulares convencionais, as antenas das estações rádio base tendem a ser montadas acima de grandes obstruções como morros e prédios altos, de forma que a potência irradiada tende a formar aproximadamente um contorno circular, quando utilizadas antenas omnidirecionais. A propagação neste tipo de ambiente é caracterizada por uma condição NLOS, ou seja, sem linha de visada ou obstruída. A potência média recebida a uma distância d da antena transmissora para estes casos, é [CLARK97]

$$P_R = K \frac{P_T}{d^\alpha} \tag{Equação 2.14}$$

onde P_T é a potência transmitida, K é uma constante de proporcionalidade e α é o coeficiente de perda de percurso, com valores usuais na faixa $2 \leq \alpha \leq 6$. A constante K é função de vários parâmetros, como a frequência do sinal, a altura das antenas transmissora e receptora, os ganhos das antenas transmissora e receptora, o ambiente de propagação e outros.

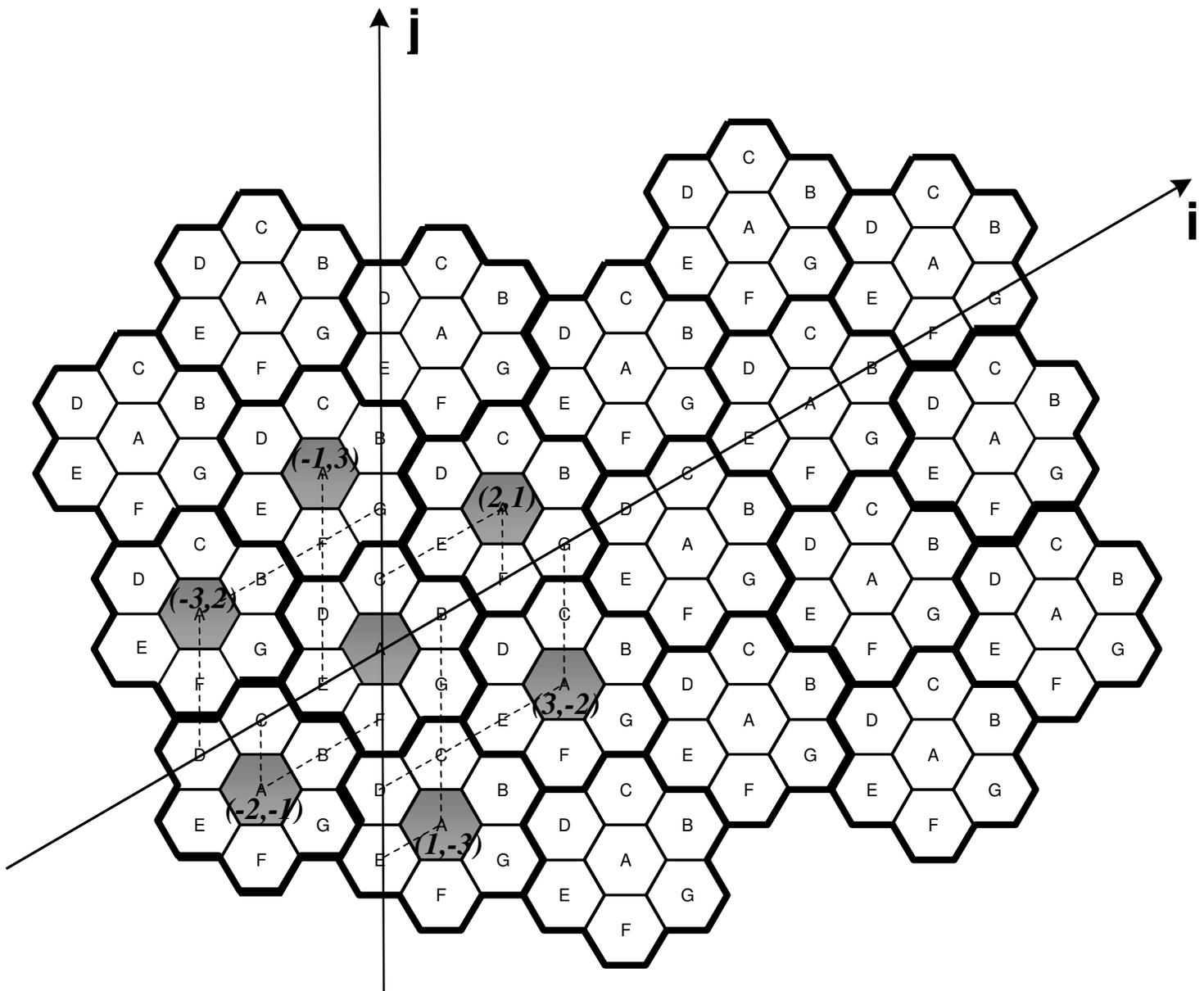


Figura 2.7 – Tesselação de padrão de reuso macrocelular – fator de reuso de 7

2.4.2 Sistemas Microcelulares

Medidas de propagação em ambientes microcelulares foram exaustivamente coletadas por vários autores [MEDIDAS] para ambientes diversos, e para distintas frequências. Todos os dados obtidos demonstram que este tipo de ambiente de propagação é completamente diferente daquele de redes macrocelulares, o que implica na necessidade de uma modelagem mais direcionada a este tipo particular de redes. Neste trabalho de tese apresentamos a formulação e formalização de uma teoria totalmente aplicável a redes microcelulares em ambientes urbanos.

Devemos destacar, primeiramente, que os modos de propagação em linha de visada (LOS) e sem linha de visada (NLOS) tem comportamento distintos. Trabalhos analisando os dois casos [MEDIDAS] mostram que a propagação NLOS tem um decaimento na faixa de 20 a 40dB maior do que a propagação LOS para distâncias de aproximadamente 100 m da antena transmissora, e diferenças ainda maiores com o aumento desta distância.

Trabalhos como [HARLE89], [GREEN91], [ERCEG92], [RUSTA91], [FEUER94] mostram que a propagação em linha de visada (LOS) em ambientes microcelulares não pode ser modelada por uma lei simples de proporção inversa a uma potência da distância entre antenas transmissora e receptora, como é o caso da propagação NLOS. Observa-se que, neste caso, o comportamento do decaimento varia com essa distância e que a propagação pode ser modelada, com a distância em escala logarítmica, por duas retas com diferentes coeficientes angulares. O ponto de união das duas retas é chamado de “*breakpoint*”. O comportamento observado na literatura é que o decaimento do sinal após o *breakpoint* é sempre maior que aquele encontrado entre a estação rádio base e o *breakpoint*.

Assim, trabalhos como o de [GREEN91] sugerem que a propagação em microcélulas pode utilizar um modelo simples de dois caminhos. A propagação nas proximidades da estação rádio base segue aproximadamente a lei de propagação do espaço livre, com um decaimento do sinal proporcional ao quadrado da distância percorrida pelo mesmo, antes de fazer uma transição de taxa de decaimento, a partir da qual a propagação passaria a seguir

uma lei inversa à quarta potência da distância. O trabalho de [GREEN91] apresenta dados interessantes, que mostram que medidas tiradas nos mesmos locais em dias diferentes possuem modelos de dois decaimentos distintos, isto é, se quisermos otimizar o modelo, traçando duas retas que minimizem o erro quadrático médio com relação aos pontos medidos, obteremos modelos com retas de decaimentos distintos, e com *breakpoints* bem distantes uns dos outros. No entanto, mostra-se neste trabalho [GREEN91], que se o *breakpoint* for mantido constante, apesar de termos um aumento no erro quadrático médio (não muito significativo), todos os casos apresentarão praticamente os mesmos decaimentos para cada uma das retas, ou seja, o modelo se mantém fixo.

O problema seria então definir qual é o melhor valor para esse *breakpoint* fixo. O modelo teórico de dois caminhos prediz que a distância de *breakpoint* é proporcional ao produto das alturas das duas antenas transmissora e receptora (h_t e h_r) e inversamente proporcional ao comprimento de onda (λ) do sinal da fonte transmissora. Na verdade, observando os dados medidos de vários autores [MEDIDAS], tem-se que não existe uma transição abrupta entre os dois decaimentos, e sim uma transição suave, ou uma região de transição.

Encontramos na literatura [GREEN91, [ERCEG92], [ERCEG94], [CLARK97], que, um valor ótimo para o *breakpoint*, baseado em várias medidas de campo, é dado por

$$d_B = \frac{4h_r h_t}{\lambda} \quad \text{Equação 2.15}$$

onde h_t é a altura da estação transmissora, h_r é a altura da estação receptora, d_B é o valor da distância de *breakpoint* e λ é o comprimento de onda do sinal transmitido.

A propagação NLOS, no entanto, pode ser modelada por uma lei simples com seu decaimento sendo proporcional à distância entre antenas transmissora e receptora elevada a uma potência que depende do meio de transmissão, como mostrado na Equação 2.16.

Podemos dizer então, baseados em um grande número de trabalhos anteriores, [MEDIDAS], que levando-se em conta os aspectos de cobertura de rádio, sabe-se que os modos de propagação LOS e NLOS são muito diferentes. O decaimento da potência para os dois casos é dado abaixo [CLARK97] para antenas receptoras localizadas a uma distância d da estação rádio-base e para um sinal com comprimento de onda λ , uma antena transmissora de altura h_t e uma antena receptora de altura h_r . Vale ressaltar que as equações abaixo são válidas para o campo distante ($d \neq 0$).

$$L_{NLOS} = \frac{K_{NLOS}}{d^\alpha} \quad \text{Equação 2.16}$$

$$L_{LOS} = \frac{K_{LOS}}{d^2} \left[1 + \left(\frac{d}{d_B} \right)^2 \right]^{-1} \quad \text{Equação 2.17}$$

onde L_{NLOS} e L_{LOS} , representam, respectivamente, as perdas de percurso (decaimento da potência) para o modo de propagação sem linha de visada (NLOS) e com linha de visada (LOS); K_{NLOS} é uma constante de proporcionalidade igual a 0,16 para 900MHz e 0,0015 para 2GHz; d_B é a distância de *breakpoint* dada pela Equação 2.15; $\alpha = 4,3$ para 900MHz e 3,8 para 2GHz [CLARK97]; e K_{LOS} é dada por

$$K_{LOS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad \text{Equação 2.18}$$

Pela Equação 2.17, temos que, para distâncias muito menores que o *breakpoint*, ou seja, $d \ll d_B$, temos $\left(\frac{d}{d_B} \right)^2 \ll 1$, e portanto, podemos fazer a seguinte aproximação:

$$L_{LOS} = \frac{K_{LOS}}{d^2} \left[1 + \left(\frac{d}{d_B} \right)^2 \right]^{-1} \approx \frac{K_{LOS}}{d^2} \quad \text{Equação 2.19}$$

Já para distâncias muito maiores que o *breakpoint*, ou seja, $d \gg d_B$, temos $\left(\frac{d}{d_B}\right)^2 \gg 1$, e portanto,

$$L_{LOS} \approx \frac{K_{LOS}}{d^2} \left(\frac{d}{d_B}\right)^{-2} = \frac{K_{LOS}}{d^4} \times d_B^2 \quad \text{Equação 2.20}$$

Portanto, temos que a perda de propagação em linha de visada segue aproximadamente uma lei inversa quadrática antes do *breakpoint*, e uma lei inversa à quarta potência depois do *breakpoint*, como podemos ver pela Figura 2.8. No caso, o *breakpoint* utilizado foi de 1000m. Nota-se que o modelamento da Equação 2.17 adequa-se bem aos dados reais, possuindo uma transição suave entre os dois decaimentos mencionados.

Perda de Percuso em Linha de Visada

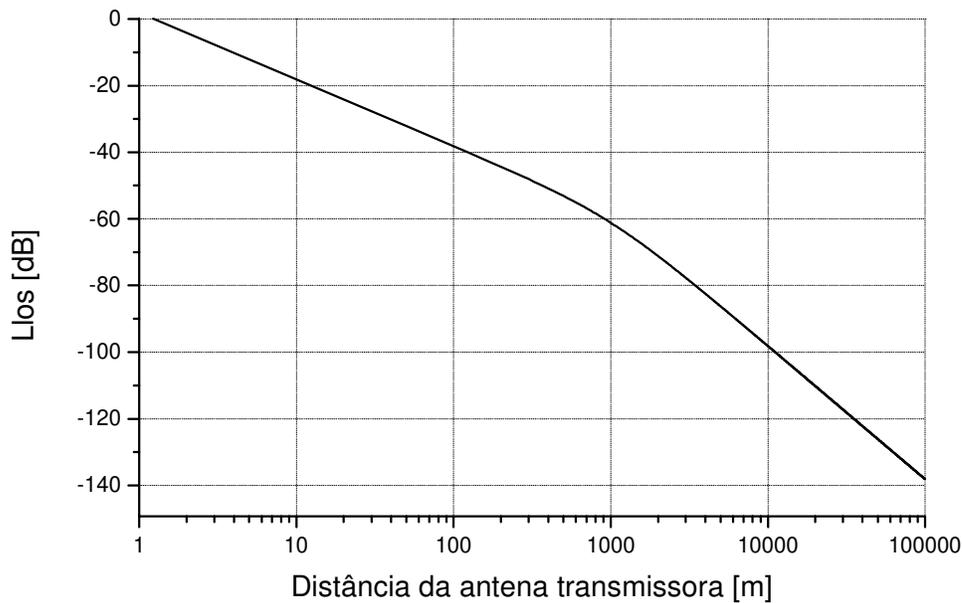


Figura 2.8 – Perda de percurso para propagação com linha de visada

A importância do *breakpoint* é que ele marca uma fronteira adequada de uma microcélula, provendo baixa perda de percurso dentro da microcélula e forte atenuação fora dela.

Na Figura 2.9, temos as perdas de percurso para propagação em linha de visada (LOS) e obstruída (NLOS), calculadas com os mesmos parâmetros de sistema que serão utilizados no sistema objeto de estudo deste trabalho de tese. Esse sistema contempla uma frequência de operação de 890MHz, e as alturas das antenas transmissora e receptora respectivamente iguais a 4m e 1,5m.

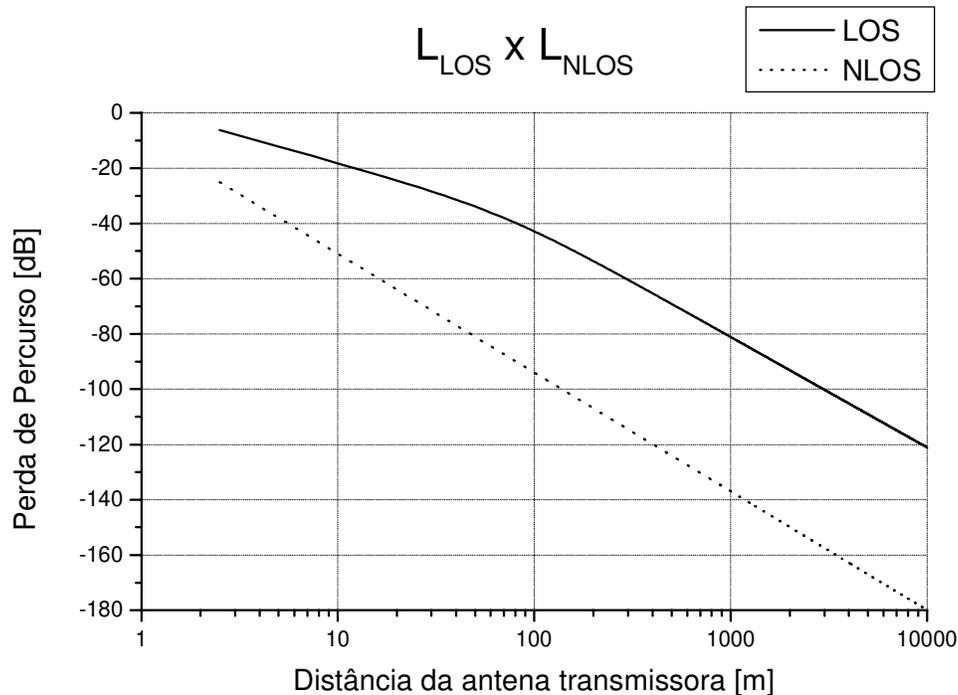


Figura 2.9 – Perda de percurso para propagação com linha de visada (LOS) comparada à obstruída (NLOS).

Note que para distâncias maiores que 1km, onde os interferentes podem estar localizados, existe uma diferença maior que 50dB entre as perdas de percurso para as condições de visibilidade e obstruída. Esta diferença tem um impacto muito grande no *layout* das antenas em sistemas microcelulares e no padrão de reuso. Mesmo para pequenas distâncias como de 100m a diferença entre as atenuações nos dois casos já é maior que 40dB. Essa diferença aumenta à medida que a antena receptora se afasta da transmissora.

Nos Capítulos 3 e 4 serão realizadas análises de desempenho de uma rede microcelular para a condição de pior caso, e também para algumas condições mais realistas. No primeiro caso, considera-se que o sistema está operando a plena carga e que todos os móveis estão

localizados na situação onde geram a maior interferência possível. No segundo caso, considera-se que os móveis estão posicionados aleatoriamente dentro da microcélula, e que a atividade do canal é dada de acordo com uma certa intensidade de tráfego. Como a contribuição dos interferentes obstruídos para o desempenho da razão portadora/interferência total é desprezível se comparado àquela dos interferentes em linha de visada, os cálculos realizados neste trabalho de tese consideram somente a influência dos interferentes em condições de linha de visada (LOS). Veremos que no segundo caso o desempenho do sistema tem uma melhora substancial quando comparado ao da situação de pior caso.

2.5 Sistema sob Análise

Esta seção detalha o sistema microcelular proposto neste trabalho de tese como objeto de estudo para uma análise de desempenho. Esta análise será desenvolvida através do estudo de interferência neste sistema em diversas situações, como veremos nos Capítulos 3 e 4. O desempenho do sistema será analisado a partir da relação entre a potência do sinal de interesse e a potência dos sinais interferentes, ou seja, através da razão portadora/interferência, ou *carrier-to-interferer ratio (C/I)*.

Segundo [CLARK97], e como podemos ver pela Figura 2.1, considerando um sistema de 900MHz, e uma perda de percurso de no máximo 130dB, a dimensão máxima que uma célula poderia ter seria 800m. No nosso trabalho, escolhemos um sistema de raio igual a 100m, ou seja, de lado aproximadamente igual a 140m.

Uma boa regra a ser seguida em sistemas microcelulares é alinhar as antenas das estações rádio base ao longo das ruas, como mostra a Figura 2.10. Se um móvel estiver em uma rua na qual não possui linha de visada com a sua estação rádio base, a perda de percurso do sinal de interesse pode ser de 20 a 40dB maior que a de um sinal LOS. No entanto, se tivermos um cenário ideal, como o da figura, no qual todas as ruas são dispostas em uma grade perfeitamente quadrangular, e dispusermos as antenas sempre de forma alinhada, esse móvel também não apresentará condição de visibilidade para nenhuma outra estação rádio

base, e portanto minimiza-se a interferência. Por outro lado, se o móvel tiver condição de visibilidade com a sua estação base, também terá condição de visibilidade com algumas estações interferentes. No entanto, neste caso, o sinal de interesse terá uma potência bem grande, já que o móvel estará mais próximo à sua estação base servidora e possuirá condição LOS com a mesma. Neste caso, inclusive, vale como uma boa aproximação fazer o cálculo de interferência levando em conta somente os interferentes em linha de visada, já que interferentes em NLOS possuem um nível de sinal muito mais baixo [CLARK97].

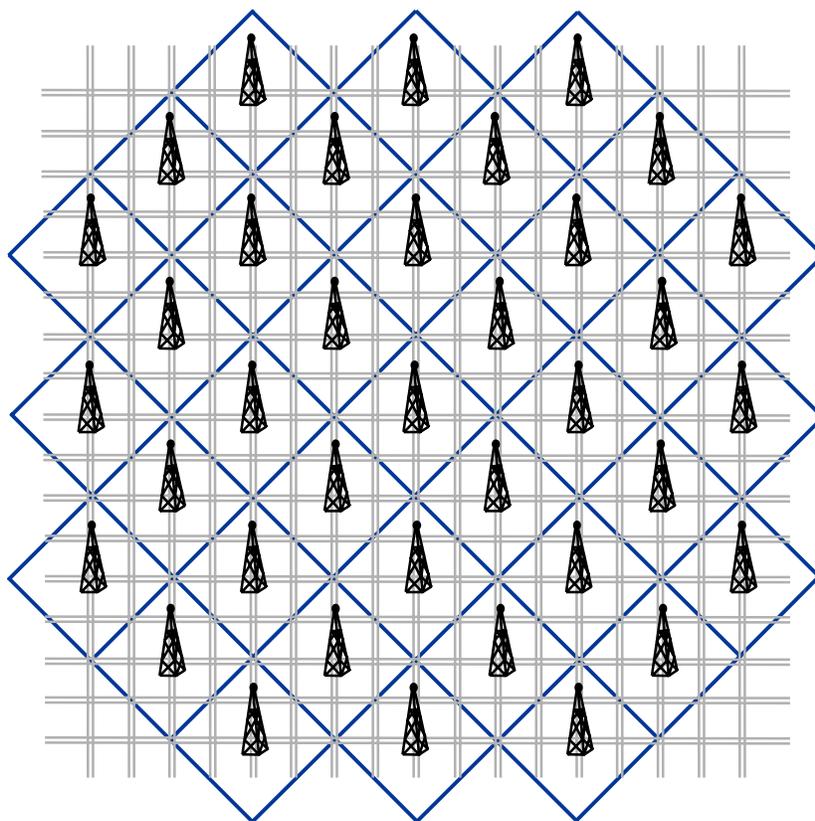


Figura 2.10 – Microcélulas com antenas alinhadas ao longo da rua.

A probabilidade de um móvel ter condição LOS para sua estação rádio base servidora, depende do tamanho da microcélula. No sistema da Figura 2.10, cada microcélula possui quatro trechos de ruas nos quais o móvel pode estar localizado e que tenha seu sinal de interesse obstruído. Quanto maior a célula, maior a proporção em que o sinal desejado teria condição NLOS. Neste trabalho de tese lidamos somente com a propagação de sinais em sistemas celulares que apresentam linha de visada. Este objetivo é atingido montando-se

um sistema no qual o raio das células é igual ao comprimento de uma quadra. A seguir apresentamos o sistema objeto de estudo nos próximos capítulos.

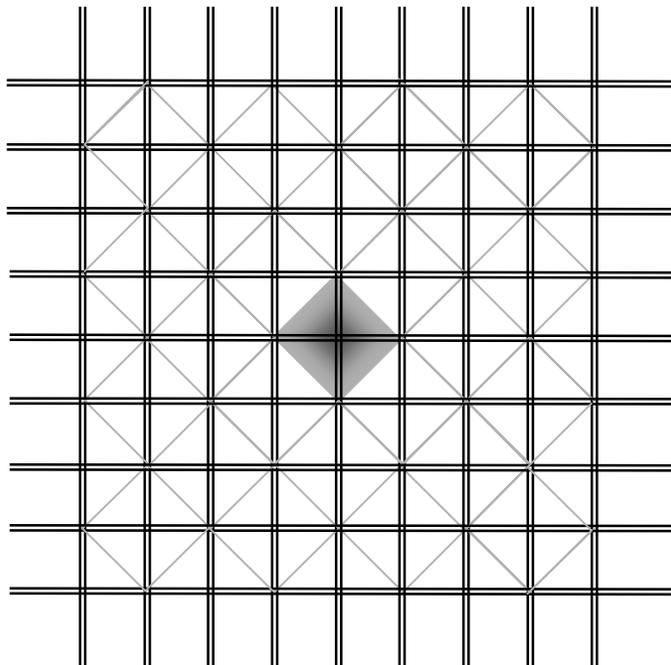


Figura 2.11 – Disposição de células quadradas com relação às ruas em uma área urbana

O estudo desenvolvido neste trabalho considera um padrão de células quadradas disposto da seguinte forma: as estações rádio base, ou seja, o centro das células, estão localizados a cada duas esquinas das ruas. Isso implica em que as estações rádio base são colineares e que cada microcélula cobre quatro setores de 90° , sendo cada setor definido por metade de uma quadra, dividida em sua diagonal. A Figura 2.11 ilustra essa disposição de células com respeito às ruas. Na Figura 2.11 as linhas verticais e horizontais (as linhas mais escuras) representam as ruas, e as linhas diagonais (as linhas mais claras) representam os limites das células. Uma das células está hachurada para destacar sua posição.

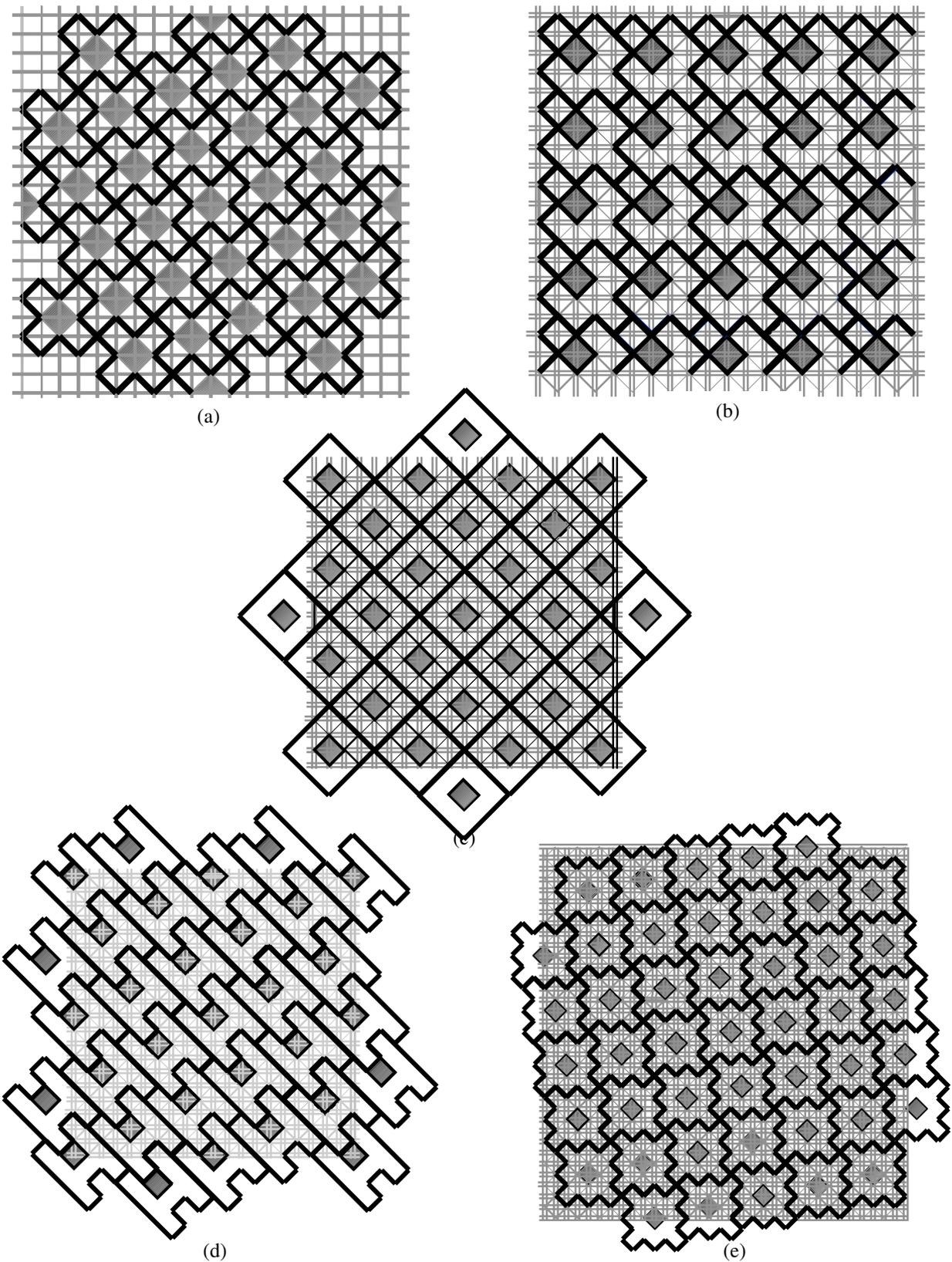


Figura 2.12 - Tesselagem microcelular para clusters com: (a) 5 células; (b) 8 células; (c) 9 células; (d) 10 células; (e) 13 células

A Figura 2.12 mostra a tesselação de células com a disposição dada acima para *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas, nas quais o *cluster* destacado contém a célula alvo, e as outras células em negrito são as co-células que em algum momento podem interferir com a estação rádio base ou com o móvel de interesse, à medida que este se aproxima ou se afasta do centro da célula. Em uma estrutura microcelular, diferentes situações são encontradas que afetam de maneira distinta o desempenho do sinal no sentido direto e no sentido reverso. Deve-se levar em conta a assimetria dos interferentes para o móvel e a estação rádio base na análise de desempenho dos enlaces direto e reverso. Pode-se dizer que os interferentes do enlace direto são um subconjunto dos interferentes do enlace reverso. Veremos estes pontos em maior detalhe nos próximos capítulos desta tese.

Nota-se que alguns dos padrões propostos tessalam em configurações tortuosas fazendo com que os interferentes mais próximos sejam bloqueados completamente ou por uma boa proporção da rua com um interferente na linha de visada aparecendo a muitas quadras de distância. No caso de *clusters* com um número primo de células, como é o caso do *cluster* de 5 células na Figura 2.12(a), as estações rádio-base que interferem no sinal do móvel de interesse, ou seja, que interferem no sinal do canal direto, mudam a medida que a estação móvel se desloca ao longo da rua. Veremos no Capítulo 3 que os *clusters* de sistemas microcelulares podem ser divididos em grupos dentro dos quais os padrões de reuso possuem características em comum. Essas características influenciam no desempenho do sinal referente em *clusters* com um determinado padrão de reuso. Os *clusters* de número primo de células são os que possuem características mais incomuns.

2.6 Conclusão

A propagação em sistemas microcelulares é bem diferente daquela de sistemas macrocelulares convencionais. Em sistemas macrocelulares, as antenas das estações rádio base são posicionadas acima da maior obstrução da sua área de cobertura. Já em sistemas microcelulares, as antenas são posicionadas abaixo do nível dos prédios, confinando o sinal nas ruas. Assim, a pressuposta simetria de propagação em sistemas macrocelulares não é

mais válida e portanto os padrões de reuso baseados em células de formato hexagonal também não fazem mais sentido.

Podemos dividir em dois tipos a propagação em sistemas microcelulares: propagação em linha de visada (LOS) e propagação obstruída (NLOS). Os dois modos de propagação são bem diferentes entre si. No modo de propagação obstruída, a média da potência do sinal decai monotonicamente com a distância, enquanto que no modo com linha de visada o comportamento do decaimento da propagação pode ser dividido em duas partes: para distâncias menores que o *breakpoint*, a potência média do sinal decai com uma lei exponencial próxima daquela do espaço livre ($\alpha \approx 2$); e para distâncias maiores que o *breakpoint*, a lei exponencial se aproxima muito daquela de uma propagação de plano reto terrestre ($\alpha \approx 4$). Vale notar que o decaimento da potência na propagação NLOS é sempre muito maior que na propagação LOS.

Neste capítulo foram propostos padrões de reuso microcelulares baseados em células quadradas, aplicáveis a centros urbanos. Foram apresentadas a formalização da teoria de reuso microcelular e a tesselação de alguns padrões de reuso. Foram também apresentadas as fórmulas de perda de percurso tanto para os casos de propagação LOS como NLOS. E, finalmente, foi apresentado o sistema objeto de estudo neste trabalho de tese.

Nos Capítulos 3 e 4 realizaremos a análise de desempenho do sistema microcelular apresentado aqui, tanto para a situação de pior caso como para um caso mais realista. No primeiro caso considera-se o sistema operando em plena carga e os móveis posicionados na situação de maior interferência. No segundo caso, consideram-se os móveis posicionados aleatoriamente e o canal ativo de acordo com uma dada intensidade de tráfego.

Veremos que a eficiência de reuso em sistemas microcélulares urbanos é melhor que aquela em sistemas macrocélulares convencionais. Uma das razões para este fenômeno é que a propagação em linha de visada garante uma maior barreira contra os interferentes, já que o sinal de interesse segue aproximadamente uma lei de proporcionalidade inversa ao

quadrado da distância, enquanto que a propagação dos co-canais interferentes seguem aproximadamente uma lei inversa à quarta potência da distância.

Capítulo 3

Limite Inferior de Desempenho

3.1 Introdução

No capítulo anterior vimos que o estudo de interferência em sistemas microcelulares depende não só da distância entre transmissor e receptor mas também da condição de visibilidade. Neste capítulo serão apresentadas fórmulas fechadas para a razão portadora/interferência (C/I) para a situação de pior caso, ou seja, os móveis posicionados na situação de maior interferência e o sistema operando em carga plena, para todos os possíveis padrões de reuso baseados em células quadradas. Estas fórmulas levam em conta um número infinito de interferentes.

Após a determinação das fórmulas fechadas, é feita uma análise de desempenho para sistemas com *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas Também faz-se uma comparação de

resultados de análise de desempenho, considerando-se todos os possíveis interferentes (número infinito de interferentes), e considerando-se apenas a primeira camada de interferentes.

3.2 Razão Portadora/Interferência

No Capítulo 2 definiu-se a forma de tesselação dos clusters baseados em microcélulas quadradas. As Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, e 3.6 mostram a tesselação de células com a disposição dada na Seção 2.5 para *clusters* de 5, 8, 9, 10, 13 e 45 células, respectivamente. Nas figuras o *cluster* destacado contém a microcélula alvo, e as outras microcélulas em negrito são as co-microcélulas que em algum momento vão interferir com a estação rádio base ou com o móvel de interesse, à medida que este se aproxima ou se afasta do centro da célula. Deve-se levar em conta a assimetria dos interferentes para o móvel e a estação rádio base na análise de desempenho dos enlaces direto e reverso. Pode-se dizer que os interferentes do enlace direto são um subconjunto dos interferentes do enlace reverso. Nas Figuras 3.1 a 3.6, as estrelas indicam as estações rádio base influenciando na relação C/I do enlace direto, e os círculos indicam o posicionamento de pior caso das estações móveis que influenciam o enlace reverso. As classes de *clusters* mostradas na legenda destas figuras serão definidas na Seção 3.3.

Como visto anteriormente, a análise de desempenho realizada neste trabalho leva em conta sistemas que possuem suas antenas posicionadas abaixo do nível dos prédios, e somente a influência de interferentes posicionados em linha de visada (LOS). As perdas de propagação (L_{LOS}) para este caso, são dadas por [CLARK97],

$$L_{LOS} = \frac{K_{LOS}}{d^2} \left[1 + \left(\frac{d}{d_B} \right)^2 \right]^{-1} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde d é a distância entre a antena transmissora e a receptora, K_{LOS} é uma constante de proporcionalidade, e d_B é a distância de *breakpoint*. K_{LOS} e d_B , por sua vez, são dados por

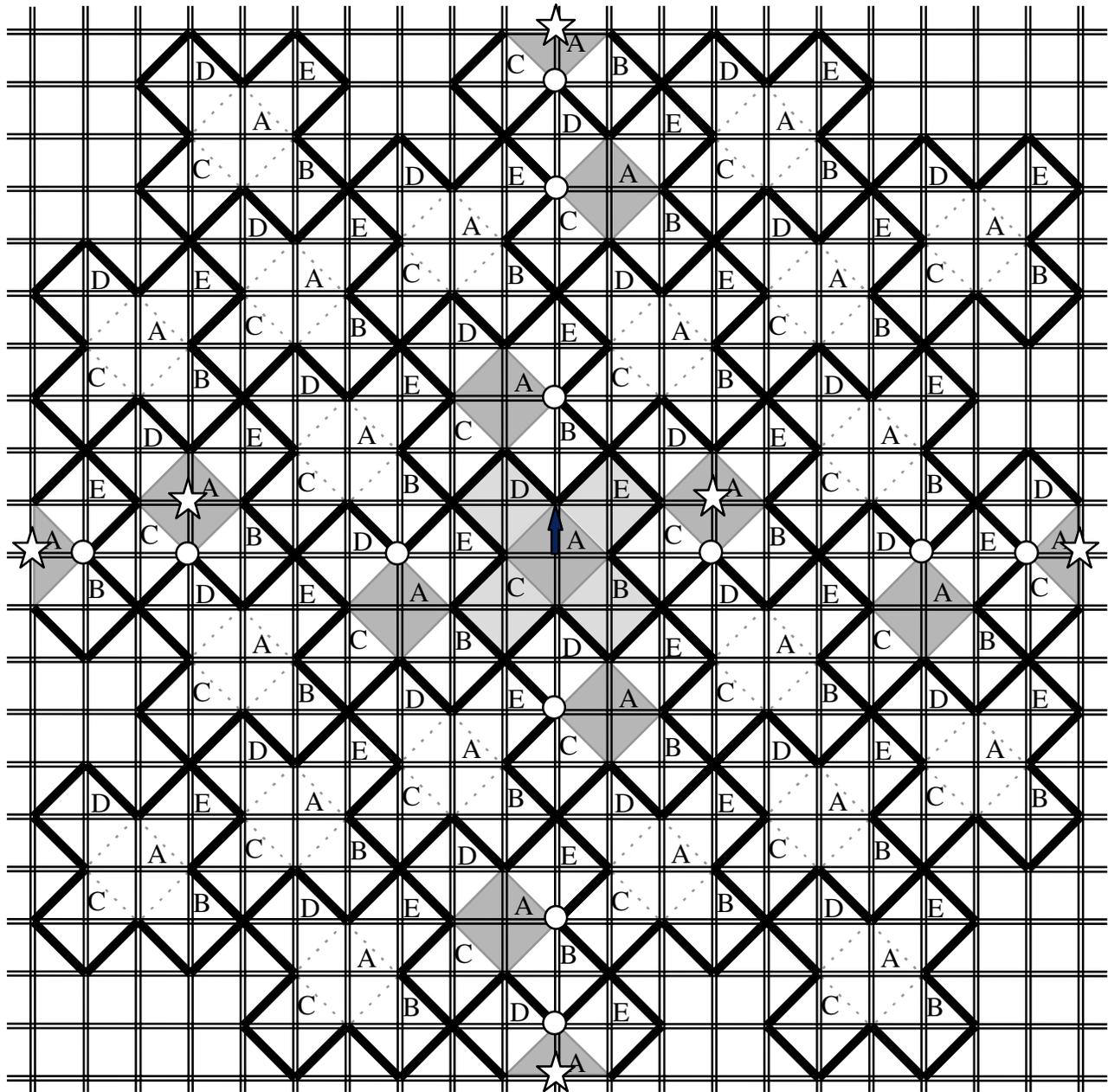


Figura 3.1 – Tesselagem de clusters de 5 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 4: “Não-Colineares Primos”

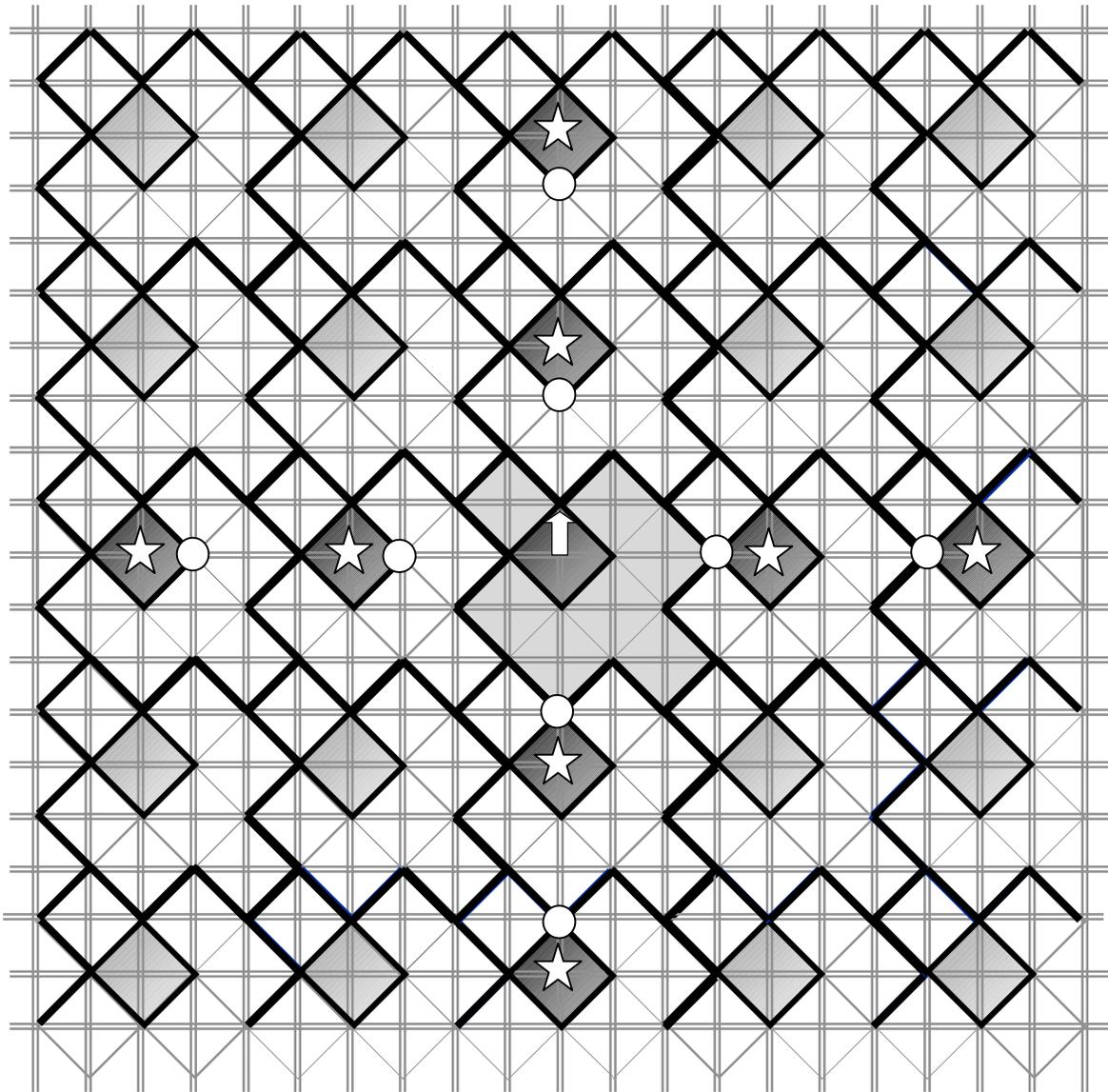


Figura 3.2 – Tesselagem de clusters de 8 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 1:
 “Colineares – $i = j$ ”

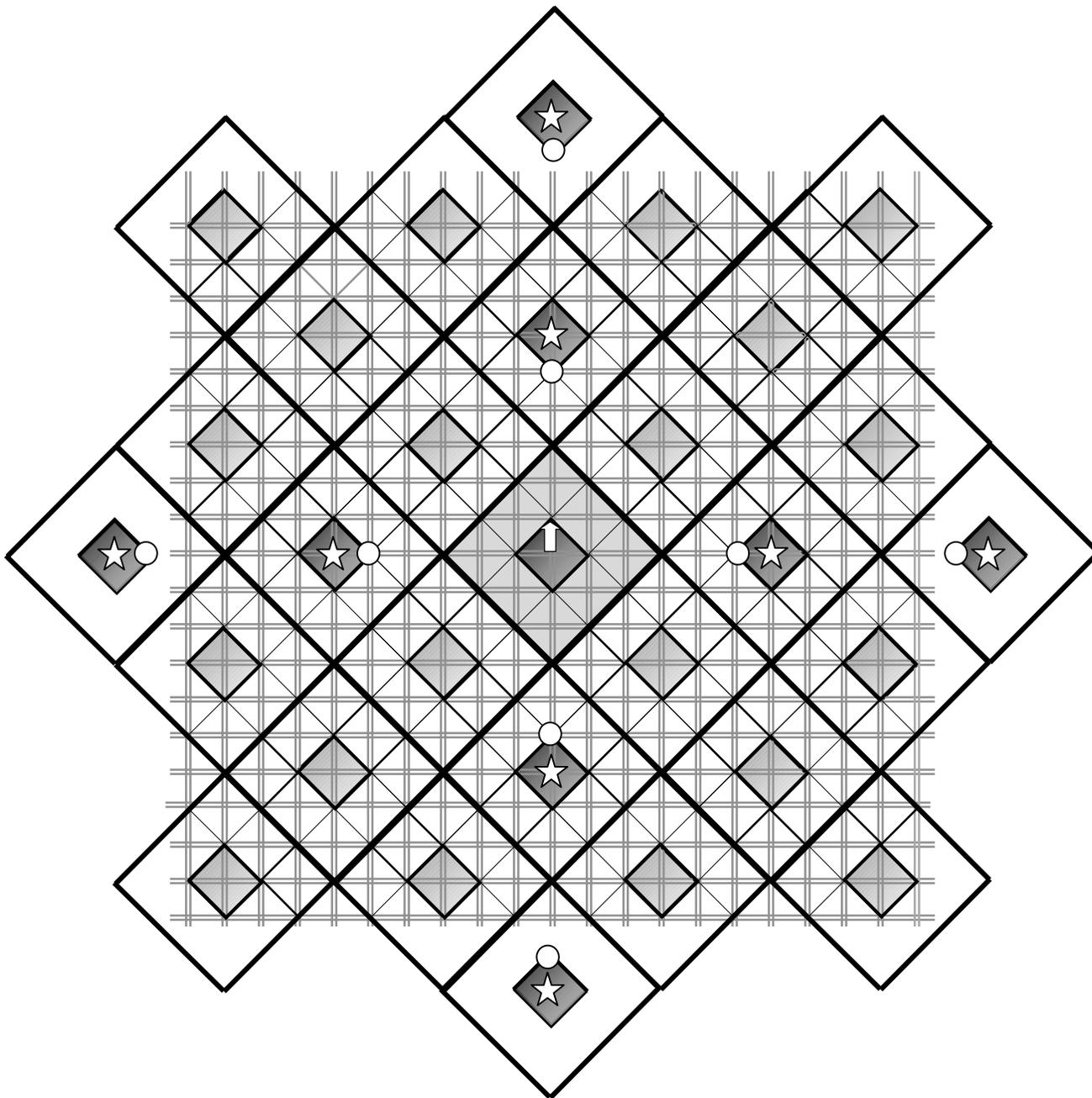


Figura 3.3 – Tesselação de clusters de 9 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 1:
 “Colineares- $\sqrt{N} \in \mathbb{Z}$ ”

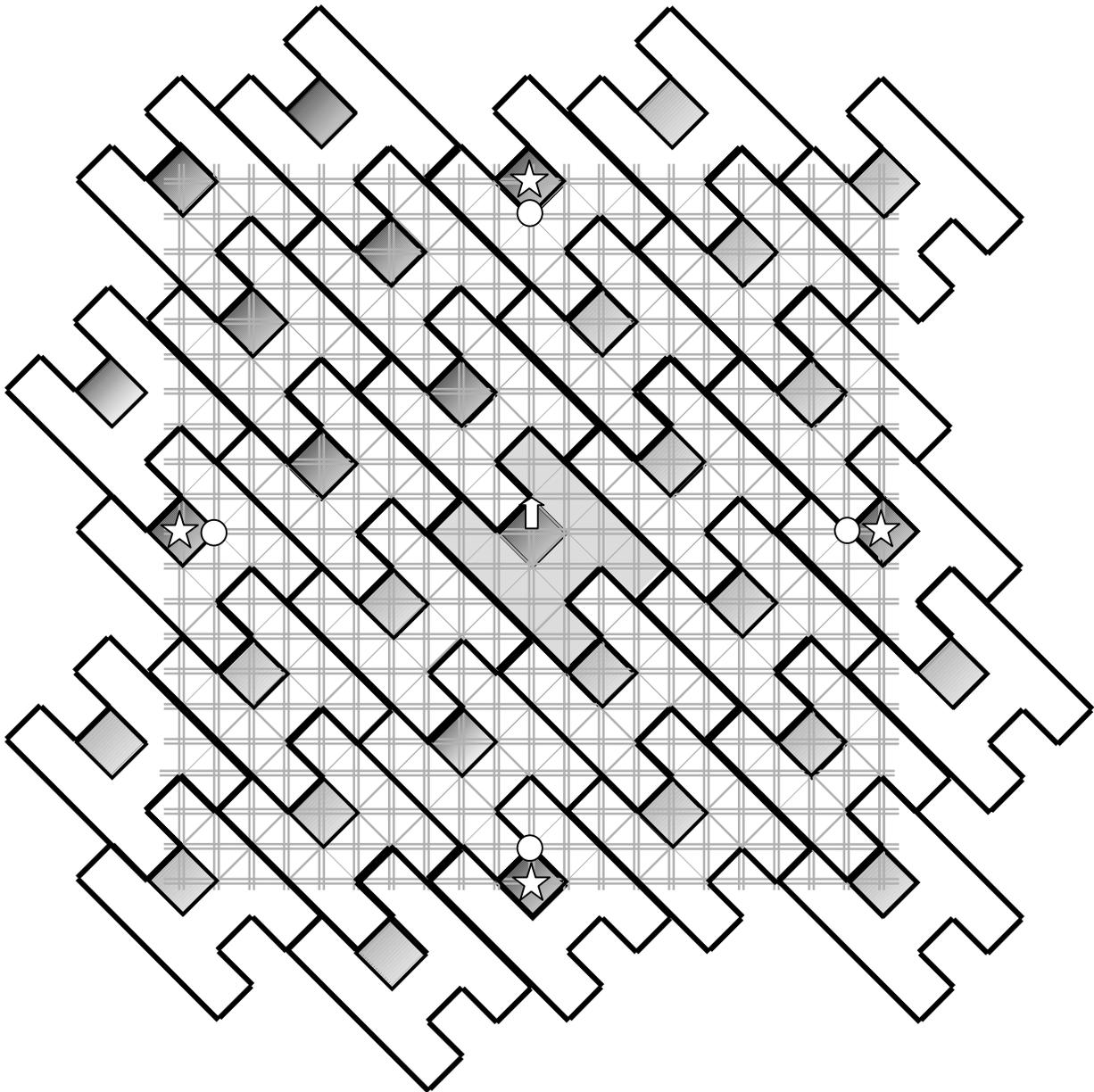


Figura 3.4 – Tesselação de clusters de 10 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 2:
“Não-Colineares Pares”

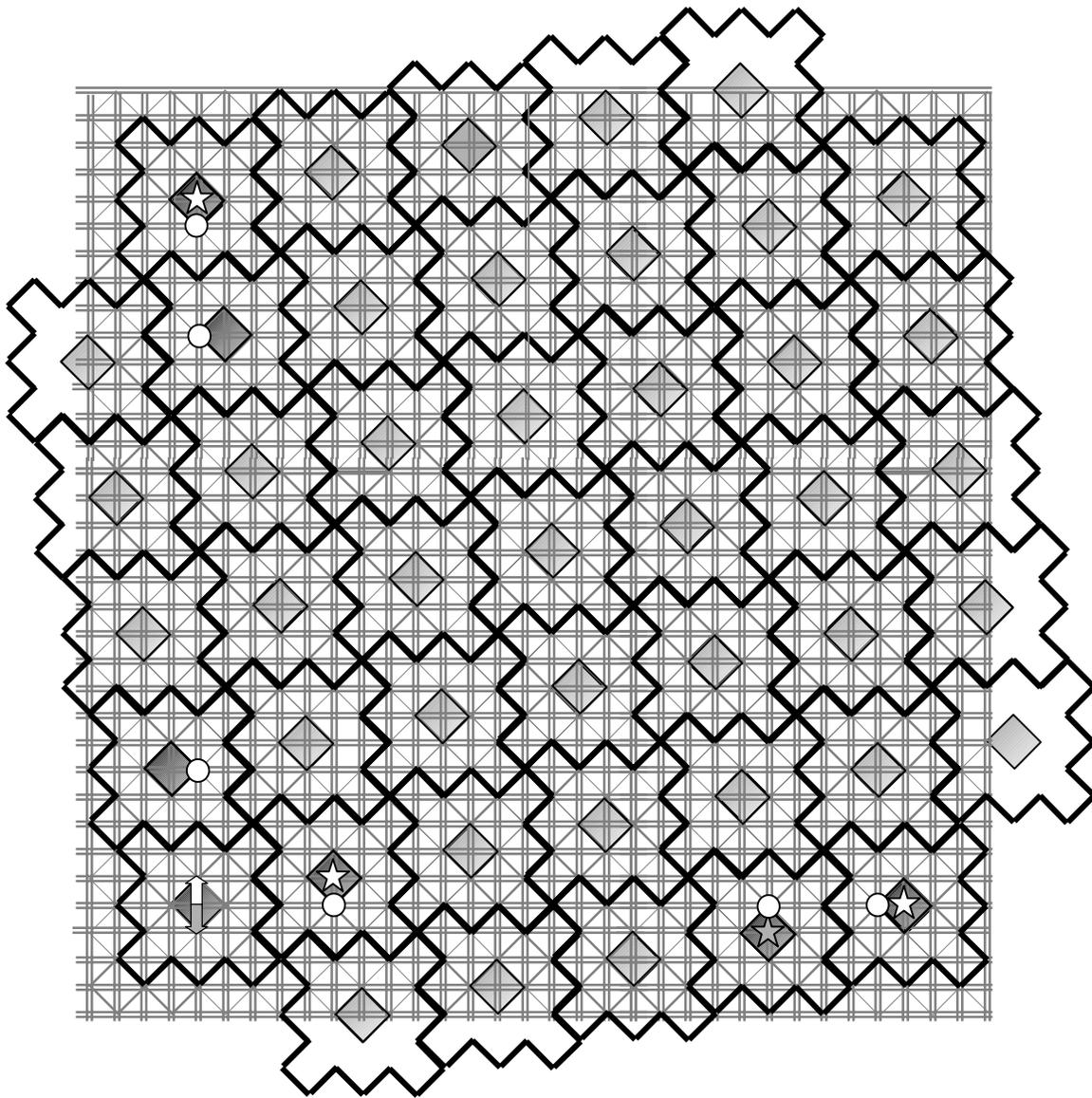


Figura 3.5 – Tesselação de clusters de 13 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 4: “Não-Colineares Primos”

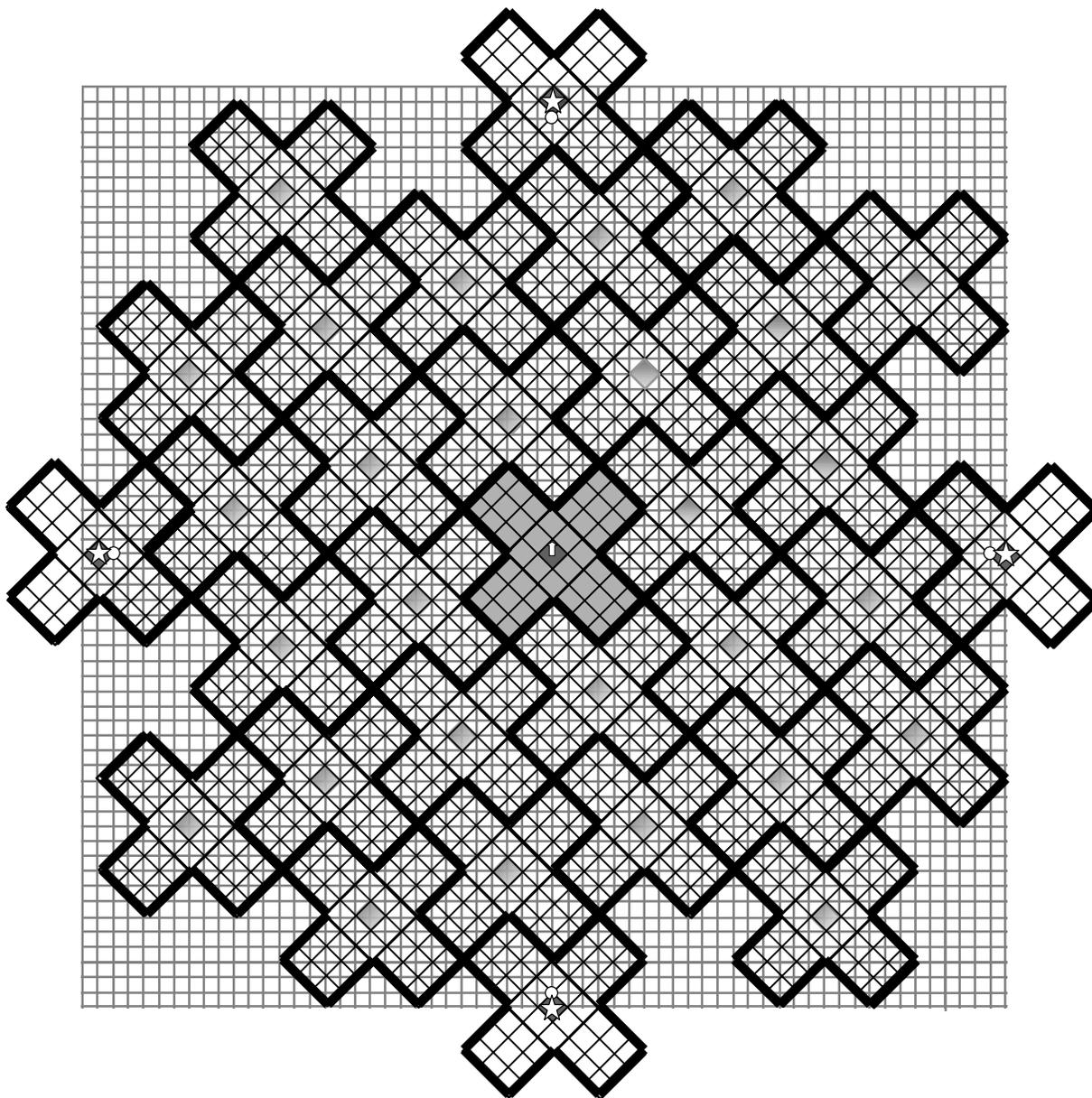


Figura 3.6 – Tesselação de clusters de 45 microcélulas; Cluster pertencente ao Grupo 3: “Não-Colineares Ímpares”

$$K_{LOS} = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad \text{Equação 3.2}$$

$$d_B = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde λ é o comprimento de onda do sinal transmitido, e h_t e h_r são, respectivamente, as alturas das antenas transmissora e receptora.

Temos, então, que a potência média do sinal tem um decaimento inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as antenas receptora e transmissora para distâncias menores que a de *breakpoint*, e um decaimento inversamente proporcional à quarta potência desta mesma distância para distâncias maiores que a de *breakpoint*.

Como podemos ver, a distância entre as antenas transmissora e receptora é de fundamental importância para o cálculo da perda de propagação do sinal. Portanto, na análise de desempenho de vários padrões de reuso microcelulares, um parâmetro de interesse é a distância entre a célula alvo, ou célula de referência, e os interferentes posicionados em uma co-célula da L -ésima camada. Definimos esse parâmetro como n_L . Nos cálculos mostrados a seguir, normalizamos este parâmetro com relação ao raio da célula como forma de facilitar sua manipulação. Assim, n_L é dado em número de raios de célula. Podemos observar que n_L é altamente dependente do padrão de reuso utilizado. Este pode ser obtido através de uma simples inspeção visual, como podemos ver claramente através das Figuras 3.1 a 3.6. No entanto, este método é válido para um número limitado de camadas. Na Seção 3.3 apresentamos uma formulação geral através da qual podemos encontrar todos os possíveis interferentes, e portanto utilizá-la para cálculos bem precisos de interferência.

Se definirmos r como

$$r = \frac{d}{R} \quad \text{Equação 3.4}$$

a distância entre a estação rádio base servidora e a estação móvel de interesse normalizada em relação ao raio R da célula ($0 < r \leq 1$), e k como

$$k = \frac{R}{d_B} \quad \text{Equação 3.5}$$

a razão entre o raio da célula e a distância de *breakpoint* d_B ($k \geq 0$), é possível mostrar que, para interferentes posicionados na condição de pior caso, a razão portadora interferência (C/I) para o enlace reverso (*uplink*) é dada por [YACOU98-A]

$$\frac{C}{I} = \frac{[1 + (rk)^2]^1}{4r^2 \sum_{L=1}^{\infty} n_L^{-2} [1 + (n_L k)^2]^1} \quad \text{Equação 3.6}$$

onde n_L é a distância entre os interferentes na L -ésima camada e a estação rádio base da célula alvo, dado em número de unidades de raio de célula.

Do mesmo modo, pode ser encontrada uma relação C/I para o enlace direto (*downlink*). No entanto, esta depende do posicionamento do móvel de interesse em relação à sua estação rádio base, pois, à medida este se distancia do centro da célula em direção radial, ou seja, para uma outra esquina, ele adquire uma nova linha de visada, sendo possível encontrar novas estações rádio base interferentes. Podemos ver claramente este fenômeno através da Figura 3.1. A célula alvo localiza-se exatamente no centro da figura, na qual existe uma flecha indicando a direção de deslocamento do móvel. Considerando apenas a primeira camada de interferentes, vemos que, se o móvel está bem próximo à sua estação rádio base servidora, ou seja, se está localizado no centro da célula, ele terá quatro interferentes em linha de visada: dois na rua em que ele se desloca, e dois em sua transversal (neste caso os interferentes são representados por estrelas, e são as estações rádio base das co-células). Todos os interferentes estão à mesma distância de 10 quadras. Se o móvel se deslocar para o interior da quadra, no sentido da flecha, vemos que os dois interferentes da rua transversal não se encontram mais em linha de visada com o móvel, e portanto não são mais levados em conta no cálculo de interferência. Neste caso, o móvel tem apenas dois interferentes em linha de visada na primeira camada. No entanto, quando o

móvel chega à esquina da borda da célula, vemos que dois novos interferentes de primeira camada aparecem em linha de visada na rua transversal àquela na qual o móvel se desloca. Estes interferentes não são mais simétricos em relação à célula alvo: um localiza-se a três quadras de distância, e outro a sete quadras.

Pode-se fazer uma análise parecida com os outros padrões de reuso encontrados nas Figuras 3.2 a 3.6. Observe que os interferentes novos que aparecem nas esquinas limítrofes das células estão presentes somente nos *clusters* de 5 e de 13 microcélulas. Os demais *clusters* não apresentam esses novos interferentes na esquina oposta à da estação rádio base servidora. Nesta posição, os interferentes em linha de visada são os mesmos que aqueles presentes quando o móvel se encontra no meio da rua. Veremos na Seção 3.3 que os *clusters* podem ser classificados em diferentes grupos, e que esses novos interferentes só aparecem em *clusters* com número primo de microcélulas.

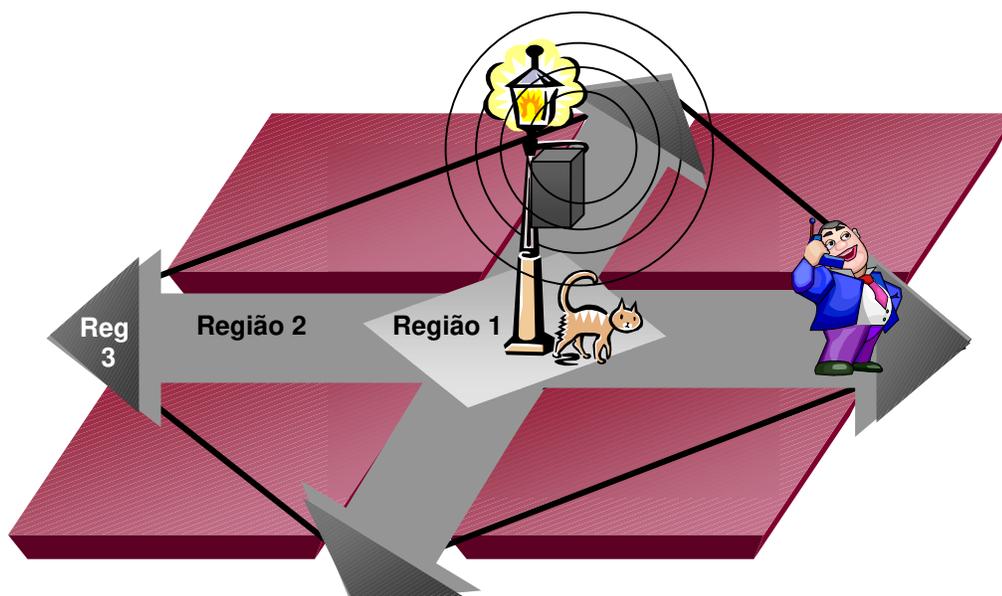


Figura 3.7 - Três Regiões com Diferentes Condições de Interferência para o Downlink

Temos então que a razão portadora/interferência para o *downlink* é altamente dependente da posição do móvel de interesse dentro de sua microcélula alvo. Podemos identificar, como ilustrado na Figura 3.7, três condições distintas de interferência referentes ao posicionamento do móvel ao longo da rua: na vizinhança da estação rádio base servidora

(região 1); entre a estação rádio base servidora e o limite da célula (região 2); na vizinhança do limite da célula (na esquina oposta àquela de sua estação rádio base servidora – região 3). Na Figura 3.7, estas regiões estão marcadas com diferentes tonalidades de cinza. Na primeira região, o móvel recebe um bom sinal de sua estação rádio base servidora, mas também tem um bom caminho de rádio para as estações rádio base interferentes nas duas ruas transversais que definem o centro da célula. Na segunda região o móvel entra na quadra e perde a linha de visada com os interferentes da rua perpendicular à qual ele se desloca. Na terceira e última região, o móvel chega à esquina oposta à da sua estação rádio base servidora, e, alcançando uma nova linha de visada, pode encontrar novos interferentes. Encontrará novos interferentes se o sistema microcelular em questão tiver um número primo de células por *cluster*, como é o caso dos *clusters* de 5 microcélulas e de 13 microcélulas, encontrados nas Figuras 3.1 e 3.5 respectivamente.

Assim, para o caso em que o móvel se encontra próximo à sua estação rádio-base servidora (região 1), mais especificamente, dentro do espaço pertencente ao cruzamento de duas ruas perpendiculares ($r \leq$ distância normalizada da estação rádio base ao começo da rua) a razão C/I é dada por [YACOU98-A]

$$\frac{C}{I} = \frac{[1 + (rk)^2]^{-1}}{r^2 \sum_{L=1}^{\infty} \left\{ (n_L + r)^{-2} [1 + (n_L + r)^2 k^2]^{-1} + (n_L - r)^{-2} [1 + (n_L - r)^2 k^2]^{-1} + 2(n_L^2 + r^2)^{-1} [1 + (n_L^2 + r^2) k^2]^{-1} \right\}}$$

Equação 3.7

Para o caso em que o móvel se encontra longe da vizinhança da sua estação rádio base servidora e longe também do limite da célula (região 2), ou seja, que corresponde a maior parte do caminho, a relação C/I é dada por [YACOU98-A]

$$\frac{C}{I} = \frac{[1 + (rk)^2]^{-1}}{r^2 \sum_{L=1}^{\infty} \left\{ (n_L + r)^{-2} [1 + (n_L + r)^2 k^2]^{-1} + (n_L - r)^{-2} [1 + (n_L - r)^2 k^2]^{-1} \right\}}$$

Equação 3.8

Finalmente, para *clusters* com número primo de microcélulas e para o móvel localizado no limite da célula (região 3: $(1-r) \leq$ distância normalizada da estação rádio base ao começo da rua) a relação C/I é dada por [GOMEZ99]

$$\frac{C}{I} = \frac{[1+(rk)^2]^{-1}}{r^2 \left[\sum_{L=1}^{\infty} \left\{ (n_L+r)^{-2} [1+(n_L+r)^2 k^2]^{-1} + (n_L-r)^{-2} [1+(n_L-r)^2 k^2]^{-1} \right\} + (\bar{n}_L^2 + \bar{r}^2)^{-1} [1+(\bar{n}_L^2 + \bar{r}^2)k^2]^{-1} \right]} \quad \text{Equação 3.9}$$

onde $\bar{r} = 1-r$, n_L e \bar{n}_L são definidos na Seção 3.3.

Vale ressaltar que, para *clusters* com número não-primo de células, a equação utilizada para o cálculo da razão portadora/interferência para o enlace direto quando o móvel de interesse está próximo à borda da célula é a mesma daquela utilizada para quando o móvel se localiza no meio da quadra, ou seja, utiliza-se a Equação 3.8, e não a Equação 3.9.

3.3 Posicionamento dos Interferentes

Para conseguir um resultado preciso da relação portadora/interferência falta ainda uma fórmula geral para a determinação dos valores de n_L . No caso das macrocélulas, que utilizam mosaicos de células hexagonais, a distância entre uma célula e sua interferente é ditada diretamente pelo número de células no *cluster* e pelo raio da célula. Já no caso das microcélulas, como a radiação das antenas não se dá por igual em todas as direções, as distâncias variam de acordo com o tipo de tesselação. Por exemplo, em uma tesselação tortuosa, o bloqueio de sinais vindos de co-células é maior do que no caso em que todas as co-células são colineares, e portanto apresentam interferentes mais distantes.

Os padrões de reuso de células quadradas foram divididos em quatro grupos, dentre os quais existe uma regra comum de disposição das co-células interferentes. Nas Figuras 3.1 a 3.6 encontra-se pelo menos um membro de cada um desses grupos.

Sabe-se que o número de microcélulas num *cluster* é dado por $N = i^2 + j^2$, onde $\{i, j\} \in Z$, Z sendo definido como o conjunto dos números inteiros [YACOU2001-A]. Definamos, primeiramente, os tipos de tesselações colineares e não-colineares.

- Colineares $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \sqrt{N} \in Z, \text{ isto é, } i = 0 \text{ ou } j = 0 \quad (\text{clusters quadrados}) \\ \text{ou} \\ \bullet i = j, \text{ isto é, } N = 2x^2 \text{ onde } x \in Z \end{array} \right.$
- Não-Colineares $\left\{ \begin{array}{l} \bullet N \text{ é um número par, ou} \\ \bullet N \text{ é um número ímpar não primo, ou} \\ \bullet N \text{ é um número primo} \end{array} \right.$

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram tesselações do primeiro caso (*clusters* de 8 e 9 células), em que todas as co-células são colineares. Isto ocorre sempre que N for um quadrado perfeito, ou o dobro de um quadrado perfeito. Em particular, a Figura 3.3 mostra o caso em que $N = 9 = 3^2$, e portanto é um quadrado perfeito, e a Figura 3.2 mostra o caso em que $N = 8 = 2^2 + 2^2$, e que portanto é o dobro de um quadrado perfeito. Em qualquer outro caso, a tesselação é não-colinear, ou seja, nem todas as co-células encontram-se na mesma linha de visada. Dentre as tesselações não colineares separam-se ainda aquelas que têm número primo, número par, e número ímpar mas não primo de células em um *cluster*. O grupo de números primos de células é representado nas Figuras 3.1 e 3.5, por tesselações de *clusters* de 5 e 13 microcélulas respectivamente, e caracteriza-se por ter novos interferentes à medida em que o móvel se aproxima da esquina oposta à da sua estação rádio base servidora. Os grupos de tesselações não colineares com número par e ímpar não-primo de células em um *cluster* são representados, respectivamente nas Figuras 3.4 por uma tesselação de *clusters* de 10 microcélulas e 3.6 por uma tesselação de *clusters* de 45 microcélulas.

Note, então, que existem quatro grupos de clusters, que sejam: **colineares**, **não-colineares pares**, **não-colineares ímpares-não-primos**, e **não-colineares primos**. Para cada um destes grupos, a distância entre o centro da célula alvo e de um interferente localizado na L-

ésima camada de co-células, é calculada de forma diferente. Como definido anteriormente tal distância é n_L , dada com valores normalizados em relação ao raio da célula, ou seja, n_L é dado em número de raios de célula. As relações abaixo mostram a distância entre o centro da célula alvo e seus interferentes dada para os móveis localizados na situação de pior caso. Vale a pena ressaltar que a distância do móvel de interesse ao centro da célula alvo e a correção da distância dos interferentes ao móvel de interesse (e não ao centro da célula alvo) são levadas em conta nas Equações 3.6 a 3.9. O valor de n_L refere-se sempre à distância ao centro da célula de referência.

A seguir, encontra-se, para cada grupo de padrão de reuso, a distância n_L entre a célula alvo e seus interferentes tanto para o enlace direto (*downlink*), quanto para o enlace reverso (*uplink*). A distância mínima entre co-células alinhadas será representada pela variável d_{\min} , e seu valor dado em número de unidades de raio de célula. Nas relações apresentadas a seguir definiremos a variável k de maneira distinta daquela que vem sendo utilizada até agora. Somente para esta seção da tese utilizaremos k como sendo qualquer número inteiro.

Posicionamento dos interferentes para padrões de reuso microcelulares: (obs: $k \in \mathbb{Z}$)

Grupo 1: Colineares

Neste caso, utilizamos a variável m como sendo $m = i$ ou $m = j$, sendo a escolha entre os dois dada para qualquer valor não nulo.

- $d_{\min} = 2m$
- *Uplink*: $n_k = 2mk - 1$
- *Downlink*: $\begin{cases} \text{Região 1: } n_k = 2mk \\ \text{Região 2: } n_k = 2mk \end{cases}$

Grupo 2: Não-colineares Pares

- $d_{\min} = N$
- Uplink: $n_k = Nk - 1$
- Downlink: $\begin{cases} \text{Região 1: } n_k = Nk \\ \text{Região 2: } n_k = Nk \end{cases}$

Grupo 3: Não-Colineares Ímpares-Não-Primos

Define-se N' como $N' = \frac{N}{m}$, $m \in \mathbb{Z}$. Então

- $d_{\min} = m \times d_{\min(N')}$

onde $d_{\min(N')}$ é a distância mínima entre co-células alinhadas para o mesmo padrão de reuso N' .

Grupo 4: Não-Colineares Primos

Definimos p como sendo o número primo imediatamente anterior a N , que seja dado pela relação $p = i^2 + j^2$, à exceção de $N = 5$, para o qual $p = 3$.

- $d_{\min} = 2N$
- Uplink: $\begin{cases} n_{3(k-1)+1} = p + 2N(k-1) \\ n_{3(k-1)+2} = 2N - p + 2N(k-1) \\ n_{3(k-1)+3} = 2Nk - 1 \end{cases}$

- Downlink: $\begin{cases} \text{Região 1: } n_k = 2Nk \\ \text{Região 2: } n_k = 2Nk \\ \text{Região 3: } \begin{cases} n_k = 2Nk \\ \bar{n}_{2(k-1)+1} = p + 2N(k-1) \\ \bar{n}_{2(k-1)+2} = 2N - p + 2N(k-1) \end{cases} \end{cases}$

Note que somente o Grupo 4 possui as distâncias dos interferentes para o enlace direto no caso em que o móvel chega ao limite da célula, adquirindo nova linha de visada, e novos interferentes. Este é o único caso que faz uso da Equação 3.9. Todos os outros grupos de padrões de reuso utilizam a Equação 3.8 para o cálculo da razão C/I para o móvel nesta posição. Isto se dá porque para os três primeiros grupos de padrões de reuso não existem novos interferentes quando o móvel adquire essa nova linha de visada.

O Grupo 3 acima consiste de padrões microcelulares formados pela composição de outros padrões de reuso já existentes. Vemos pela Figura 3.6, na qual encontra-se a tesselação de *clusters* de 45 microcélulas, que estes são formados por 5 grupos de *clusters* de 9 microcélulas. Inclusive, o formato em cruz do *cluster* é o mesmo que o *cluster* de 5 microcélulas. Os interferentes, então, ficam a uma distância igual a 5 vezes aquela dos interferentes em sistemas com *clusters* de 9 microcélulas.

3.4 Um Exemplo de Aplicação

O modelo de análise de desempenho apresentado na Seção 3.2 foi aplicado a vários padrões de reuso microcelulares. Nesta seção são esboçados os resultados da razão portadora/interferência (C/I) relativos aos *clusters* com 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas. O desempenho foi avaliado para o móvel partindo do centro da célula alvo em direção à sua borda, indicado por uma seta na célula alvo das Figuras 3.1 a 3.5. Nas Figuras 3.1 a 3.5 temos também marcadas em cinza escuro as co-células que em algum momento irão interferir com o sinal do móvel ou da estação rádio base de interesse. As outras células em cinza claro também são co-células, mas não entram no cálculo de desempenho por estarem sempre obstruídas em relação à célula alvo. Os cálculos apresentados foram feitos considerando os parâmetros do sistema apresentados na Tabela 3.1.

Note pelos valores apresentados na Tabela 3.1 que $k = 1,405$ indica que o raio da célula é 40.5% maior que a distância de *breakpoint*. Portanto, temos que o sinal apresenta

decaimento proporcional ao inverso da distância elevada à quarta potência dentro da própria célula.

Sistema Microcelular Estudado	
Raio da microcélula (R)	100m
Largura da rua	15m
Altura da antena transmissora (h_t)	4m
Altura da antena receptora (h_r)	1,5m
Frequência de operação (f) e ($\lambda = 300 / f$)	890MHz
K_{LOS} (obtido pela Equação 3.2)	1,537m ²
d_B (obtido pela Equação 3.3)	71,2m
k (obtido pela Equação 3.5)	1,405

Tabela 3.1– Parâmetros utilizados para o cálculo de desempenho do sistema microcelular na Banda Celular

Outro fator importante a ser mencionado, é que para este sistema foram feitos os cálculos de desempenho levando em conta um número infinito de interferentes (na prática, foram utilizadas 600 camadas de co-células interferentes). Para isto utilizaram-se as relações de distâncias de interferentes encontradas na Seção 3.3.

As Figuras 3.8 e 3.9 mostram, respectivamente, o desempenho de pior caso dos enlaces direto e reverso em função da distância da estação rádio base normalizada com relação ao raio da célula para *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas.

Podemos ver que o comportamento do *downlink* e do *uplink* são bastante diferentes. A curva de desempenho do *uplink* em todos os casos de padrões de reuso apresentados, é contínua, enquanto que a curva de desempenho do *downlink* apresenta sempre uma ou duas “quebras” ao longo do caminho. Isto deve-se ao fato do *uplink* apresentar sempre os mesmos interferentes. Neste caso, varia apenas a potência do sinal do móvel de interesse à medida que este se afasta da sua estação rádio-base servidora. A potência dos interferentes é sempre a mesma já que consideramos infinitos interferentes fixos na posição de maior interferência, e com os canais sempre ativos. Já o *downlink* apresenta novos interferentes dependendo da posição do móvel dentro de sua microcélula. Note que para todos os padrões de reuso existe um salto na curva de desempenho para a distância de 7,5m

(distância normalizada = 0.075) da estação rádio base. Como consideramos as estações rádio base no centro do cruzamento das ruas, e a largura das ruas como sendo de 15m, este é o ponto em que o móvel entra na quadra, e portanto deixa de ter condição LOS para os interferentes da rua perpendicular àquela na qual ele se desloca. Portanto, neste ponto existe uma melhora no desempenho da razão (C/I). Logicamente, o sinal a partir deste ponto volta a decair, pois o móvel está se afastando de sua estação rádio base servidora. Para os casos dos *clusters* de 5 e 13 microcélulas, notamos também uma “quebra” na curva de desempenho em 92,5m (distância normalizada = 0.925) do centro da célula. Neste ponto, no entanto, o salto é negativo, mostrando uma piora substancial na razão (C/I). Isto porque este é o ponto em que o móvel chega na esquina oposta, adquirindo nova linha de visada. Como mencionado anteriormente, neste ponto os *clusters* de número primo de células experimentam a interferência de novas co-células, e se analisarmos as relações de distância de interferentes apresentadas na Seção 3.3, podemos ver que estas estão mais próximas do que qualquer um dos outros interferentes já presentes. Vemos pelos gráficos da Figura 3.9 que este comportamento não ocorre para os demais padrões de reuso.

Em geral, quanto maior o *cluster*, melhor a razão portadora/interferência (C/I), como seria de se esperar. No entanto, um sistema com *clusters* de 5 microcélulas tem um comportamento bastante destacável, com sua relação (C/I) coincidindo com a de um sistema com *clusters* de 8 microcélulas para o enlace reverso (curva mais abaixo na Figura 3.8) e com a de um sistema com *clusters* de 10 microcélulas para o enlace direto na maior parte de extensão do caminho percorrido pelo móvel (curva logo abaixo da curva superior na Figura 3.9), ocorrendo uma separação das curvas somente no limite da microcélula, onde dois novos interferentes aparecem em condição de linha de visada no sistema com *clusters* de 5 microcélulas. Vemos, no entanto, que sistemas com padrão de reuso de 13 células por *cluster* não parecem uma boa escolha, pois possuem o mesmo desempenho de um sistema com *clusters* de 9 microcélulas, e uma menor capacidade de tráfego que o mesmo. Isso ocorre porque a primeira camada de interferentes nos dois casos se encontra a 5 quadras de distância da microcélula alvo. Porém, antes de tomar qualquer decisão com relação a qual padrão de reuso utilizar, é necessário analisar situações mais realistas, como a apresentada no Capítulo 4 desta tese.

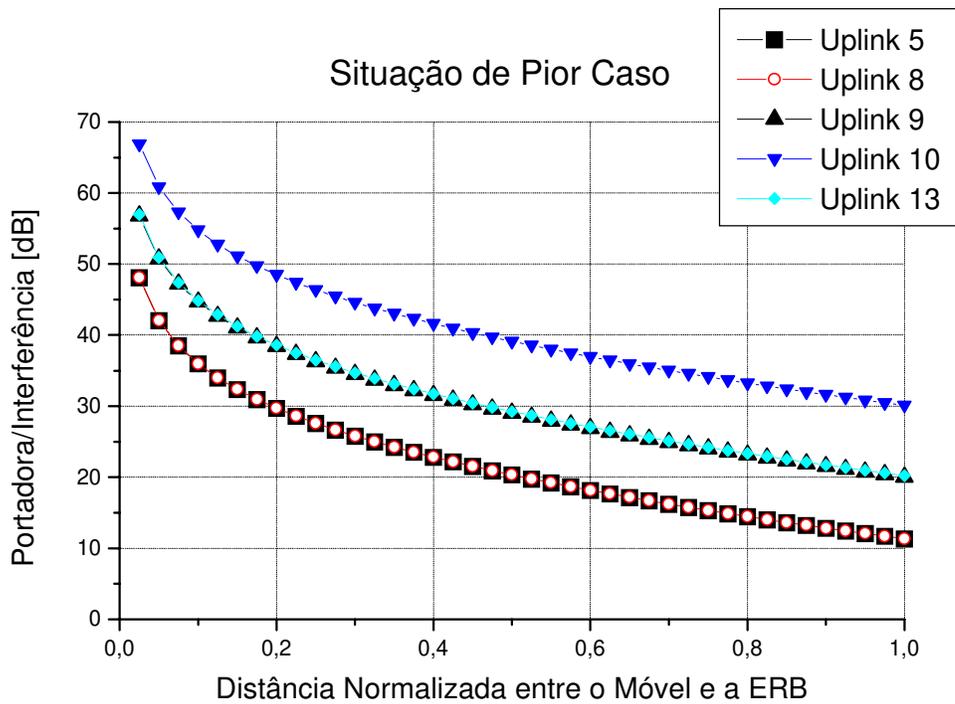


Figura 3.8 – Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13.

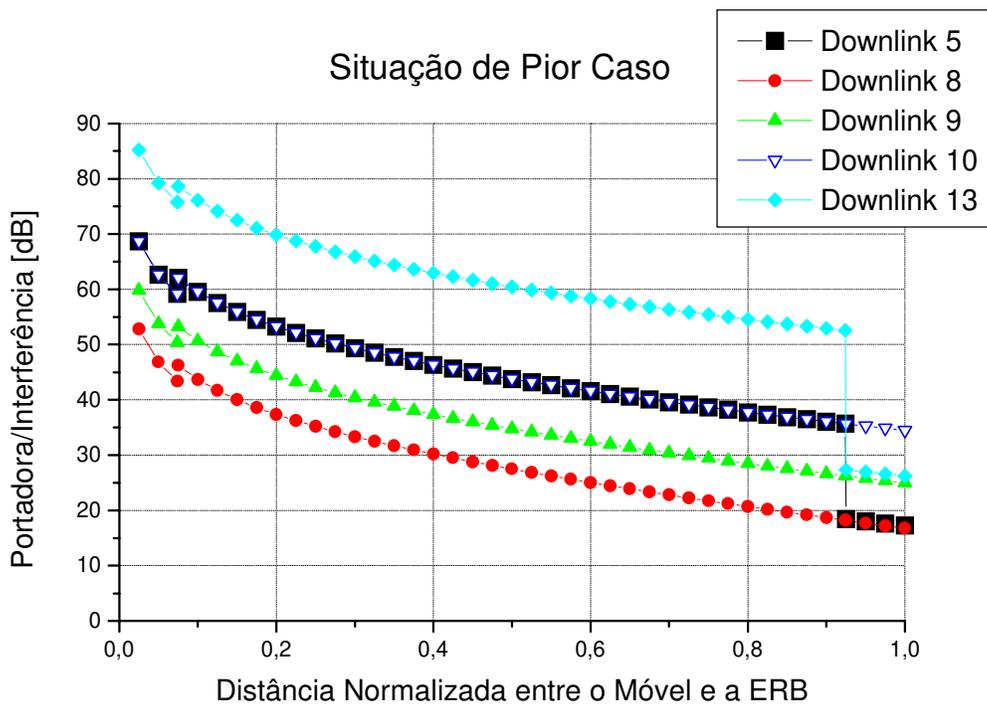


Figura 3.9– Razão Portadora/Interferência do enlace direto em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13.

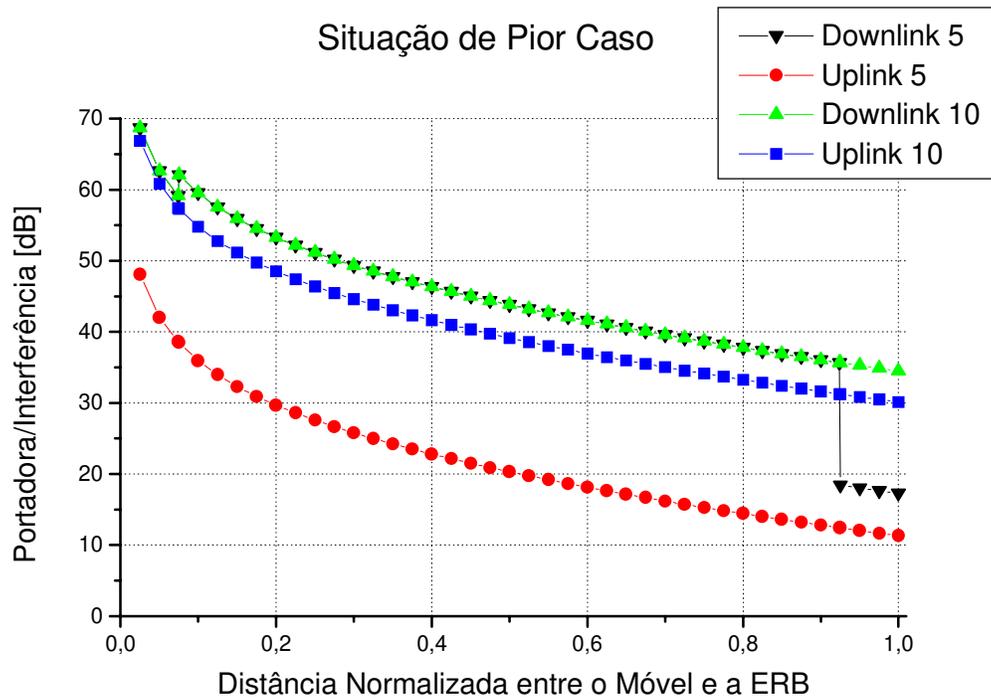


Figura 3.10 – Comparação da razão Portadora/Interferência de um sistema microcelular entre os enlaces reverso e direto dos padrões de reuso 5 e 10.

Existe uma grande diferença entre o desempenho do *uplink* e do *downlink*, que fica mais evidente através das Figuras 3.11 a 3.15. Esta diferença se torna progressivamente menor a medida que o tamanho do cluster aumenta. Também podemos visualizar este fato através da Figura 3.10, na qual são comparados os desempenhos de sistemas com *clusters* de 5 e 10 microcélulas, tanto para o *uplink* como para o *downlink*.

3.5 Resultados Considerando uma Única Camada de Interferentes

Nesta seção examinamos a influência do número de camadas de co-células interferentes no resultado do desempenho do sistema microcelular [GOMEZ99]. Para tanto, analisamos o desempenho de uma rede microcelular com uma única camada de interferentes (a mais próxima): $L = 1$ nas Equações 3.6 a 3.9. Neste caso, as equações da razão C/I são muito simplificadas e de fácil manipulação.

Temos então que, considerando uma única camada de interferentes e para interferentes posicionados na condição de pior caso, a razão portadora/interferência (C/I) para o enlace reverso (*uplink*) é dada por

$$\frac{C}{I} = \frac{n_1^2 [1 + (n_1 k)^2]}{4r^2 [1 + (rk)^2]} \quad \text{Equação 3.10}$$

Para o caso em que o móvel se encontra próximo à sua estação rádio-base servidora (região 1), mais especificamente, dentro do espaço pertencente ao cruzamento de duas ruas perpendiculares ($r \leq$ distância normalizada da estação rádio base ao começo da rua) a razão C/I é dada por

$$\frac{C}{I} = \frac{[1 + (rk)^2]^1}{r^2 \left\{ (n_1 + r)^{-2} [1 + (n_1 + r)^2 k^2]^1 + (n_1 - r)^{-2} [1 + (n_1 - r)^2 k^2]^1 + 2(n_1^2 + r^2)^{-1} [1 + (n_1^2 + r^2) k^2]^1 \right\}} \quad \text{Equação 3.11}$$

Para o caso em que o móvel se encontra longe da vizinhança da sua estação rádio base servidora e longe também do limite da célula (região 2), que corresponde a maior parte do caminho, a relação C/I é dada por

$$\frac{C}{I} = \frac{[1 + (rk)^2]^1}{r^2 \left\{ (n_1 + r)^{-2} [1 + (n_1 + r)^2 k^2]^1 + (n_1 - r)^{-2} [1 + (n_1 - r)^2 k^2]^1 \right\}} \quad \text{Equação 3.12}$$

Finalmente, para *clusters* com número primo de microcélulas e para o móvel localizado no limite da célula (região 3: $(1 - r) \leq$ distância normalizada da estação rádio base ao começo da rua) a relação C/I é dada por

$$\frac{C}{I} = \frac{[1 + (rk)^2]^{-1}}{r^2 \left\{ \left[(n_1 + r)^{-2} [1 + (n_1 + r)^2 k^2]^{-1} + (n_1 - r)^{-2} [1 + (n_1 - r)^2 k^2]^{-1} \right] + (\bar{n}_1^2 + \bar{r}^2)^{-1} [1 + (\bar{n}_1^2 + \bar{r}^2) k^2]^{-1} \right\}} \quad \text{Equação 3.13}$$

onde $\bar{r} = 1 - r$, e n_1 e \bar{n}_1 são definidos na Seção 3.3. No entanto, podem também ser encontrados na Tabela 3.2.

Devemos lembrar que para sistemas que fazem uso de *clusters* com número não-primo de microcélulas, vale a Equação 3.12 para o cálculo do desempenho do *downlink* tanto na região 2 como na região 3.

		n_1 ou \bar{n}_1				
		<i>Cluster 5</i>	<i>Cluster 8</i>	<i>Cluster 9</i>	<i>Cluster 10</i>	<i>Cluster 13</i>
<i>Uplink</i>		3	3	5	9	5
<i>Downlink</i>	Região 1	10	4	6	10	26
	Região 2	10	4	6	10	26
	Região 3	3	4	6	10	5

Tabela 3.2 – Distâncias da primeira camada de interferentes ao centro da célula alvo para os diferentes padrões de reuso

As Figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15 a seguir mostram o desempenho dos enlaces direto e reverso em função da distância da estação rádio base normalizada com relação ao raio da célula para o sistema com uma única camada de interferentes e o sistema com um número infinito de interferentes, respectivamente, para *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 células. Nos gráficos, as linhas cheias correspondem aos resultados do caso que considera infinitos interferentes e as linhas pontilhadas representam os resultados com os cálculos simplificados, ou seja, utilizando uma única camada de interferentes. As curvas com maior relação C / I referem-se sempre ao *downlink*.

A análise do desempenho foi feita na Seção 3.4. O objetivo aqui é mostrar a validade de uma aproximação de cálculo, mostrando que a primeira camada de interferentes tem um peso muito maior do que as outras.

Analisando-se os gráficos das Figuras 3.11 a 3.15 e os resultados numéricos correspondentes, podemos observar que a diferença entre os valores obtidos de C/I para os dois casos é praticamente imperceptível. Uma média dessa diferença para as distintas distâncias é mostrada na Tabela 3.3, e a maior diferença encontrada considerando todos os padrões de reuso analisados é menor que 0.35dB. Assim, consideramos o cálculo utilizando uma única camada de interferentes como uma boa aproximação do cálculo de relação portadora/interferência (C/I) com os interferentes localizados na situação de pior caso, e com o sistema funcionando a plena carga.

Pela Tabela 3.3 pode-se verificar com maior detalhe a pequena diferença em considerar uma única camada de interferentes ou infinitos interferentes para o cálculo da relação portadora/interferência.

Um fato interessante observado é que para o *uplink* essa diferença é constante à medida que o móvel se afasta de sua estação rádio base servidora devido à simetria dos interferentes. Isso já não ocorre para o *downlink*.

	<i>Uplink (dB)</i>	<i>Downlink (dB)</i>
<i>Cluster de 5 células</i>	0.227	0.331
<i>Cluster de 8 células</i>	0.188	0.307
<i>Cluster de 9 células</i>	0.233	0.325
<i>Cluster de 10 células</i>	0.275	0.336
<i>Cluster de 13 células</i>	0.026	0.320

Tabela 3.3 - Média dos Erros entre o método exato e aproximado do cálculo de C/I

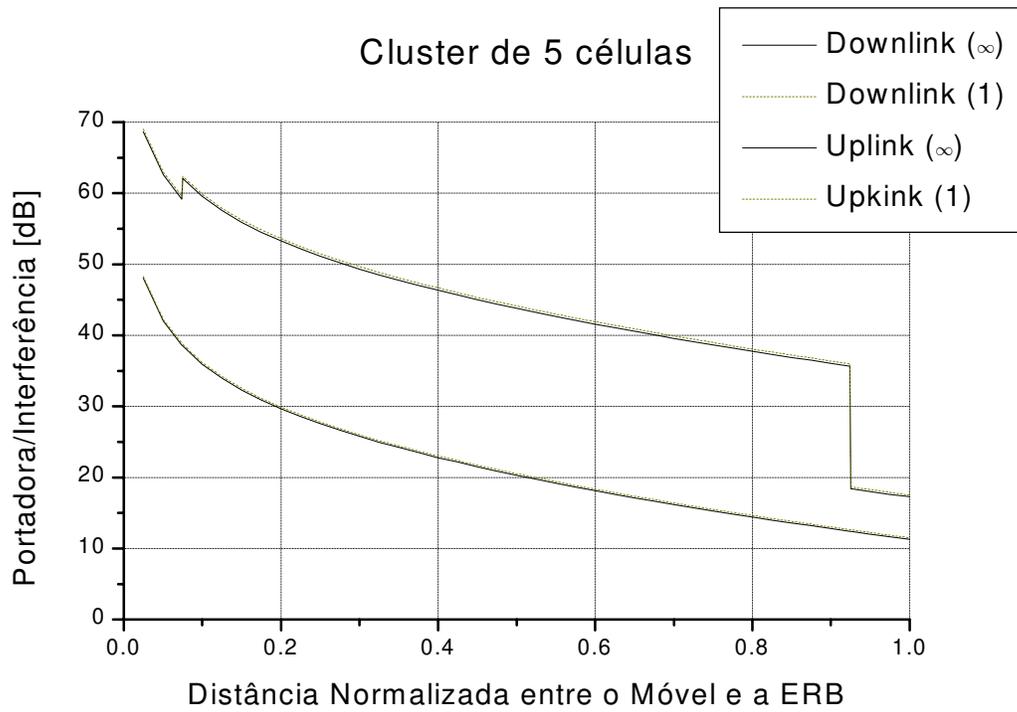


Figura 3.11 – Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 5.

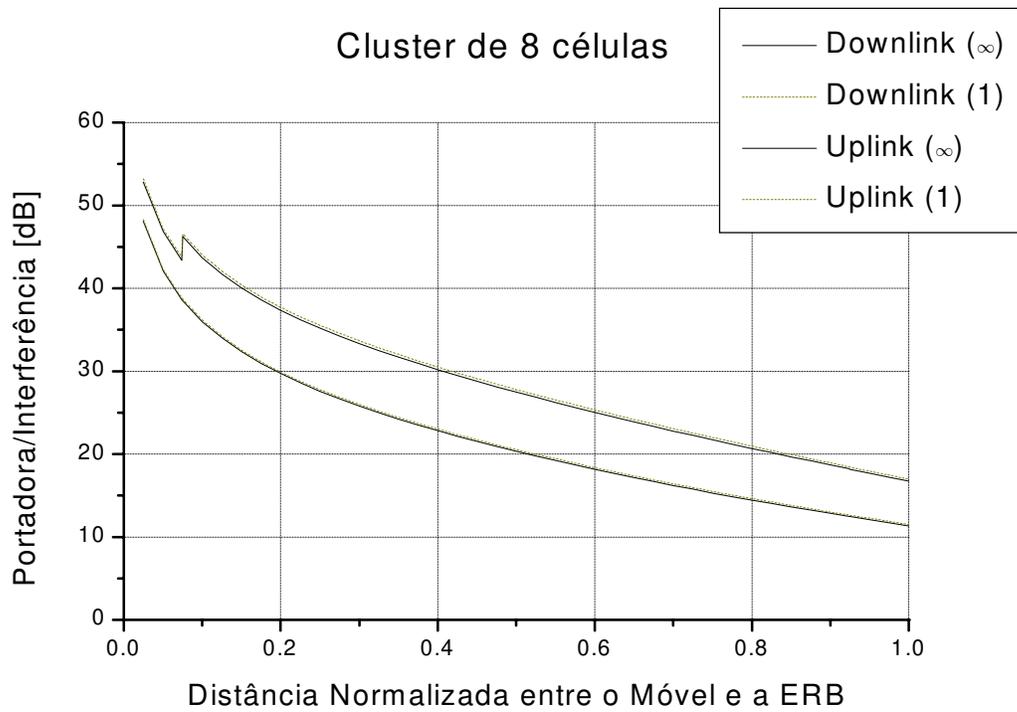


Figura 3.12 – Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 8.

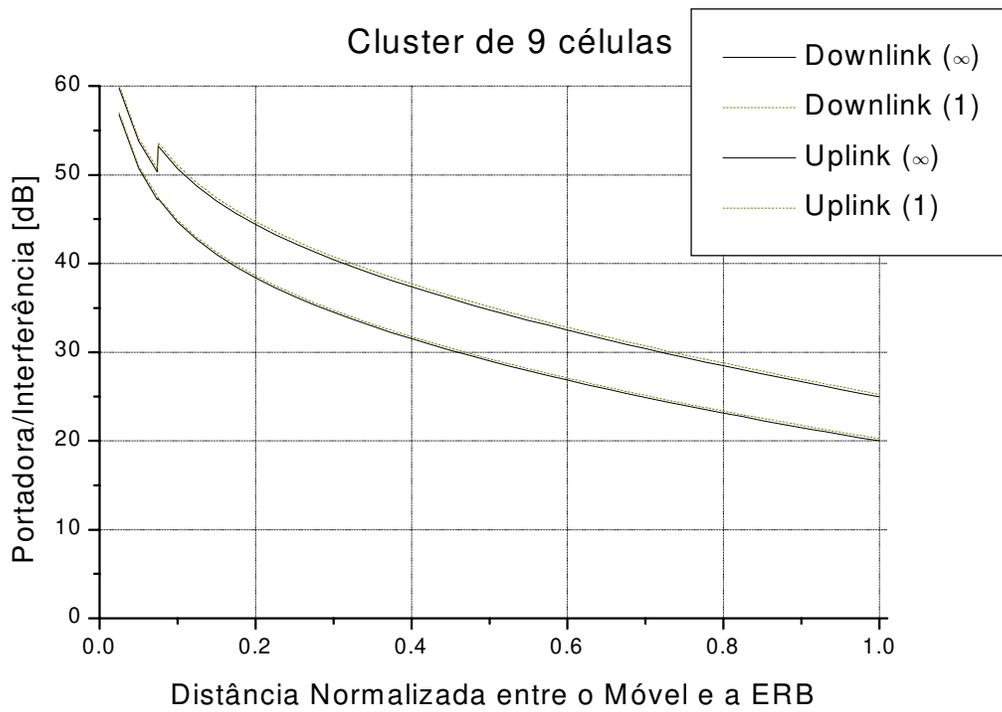


Figura 3.13 – Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 9.

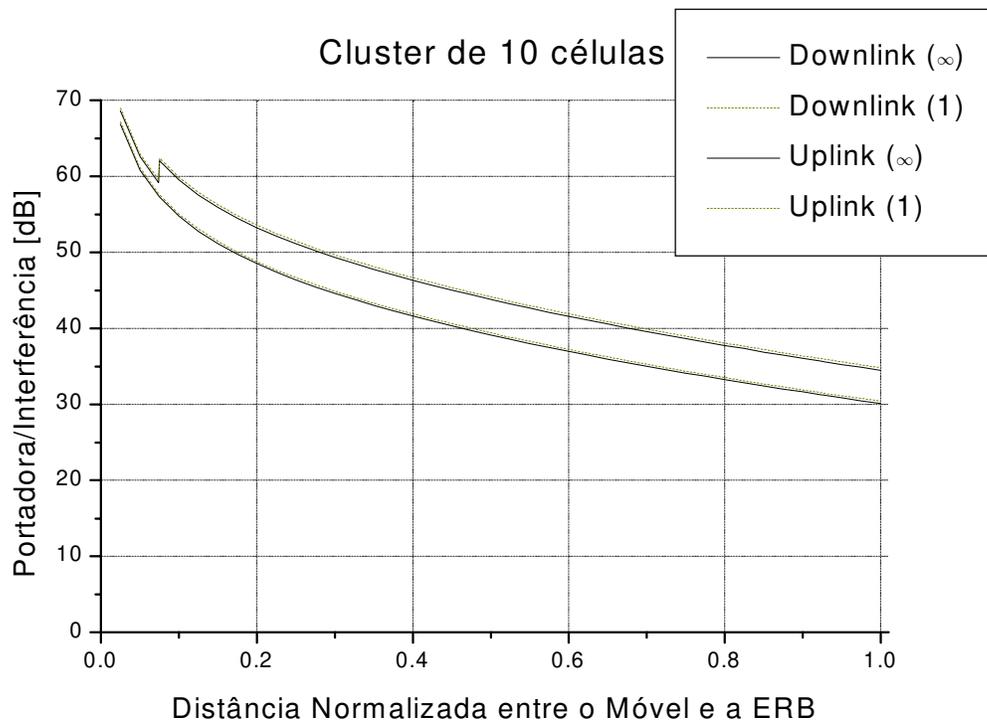


Figura 3.14 – Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 10.

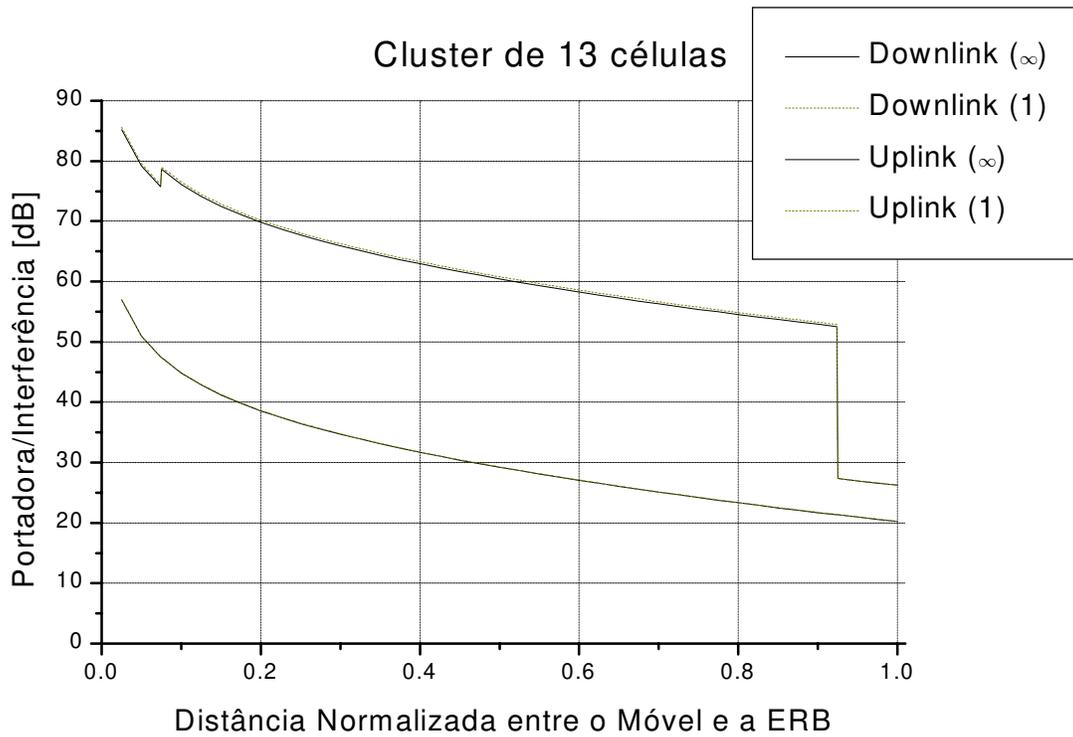


Figura 3.15 – Comparação do desempenho de um sistema microcelular considerando-se um número infinito de interferentes, e uma única camada de interferentes, para um sistema com padrão de reuso 13.

3.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas fórmulas fechadas para o cálculo exato da relação portadora/interferência C/I para o novo padrão de reuso microcelular baseado em células quadradas proposto no Capítulo 2, considerando-se os móveis posicionados na condição de pior caso e o sistema operando em carga plena. Foram apresentados resultados baseados nessas fórmulas, para sistemas com *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas. Os resultados mostram uma diferença substancial de desempenho para os enlaces reverso e direto, com o primeiro desempenhando-se menos satisfatoriamente que o último. Essa diferença tende a diminuir à medida que o número de células no *cluster* aumenta (havendo, no entanto, alguns casos particulares).

Para conseguir um resultado preciso da relação portadora/interferência foi necessário criar-se uma formulação geral para a determinação dos valores das distâncias entre os interferentes da L-ésima camada e a célula alvo. Como em sistemas microcelulares a radiação das antenas não se dá por igual em todas as direções, as distâncias variam de acordo com o tipo de tesselação. Os padrões de reuso de células quadradas foram divididos em quatro grupos, dentro dos quais foi desenvolvida a uma regra comum de disposição das co-células interferentes.

Observou-se que sistemas com *clusters* de 9 e 10 microcélulas apresentam um desempenho excelente e que, se explorado de forma apropriada, pode-se encontrar uma notável compensação entre capacidade e interferência para sistemas com *clusters* de 5 microcélulas. Este padrão de reuso apresenta desempenho igual ao de sistemas com *clusters* de 8 microcélulas para o *uplink*, e igual ao de sistemas com *clusters* de 10 células para a maior parte de trajetória na microcélula para o *downlink*, piorando muito na esquina limítrofe da microcélula. No entanto, não podemos nos esquecer que estamos considerando neste capítulo somente o pior caso, e que, para a geometria aqui explorada, e como veremos no próximo capítulo, este ocorre para sistemas com padrões de reuso não primos, com probabilidade de $(7 \times 10^{-2})^C$, onde C é o número de camadas interferentes sendo consideradas. Para padrões de reuso primos, esta probabilidade é muito mais baixa, pois a maior parte das co-células interferentes possui uma única esquina em linha de visada. Esta probabilidade passa a ser, então, de $(1,5 \times 10^{-7})^{C_1} \times (17 \times 10^{-2})^{C_2}$, onde C_1 é o número de camadas de co-células interferentes consideradas que possuem somente uma esquina em visada, e C_2 é o número de camadas de co-células interferentes consideradas que possuem uma rua inteira em visada. Portanto, espera-se resultados melhores se considerados a distribuição aleatória dos móveis e a ocupação dos canais. Estes casos serão considerados no próximo capítulo.

Também foram apresentados resultados de desempenho para sistemas microcelulares através de um cálculo aproximado. Este levou em conta uma única camada de interferentes, sendo esta a mais próxima possível da microcélula alvo. Os resultados desta aproximação foram comparados com resultados obtidos considerando-se um número infinito de

interferentes. A comparação mostra que a influência das camada mais próxima de interferentes é muito maior que a das outras camadas, validando a aproximação dos cálculos. Portanto, para a situação de pior caso, a razão C/I pode ser estimada considerando-se somente a primeira camada de interferentes. Neste caso, as equações para o cálculo da razão portadora/interferência são extremamente simplificadas.

Capítulo 4

Limite Superior de Desempenho

4.1 Introdução

No capítulo anterior fizemos uma análise do desempenho de sistemas microcelulares para a situação de pior caso, ou seja, os móveis posicionados na situação de maior interferência e o sistema operando em carga plena. Para esta análise foram apresentadas fórmulas fechadas da relação portadora/interferência (C/I). Os resultados mostram que, mesmo para esta condição tão desfavorável, alguns dos padrões de reuso propostos, como os de 5 microcélulas por *cluster*, apresentam um desempenho promissor. Foi mostrado também que o cálculo da interferência para o pior caso pode ser muito simplificado, utilizando-se apenas

a camada mais próxima de co-microcélulas interferentes, obtendo-se resultados com margens de erro muito pequenas.

Neste capítulo, a investigação foi aprofundada analisando-se uma situação mais realista. Esta situação caracteriza-se por considerar o interferente móvel posicionado aleatoriamente dentro de sua microcélula, e o canal em atividade de acordo com uma dada intensidade de tráfego. Novamente, para o cálculo da interferência total, considera-se somente o interferente que possui condição de visibilidade. Mostra-se que, neste caso, não é possível fazer a simplificação sugerida para a situação de pior caso. Em seguida evidenciam-se as condições que levam a resultados estatísticos confiáveis.

Na seqüência é feita uma análise de desempenho para sistemas com *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas considerando-se três situações distintas: móveis posicionados de maneira aleatória e o sistema funcionando em carga plena; móveis na posição de maior interferência e atividade do canal variando de acordo com uma dada intensidade de tráfego; e móveis posicionados de maneira aleatória e atividade do canal variando de acordo com uma dada intensidade de tráfego. Os resultados mostram uma melhora substancial de desempenho quando comparados com a situação de pior caso.

4.2 Caso 1: Móveis Interferentes Posicionados Aleatoriamente

Esta seção considera o sistema operando em carga plena, mas com os móveis interferentes posicionados de maneira aleatória. Considera-se uma distribuição de probabilidade uniforme para a localização dos móveis dentro da microcélula.

Sejam i_{TOT} o número total de interferentes, i_{LOS} ($0 \leq i_{LOS} \leq i_{TOT}$) o subconjunto desses interferentes que estão em linha de visada com o móvel ou estação rádio base de interesse, e $i_{NLOS} = i_{TOT} - i_{LOS}$ o subconjunto do total de interferentes que estão obstruídos. Sejam p_{LOS} a probabilidade de um móvel interferente estar em condição de visibilidade e $p_{LOS,NLOS}$ a probabilidade de existirem i_{LOS} interferentes em linha de visada.

Seja $E[(C/I)|i_{LOS}, i_{NLOS}]$ a razão portadora/interferência média estimada neste caso. Portanto, a razão portadora/interferência média total é dada por

$$E[C/I] = \sum_{i_{LOS}=0}^{i_{TOT}} E[C/I | i_{LOS}, i_{NLOS}] p_{LOS, NLOS} \quad \text{Equação 4.1}$$

onde $p_{LOS, NLOS}$ é dada pela Equação 4.2 ou 4.3, dependendo do padrão de reuso sendo utilizado, isto é

$$p_{LOS, NLOS} = \binom{i_{TOT}}{i_{LOS}} (p_{LOS})^{i_{LOS}} (1 - p_{LOS})^{i_{TOT} - i_{LOS}} \quad \text{Equação 4.2}$$

ou, equivalentemente,

$$p_{LOS, NLOS} = \binom{i_{TOT}^{(1)}}{i_{LOS}^{(1)}} (p_{LOS}^{(1)})^{i_{LOS}^{(1)}} (1 - p_{LOS}^{(1)})^{i_{TOT}^{(1)} - i_{LOS}^{(1)}} \times \binom{i_{TOT}^{(2)}}{i_{LOS}^{(2)}} (p_{LOS}^{(2)})^{i_{LOS}^{(2)}} (1 - p_{LOS}^{(2)})^{i_{TOT}^{(2)} - i_{LOS}^{(2)}} \quad \text{Equação 4.3}$$

$$i_{TOT}^{(1)} + i_{TOT}^{(2)} = i_{TOT} \quad \text{Equação 4.4}$$

$$i_{LOS}^{(1)} + i_{LOS}^{(2)} = i_{LOS} \quad \text{Equação 4.5}$$

Para *clusters* com número não-primo de microcélulas, existe um único valor de p_{LOS} para todos os interferentes, como pode ser visto no *layout* microcelular das Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.6. Através das figuras podemos observar que isto ocorre porque todas as co-microcélulas que em algum momento estão em linha de visada com a célula alvo possuem toda uma rua nesta condição. Portanto, nestes casos, ao analisar-se o desempenho do enlace reverso, utiliza-se a Equação 4.2 para o cálculo de $p_{LOS, NLOS}$.

Já no caso de *clusters* com número primo de microcélulas, existe mais de um valor possível para p_{LOS} . Duas co-microcélulas interferentes distintas podem ter valores diferentes para p_{LOS} . Pode-se observar, pelas Figura 3.1 e 3.5, que os interferentes das duas primeiras

camadas que influenciam no enlace reverso (círculos) estarão em linha de visada somente se posicionados em uma determinada esquina. No entanto, as co-microcélulas interferentes da terceira camada possuem toda uma rua em condição de visibilidade. Isto ocorre para todos os casos em que os *clusters* possuem número primo de células. Assim, o cálculo do enlace reverso em *clusters* com número primo de células utiliza-se da Equação 4.3 para a avaliação de $p_{LOS,NLOS}$.

Portanto, para sistemas que utilizam *clusters* com números primos de células, temos dois valores possíveis para p_{LOS} , $p_{LOS}^{(1)}$ e $p_{LOS}^{(2)}$, dependendo do interferente em questão. O parâmetro $i_{TOT}^{(1)}$ refere-se ao número total de interferentes que tem a probabilidade $p_{LOS}^{(1)}$ de estar em linha de visada com a célula alvo, e $i_{LOS}^{(1)}$ ($0 \leq i_{LOS}^{(1)} \leq i_{TOT}^{(1)}$) o subconjunto desses interferentes que realmente estão em linha de visada com a célula alvo. Equivalentemente, $i_{TOT}^{(2)}$ refere-se ao número total de interferentes que tem a probabilidade $p_{LOS}^{(2)}$ de estar em linha de visada com a célula alvo, e $i_{LOS}^{(2)}$ ($0 \leq i_{LOS}^{(2)} \leq i_{TOT}^{(2)}$) o subconjunto desses interferentes que realmente estão em linha de visada com a célula alvo. Consequentemente, a soma de $i_{TOT}^{(1)}$ e $i_{TOT}^{(2)}$ resulta no número total de interferentes no sistema, e a soma de $i_{LOS}^{(1)}$ e $i_{LOS}^{(2)}$ resulta no número total de interferentes em condição de visibilidade com a célula alvo.

Os resultados apresentados neste capítulo consideram *clusters* com 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas. O valor da probabilidade p_{LOS} é diferente para cada tesselação, pois em algumas delas existem co-microcélulas nas quais a rua oferece condição de visada em qualquer um de seus pontos enquanto que, para algumas outras, a condição de visada é oferecida somente na esquina da rua da co-microcélula. Os valores de p_{LOS} para as distintas tesselações são dados na Tabela 4.1.

Nos casos em que as microcélulas interferentes possuem uma rua inteira em linha de visada, consideramos a localização do móvel interferente como sendo o centro de sua microcélula. Portanto, os valores da distância entre o centro da microcélula alvo e de seu

interferente n_L são ligeiramente alterados com relação àqueles apresentados na Seção 3.3, e encontram-se no Apêndice 4A deste capítulo.

<i>Tesselação</i>	<i>Uplink</i>		<i>Downlink</i>
	$p_{LOS}^{(1)}$	$p_{LOS}^{(2)}$	p_{LOS}
<i>Cluster 5</i>	1,948%	51,948%	1
<i>Cluster 8</i>	51,948%	---	1
<i>Cluster 9</i>	51,948%	---	1
<i>Cluster 10</i>	51,948%	---	1
<i>Cluster 13</i>	1,948%	51,948%	1

Tabela 4.1 – Valores de p_{LOS} para as distintas tesselações

Os cálculos de desempenho apresentados a seguir foram avaliados para um sistema idêntico ao utilizado no Capítulo 3, com o intuito de uma posterior comparação de resultados. Portanto, considerou-se o móvel partindo do centro da célula alvo em direção à sua borda, utilizando um sistema com microcélulas de raio igual a 100m, largura de rua de 15m, frequência de operação de 890MHz, altura das antenas transmissoras e receptoras de 4m e 1,5m respectivamente, e razão k entre o raio da célula e a distância de *breakpoint* d_B de 1,405.

O sistema considerado aqui leva em conta um número infinito de interferentes. Certamente, realizar os cálculos da Equação 4.1 para um número infinito de interferentes torna o problema inviável. Limitar o número de interferentes, no entanto, pode comprometer os resultados. Então, os interferentes foram divididos em dois grupos: aqueles pertencentes às camadas mais próximas da célula alvo (camadas internas), e aqueles pertencentes às outras camadas (camadas externas). Por motivos de praticidade, somente aos interferentes do primeiro grupo foram atribuídas propriedades aleatórias. Os outros interferentes foram mantidos na condição de pior caso. Foi verificado em [GOMEZ2000-B] que o número mínimo de camadas no grupo de camadas internas necessário para chegar a resultados estatisticamente confiáveis é 6. O Apêndice 4B deste capítulo mostra como chegou-se a este resultado. Assim como foram realizados os cálculos de desempenho na situação de pior caso, utilizamos aqui 600 camadas de interferentes.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, o desempenho dos sistemas analisados para os enlaces reverso e direto em função da distância do móvel de interesse ao centro da célula alvo, normalizada em relação ao raio da célula, para *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas. Assim como observou-se para a situação de pior caso, a curva de desempenho do *uplink* em todos os casos de padrões de reuso é contínua, enquanto que a curva de desempenho do *downlink* apresenta uma ou duas “quebras”. Isto deve-se ao fato do *uplink* ter sempre os mesmos interferentes, enquanto que os interferentes para o *downlink* variam de acordo com a posição do móvel de interesse, provocando variações nos valores da relação portadora/interferência a medida que aparecem ou desaparecem da linha de visada do móvel. Este padrão de comportamento das curvas dos dois enlaces, como é de se esperar, e como pode ser observado em todos os dados gráficos desta tese, será sempre o mesmo.

Na análise de pior caso demos destaque ao desempenho de sistemas que fazem uso de *clusters* de 5 microcélulas, por estes terem apresentado um desempenho satisfatório e por apresentarem uma boa capacidade de tráfego. O desempenho destes para o *uplink* coincide com o de sistemas com *clusters* de 8 microcélulas, e para o *downlink* coincide com o desempenho de sistemas com *clusters* de 10 microcélulas para a maior parte da trajetória do móvel, com exceção da esquina limítrofe da célula. Vemos pelas Figuras 4.1 e 4.2 que considerando-se os interferentes com posicionamento aleatório, o desempenho de sistemas com padrão de reuso 5 é até ligeiramente melhor que o de sistemas de padrão de reuso 8. A maior melhora no desempenho do primeiro caso de sistemas deve-se ao fato de seus interferentes das duas primeiras camadas terem um valor de p_{LOS} mais baixo do que o valor de p_{LOS} dos interferentes das duas primeiras camadas dos sistemas do segundo caso. Poderia pensar-se então que a diferença na melhora de desempenho deveria ser maior do que a apresentada. No entanto, temos como contrapartida a consideração de que os interferentes de co-microcélulas com ruas inteiras em linha de visada são posicionados no centro da mesma, e que portanto, os interferentes para o caso de sistemas com *clusters* de 8 microcélulas estão mais distantes do que na condição de pior caso, melhorando mais ainda a relação portadora/interferência. O *downlink* apresenta os mesmos resultados que aqueles obtidos para a situação de pior caso.

No Capítulo 3 comentamos também que, pela análise de pior caso, um sistema que fizesse uso de 13 microcélulas não apresentava uma boa relação entre capacidade e interferência, pois seu desempenho de *uplink* era o mesmo que o de uma rede com *clusters* de 9 microcélulas. No entanto, podemos ver que para o novo caso analisado, este sistema apresenta o melhor desempenho de todos os analisados para o *uplink*. Este fato é previsível, já que apesar da primeira camada de interferentes deste sistema ser à mesma distância que a primeira camada de sistemas com *clusters* 9 microcélulas, as outras camadas são muito mais distantes. Como os interferentes de primeira camada possuem baixa probabilidade de estar em linha de visada com a célula alvo, o desempenho do sistema aumenta muito ao se atribuir caráter aleatório ao posicionamento dos interferentes.

A Figura 4.3 traz uma comparação entre os enlaces direto e reverso de sistemas com padrão de reuso 5 e 10. O sistema com *clusters* de 10 microcélulas continua tendo um desempenho maior que o de 5 microcélulas, mas essa diferença diminui com relação à situação de pior caso (apesar da melhora total no desempenho dos dois sistemas).

As Figuras 4.4 a 4.8 mostram o desempenho para os enlaces reverso e direto em função da distância normalizada com relação ao raio da célula à estação rádio base servidora, considerando o posicionamento aleatório dos móveis do modo explanado acima, respectivamente, para *clusters* com 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas. Em cada um dos gráficos é mostrado também o resultado obtido para a situação de pior caso, para propósitos de comparação. Vemos que, como observado anteriormente, em geral (valem as exceções mencionadas no Capítulo 3), o desempenho dos dois enlaces se aproxima a medida em que aumenta o valor do padrão de reuso. Podemos observar também pela figura que para o caso que considera a distribuição dos interferentes de forma aleatória dentro da célula, o desempenho do *downlink* não é sempre maior que o do *uplink*, como de regra na situação de pior caso. Observa-se que o desempenho do *uplink* neste caso é melhor para os padrões de reuso 8, 9 e 10. Já para os padrões 5 e 13 o desempenho do *downlink* é melhor que o do *uplink*, com exceção da esquina limítrofe da célula.

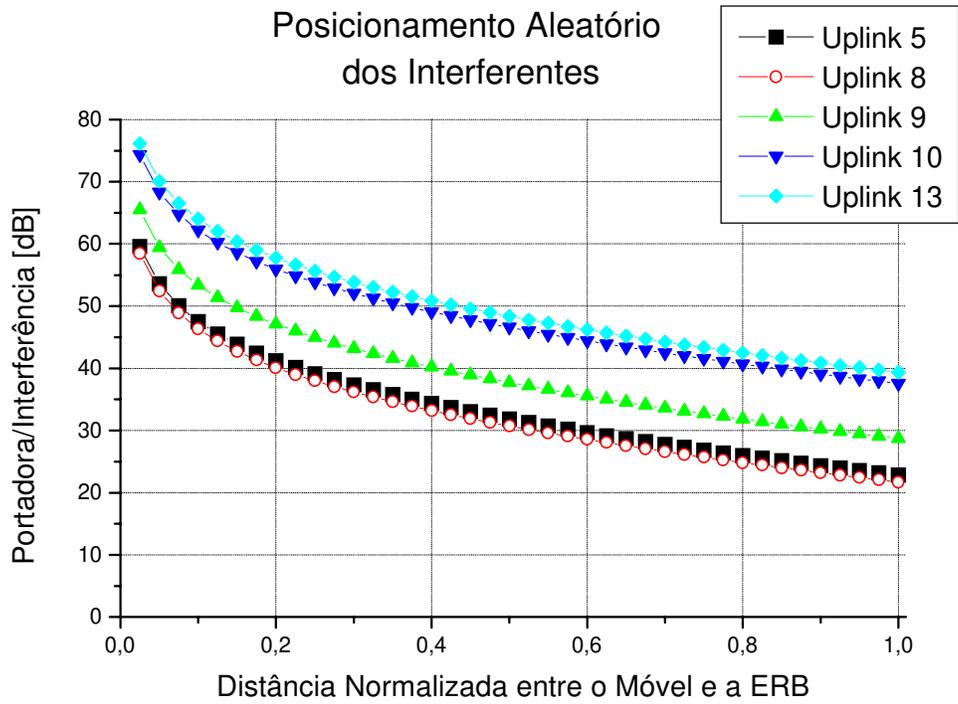


Figura 4.1 – Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13.

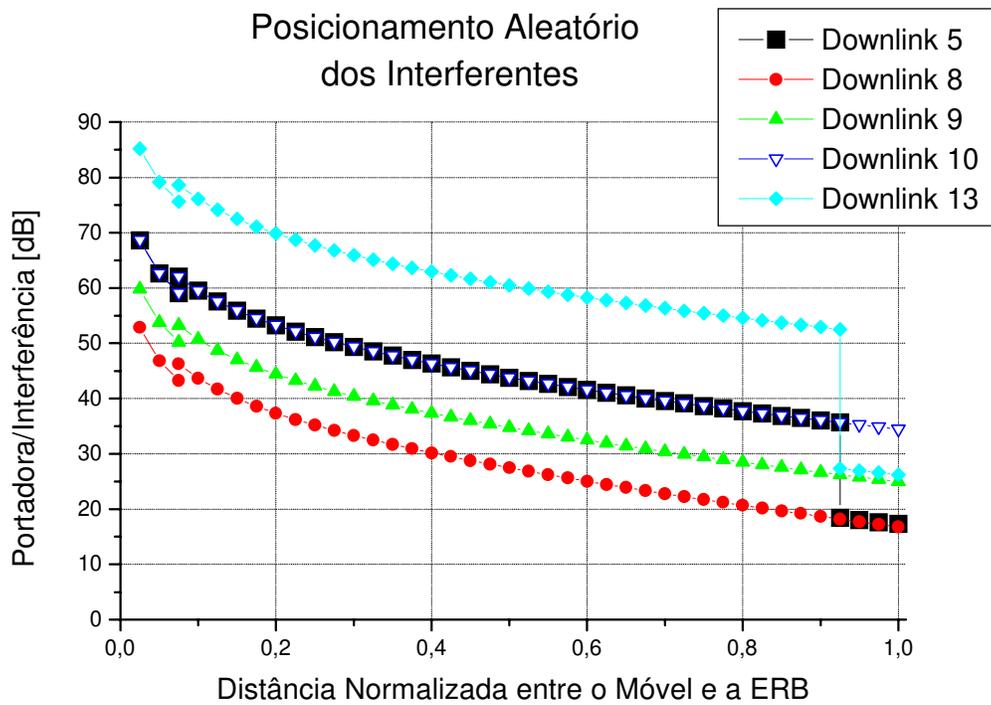


Figura 4.2 – Razão Portadora/Interferência do enlace direto em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13.

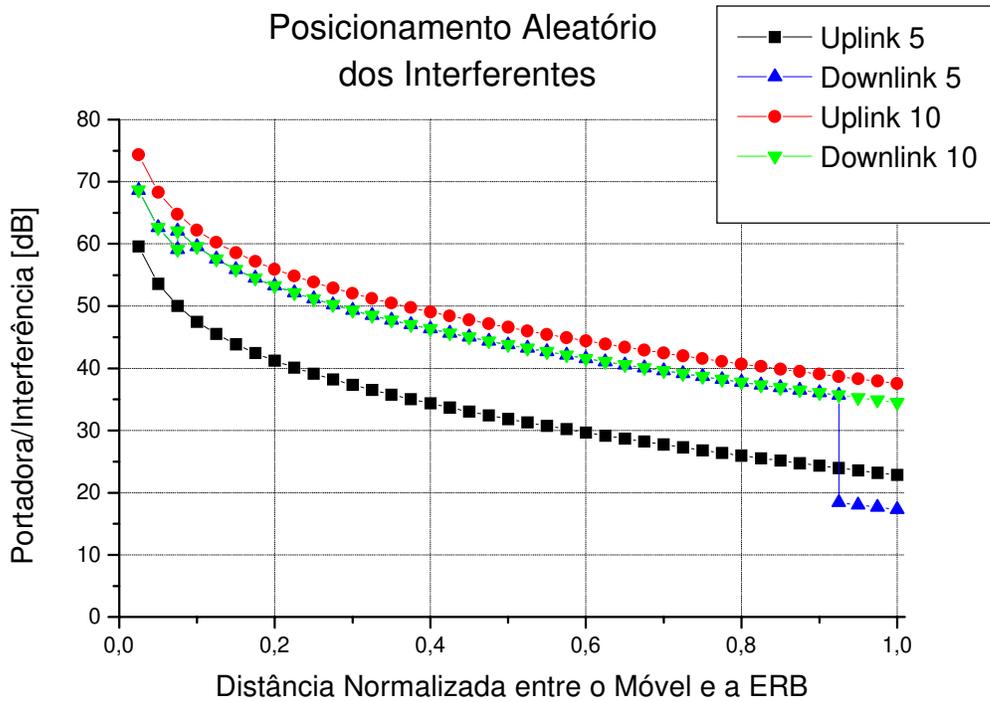


Figura 4.3 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5 e 10.

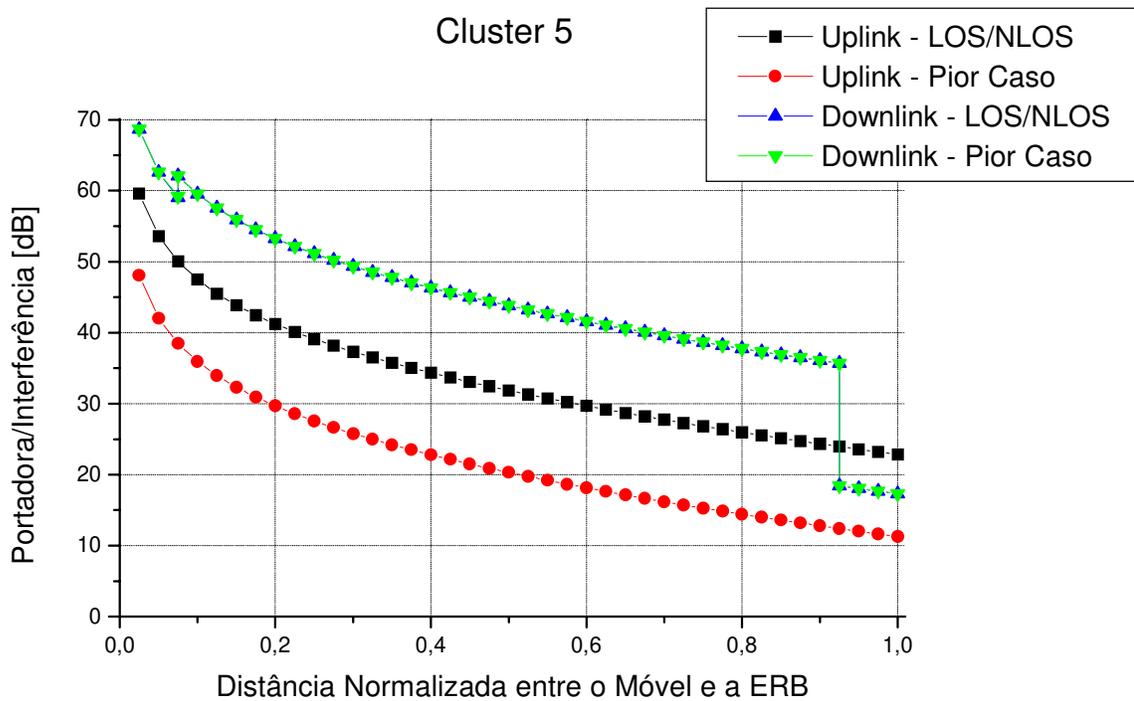


Figura 4.4 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 5 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes.

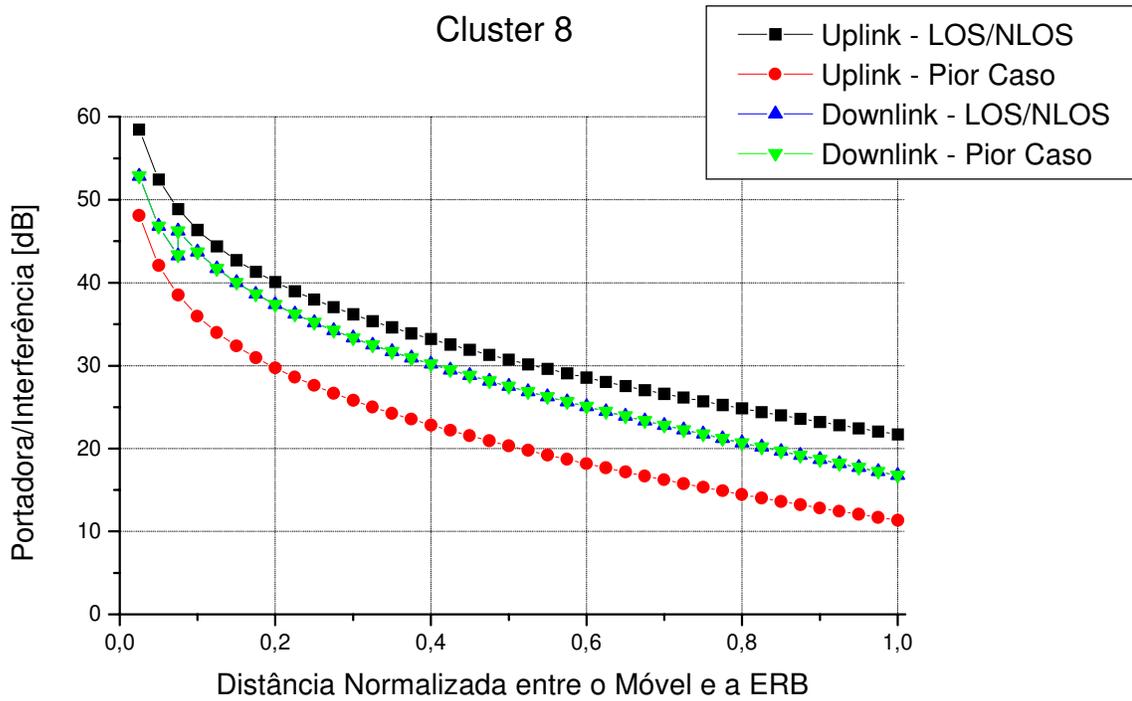


Figura 4.5 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 8 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes

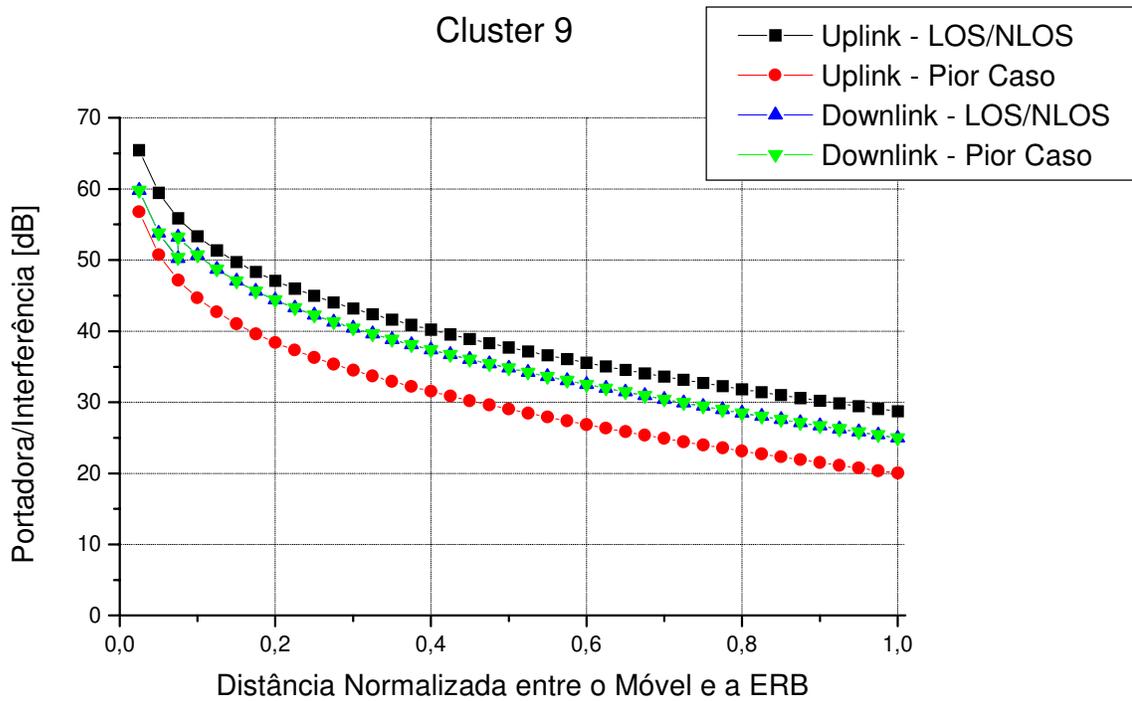


Figura 4.6 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 9 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes.

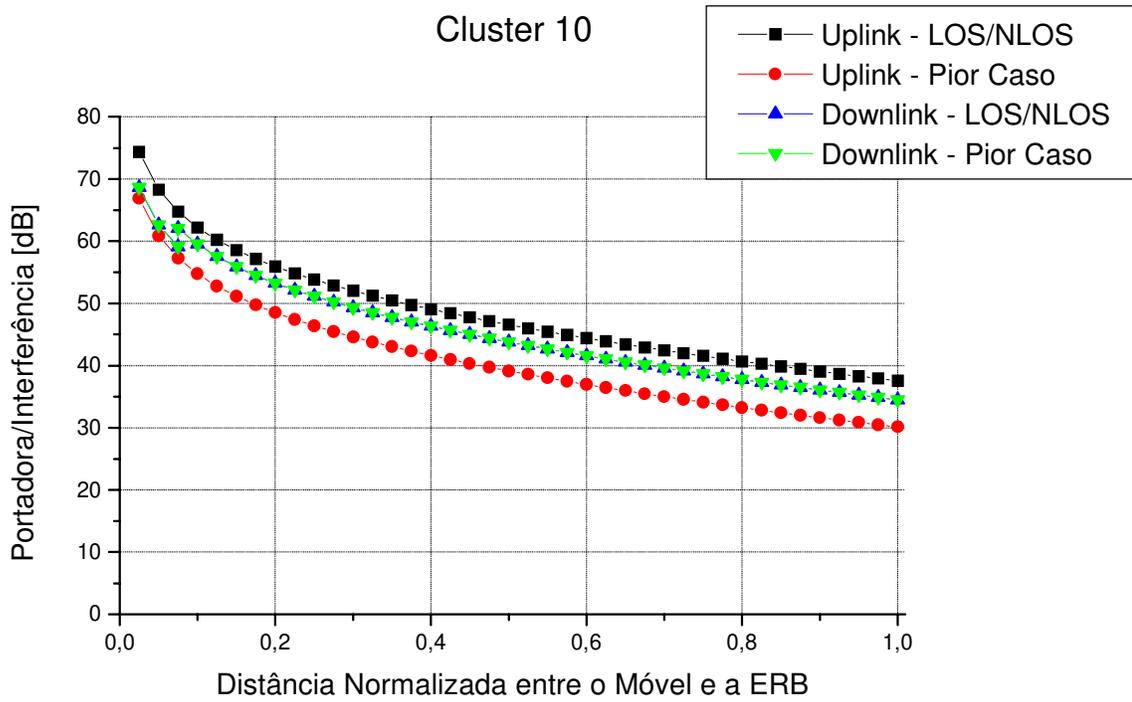


Figura 4.7 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 10 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes.

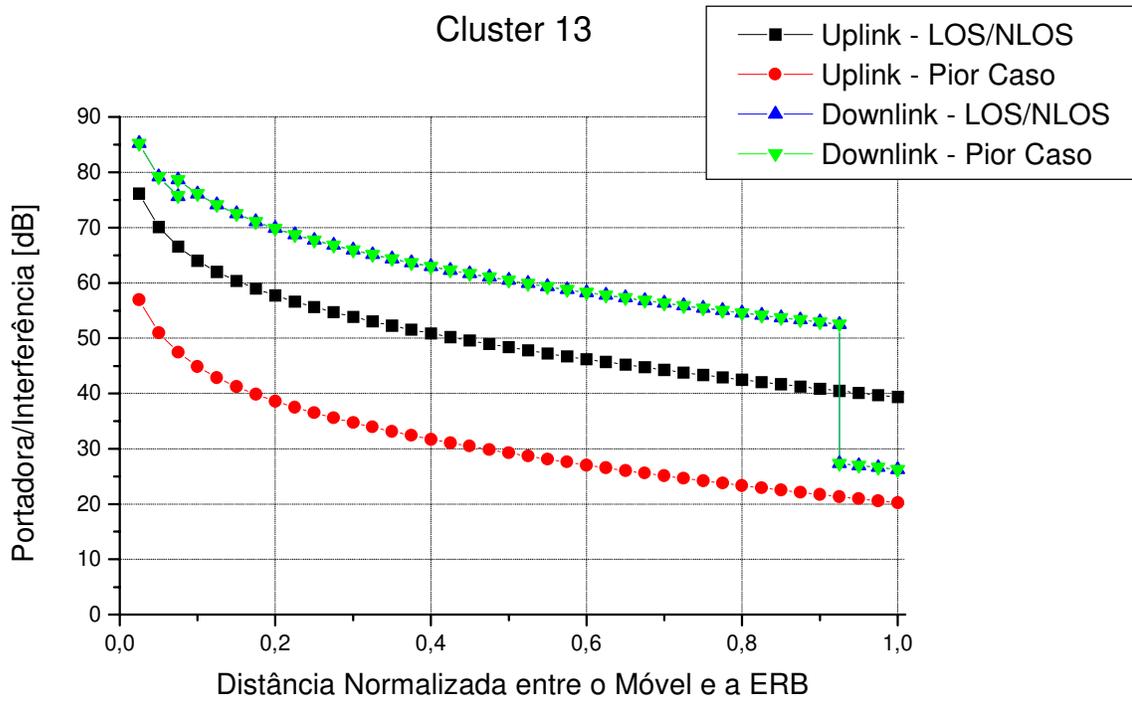


Figura 4.8 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 13 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá posição aleatória aos interferentes.

Podemos observar claramente pelas Figuras 4.4 a 4.8 que o desempenho do *downlink* para os dois casos sempre coincide. Este comportamento era de se esperar, já que os interferentes do sinal neste sentido são estações rádio base, e estas possuem posicionamento fixo, e portanto $p_{LOS} = 1$, tornando o caso apresentado nesta seção do capítulo idêntico ao da situação de pior caso. Para o *uplink*, no entanto, os gráficos mostram uma melhora substancial em relação à situação de pior caso. Vale notar que esta melhora é mais aparente para os casos de *clusters* com 5 e 13 microcélulas. A razão para isto é que nestes casos, a maior parte das microcélulas com possibilidade de interferir no sinal possuem somente uma esquina em linha de visada, e portanto, um baixo valor de p_{LOS} , enquanto que as co-microcélulas nos outros casos estudados são colineares à célula alvo, e portanto possuem toda uma rua em linha de visada (e um alto valor de p_{LOS}).

4.3 Caso 2: Atividade de Canal

Esta seção considera os interferentes posicionados na situação de pior caso, mas com o canal ativo de acordo com uma dada intensidade de tráfego. Seguimos aqui um raciocínio similar ao da seção anterior. Seja então $E[(C/I)|i_{ACT}, i_{NACT}]$ a razão portadora/interferência média estimada para este caso. Portanto, a razão portadora/interferência média total é dada por

$$E[C/I] = \sum_{i_{ACT}=0}^{i_{TOT}} E[C/I | i_{ACT}, i_{NACT}] p_{ACT, NACT} \quad \text{Equação 4.6}$$

onde,

$$p_{ACT, NACT} = \binom{i_{TOT}}{i_{ACT}} (p_{ACT})^{i_{ACT}} (1 - p_{ACT})^{i_{TOT} - i_{ACT}} \quad \text{Equação 4.7}$$

$$p_{ACT} = \frac{A(1-B)}{N_C} \quad \text{Equação 4.8}$$

i_{TOT} é o número total de interferentes; i_{ACT} ($0 \leq i_{ACT} \leq i_{TOT}$) é o subconjunto desses interferentes que estão ativos, p_{ACT} é a probabilidade de um móvel estar ativo, $p_{ACT,NACT}$ é a probabilidade de existirem i_{ACT} interferentes ativos, A é o tráfego da microcélula, B é a probabilidade de bloqueio e N_C é o número de canais em uma microcélula.

Os cálculos da relação C/I para este sistema foram efetuados considerando-se 8 canais por microcélula e uma probabilidade de bloqueio de 2%. Então, $A = 3,63$, e portanto, utilizou-se um valor de p_{ACT} igual a 44,47%. Foi utilizado um número infinito de interferentes (na prática, 600 camadas de co-microcélulas). Os interferentes das seis primeiras camadas tiveram a atividade de seus canais variada de acordo com as condições de tráfego dadas acima. Os outros interferentes foram mantidos na posição de maior interferência, e com seus canais sempre ativos. Os outros parâmetros do sistema considerados aqui são idênticos aos utilizados na seção anterior.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram, respectivamente, o desempenho do sistema analisado para os enlaces reverso e direto em função da distância do móvel de interesse ao centro da célula alvo, normalizada em relação ao raio da célula, para *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas, considerando-se a probabilidade de atividade do canal e um número infinito de interferentes tratados da mesma forma que na seção anterior (Apêndice 4B). Neste caso, apesar da melhora no desempenho de todos os sistemas estudados com relação à situação de pior caso para ambos os enlaces, os sistemas com padrão de reuso igual a 5 não possuem mais um desempenho igual aos de sistemas com padrão de reuso 8 para o enlace reverso. Na verdade, como podemos ver pela Figura 4.9, este é o sistema que possui a pior relação portadora/interferência para o *uplink*. Já para o *downlink*, vemos pela Figura 4.10, que este continua tendo o mesmo desempenho de sistemas que fazem uso de *clusters* de 10 microcélulas, como se dava na situação de pior caso.

Ao compararmos todos os casos das Figuras 4.9 e 4.10 com aqueles das Figuras 3.8 e 3.9 (gráficos análogos, para a situação de pior caso), vemos que a relação entre o desempenho dos sistemas continua a mesma, com exceção do caso mencionado acima. Este resultado

era esperado pois a probabilidade de cada interferente presente nos sistemas ter seu canal ativo é a mesma para todos os padrões de reuso, e as distâncias dos interferentes é a mesma que aquela considerada para a situação de pior caso. Logicamente, como vimos no Capítulo 3, a relação entre desempenhos de sistemas para a situação de pior caso pode ser bem analisada comparando-se apenas a primeira camada de interferentes. No caso analisado nesta seção, isto não é mais válido pois existe, por exemplo, uma probabilidade de todos os interferentes de primeira camada estarem inativos. Assim, se tivéssemos, por exemplo, dois sistemas nos quais a primeira camada de interferentes está à mesma distância, mas a segunda camada não, os dois sistemas podem desempenhar-se igualmente para a situação de pior caso e com bastante diferença considerando-se a atividade do canal dos interferentes.

Para os casos das Figuras 4.9 e 4.10 o aumento no desempenho do *uplink* foi parecido com aquele do caso da Seção 4.2, na qual se considerava o posicionamento aleatório dos interferentes, para sistemas com padrões de reuso 8, 9 e 10. No entanto, o aumento foi menor para sistemas com padrão de reuso 5 e 13. Isto se explica pela grande diferença dos valores de p_{LOS} entre os sistemas.

A Figura 4.11 traz uma comparação entre os enlaces direto e reverso de sistemas com padrão de reuso 5 e 10. Assim como nos casos anteriores, o sistema com *clusters* de 10 microcélulas apresenta um melhor desempenho que o de 5 microcélulas para o enlace reverso, e um desempenho igual para o enlace direto, com exceção dos pontos pertencentes à esquina limítrofe da célula, no qual os sistemas com padrão de reuso 5 encontram novos interferentes, e portanto têm seu desempenho prejudicado.

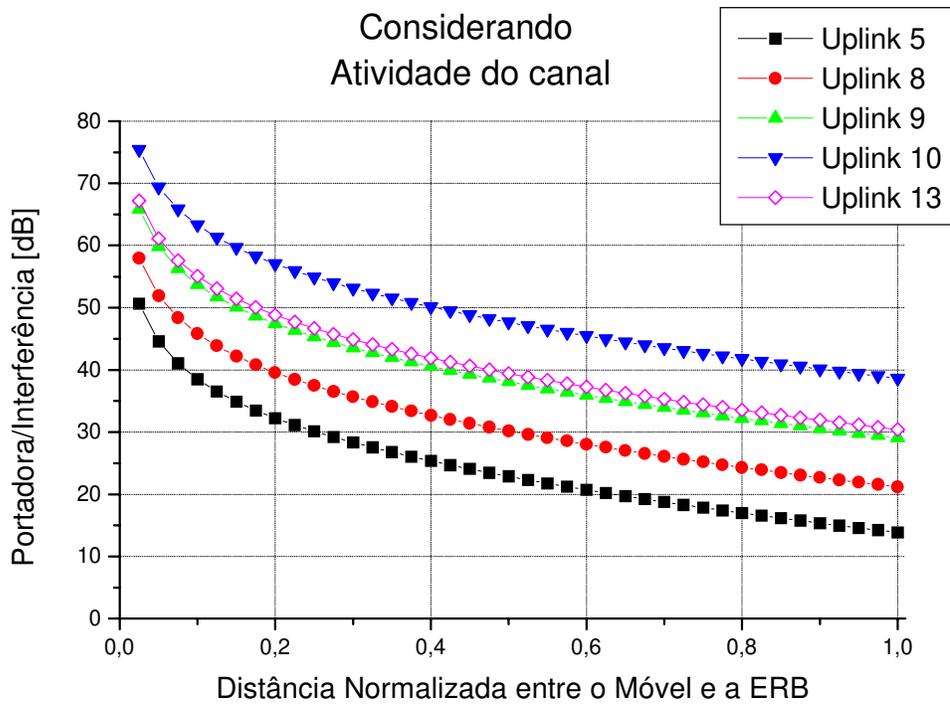


Figura 4.9 – Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13.

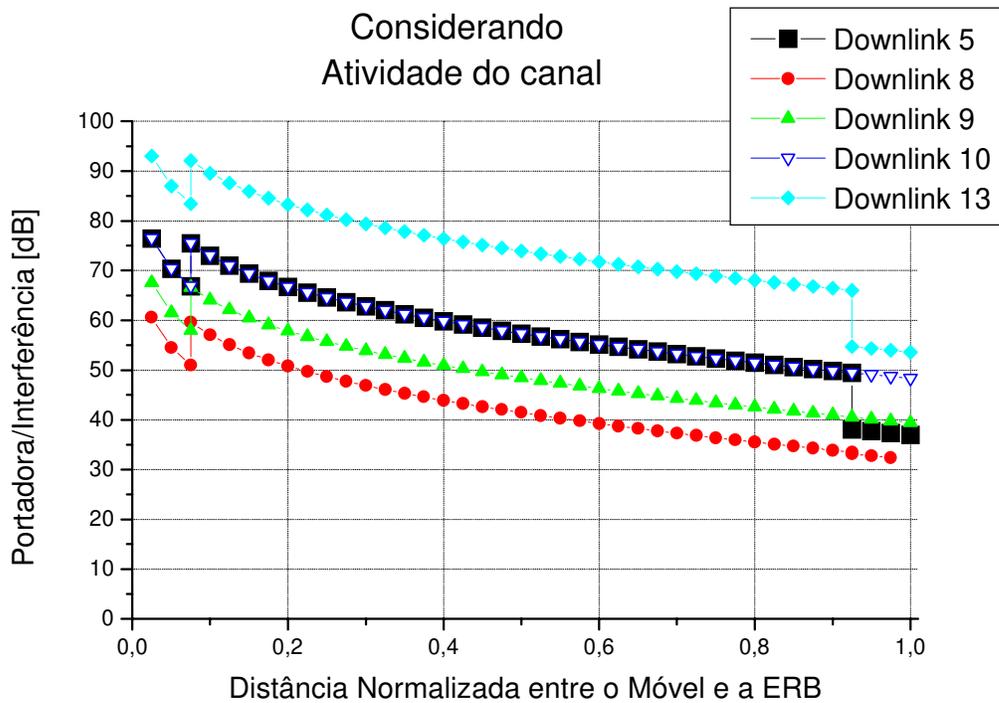


Figura 4.10 – Razão Portadora/Interferência do enlace direto em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13.

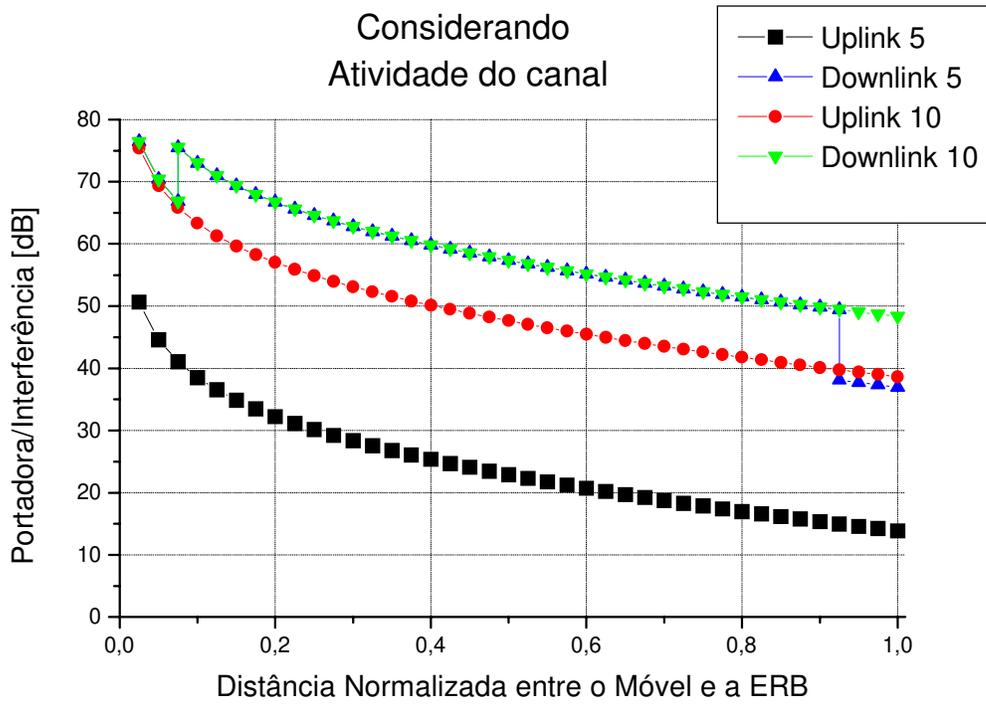


Figura 4.11 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada os padrões de reuso 5 e 10.

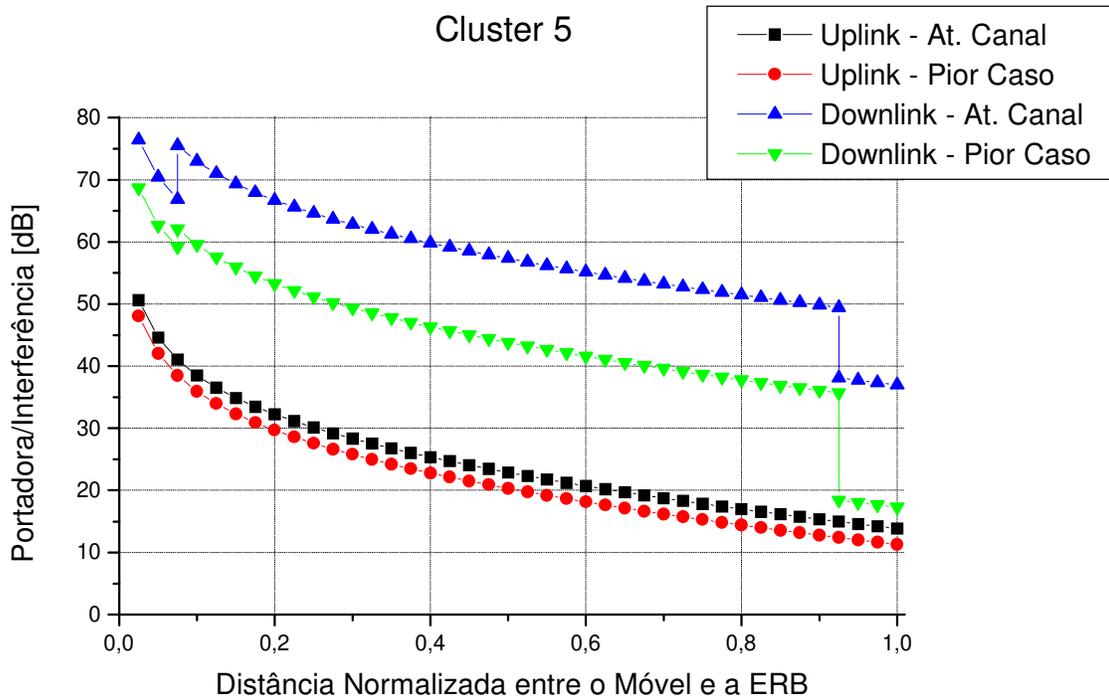


Figura 4.12 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 5 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal.

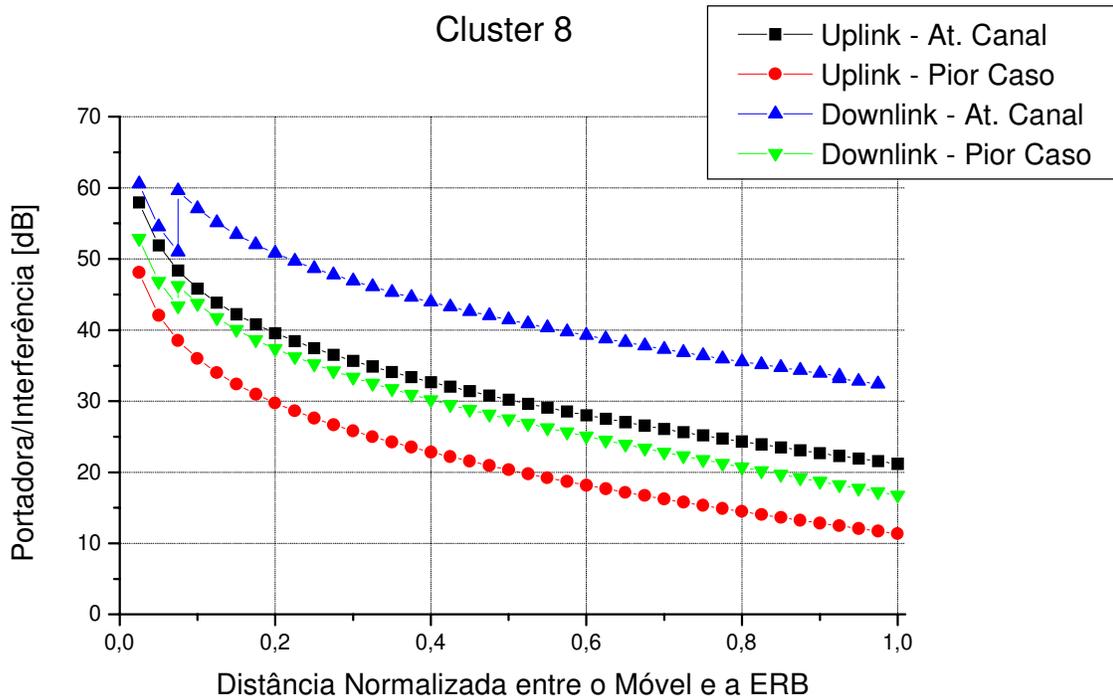


Figura 4.13 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 8 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal.

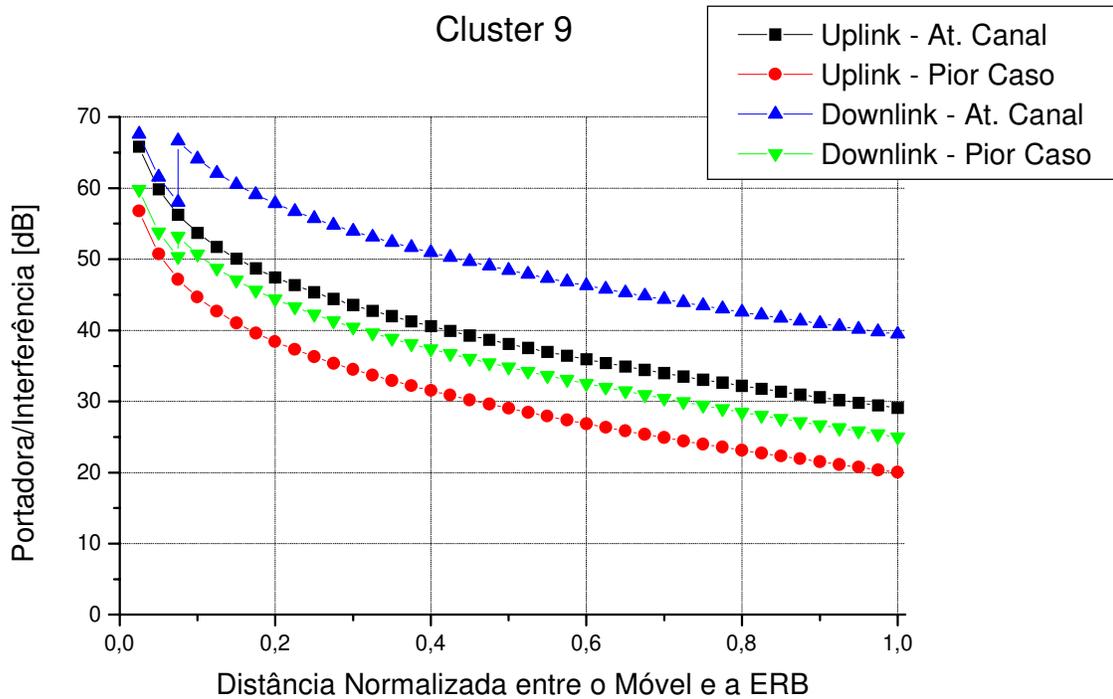


Figura 4.14 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 9 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal.

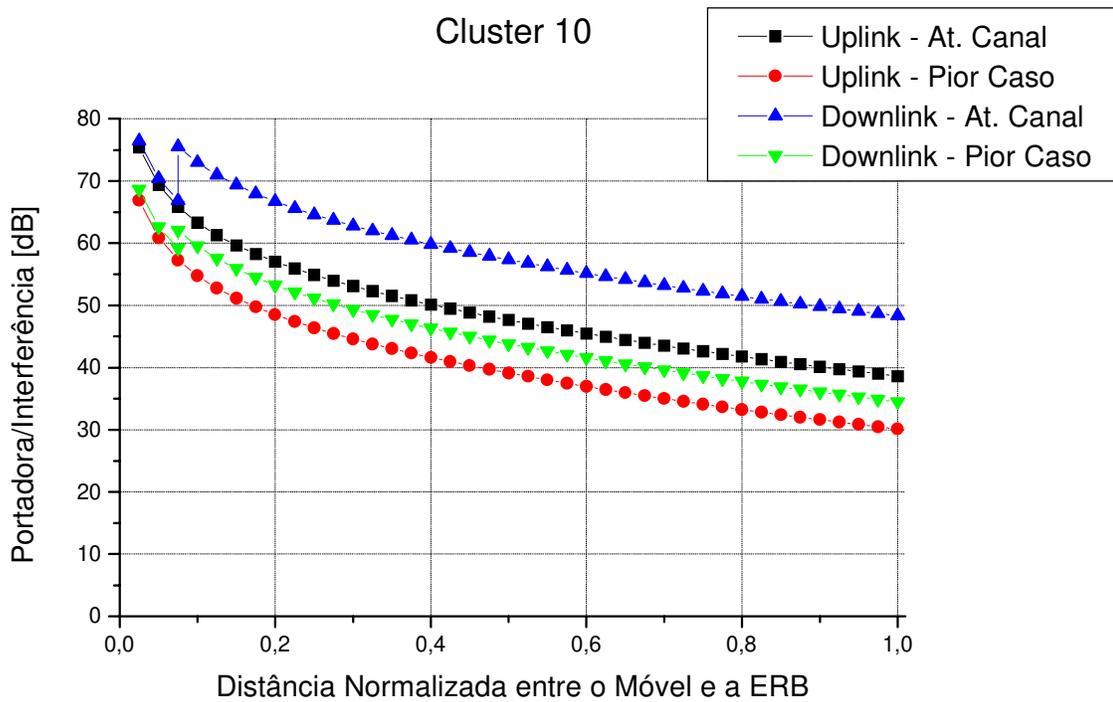


Figura 4.15 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 10 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal.

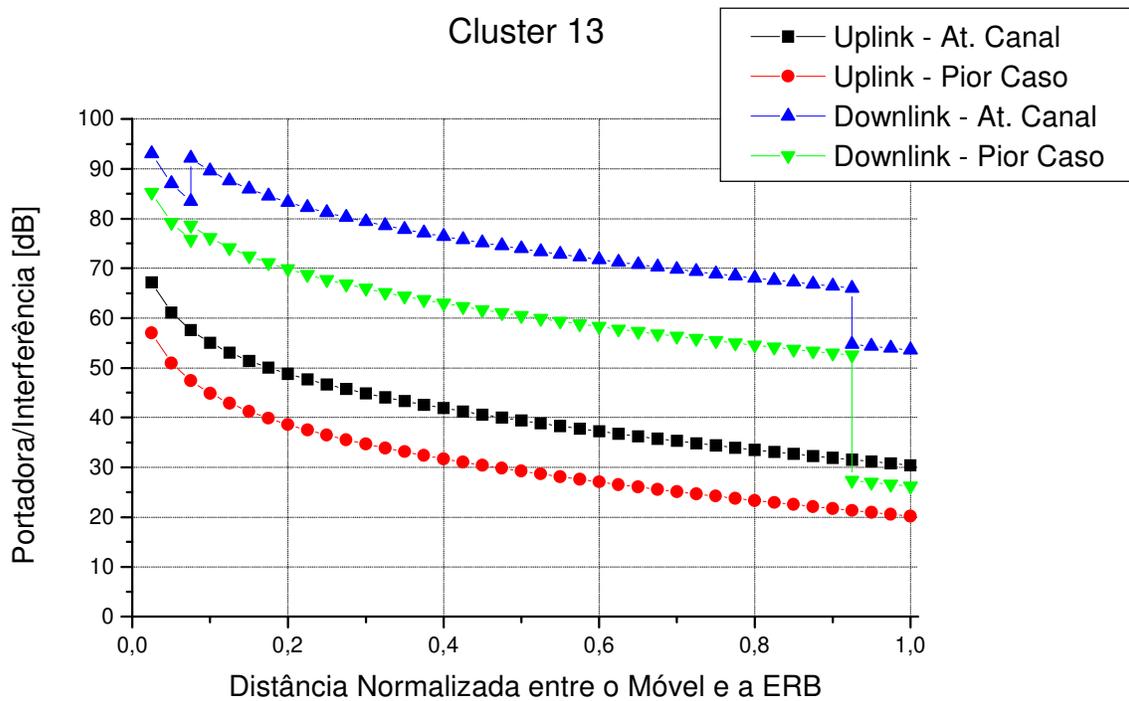


Figura 4.16 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 13 células: comparação entre o pior caso e o caso em que se dá uma probabilidade à atividade do canal.

As Figuras 4.12 a 4.16 mostram o desempenho para os enlaces reverso e direto em função da distância normalizada com relação ao raio da célula à estação rádio base servidora, considerando a probabilidade de atividade do canal, respectivamente, para *clusters* com 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas, juntamente com o resultado obtido para a situação de pior caso, para propósitos de comparação. Vemos que a melhora no desempenho do *downlink* é sempre maior que a do *uplink*. Este resultado parece bastante lógico pois os interferentes do *downlink* são um subconjunto daqueles do *uplink*. Observe que para qualquer padrão de reuso, no início da trajetória do móvel partindo da célula alvo temos uma certa melhora no desempenho do *downlink*, que se acentua bastante após a distância normalizada de 0,075 para a qual o móvel entra na quadra e perde uma das linhas de visada de interferentes.

Deve-se dar atenção especial ao aumento no desempenho da esquina limítrofe da célula para o *downlink* de sistemas com padrão de reuso primo. Estes sistemas mostravam uma relação C/I pobre para o pior caso, e agora, considerando uma situação bem mais realista, a relação mostra valores bem mais aprazíveis.

4.4 Caso 3: Atividade de Canal e Móveis Posicionados Aleatoriamente

Finalmente, combinamos as duas considerações feitas nas Seções 4.2 e 4.3. Portanto, nesta seção consideramos os móveis interferentes tendo posicionamento aleatório dentro de suas respectivas microcélulas, e a atividade de canal de acordo com uma dada intensidade de tráfego.

Considere uma distribuição de probabilidade uniforme para a localização de um móvel dentro de sua microcélula. Sejam i_{TOT} o número total de interferentes e $i_{ACT\&LOS}$ ($0 \leq i_{ACT\&LOS} \leq i_{TOT}$) um subconjunto dos interferentes que estão simultaneamente ativos e em linha de visada. Sejam p_{LOS} a probabilidade de um de um móvel interferente estar em linha de visada com a célula alvo, p_{ACT} a probabilidade de um canal estar ativo, e $p_{ACT\&LOS}$ a probabilidade de existirem $i_{ACT\&LOS}$ interferentes que estejam ao mesmo tempo

ativos e em condição de visada. Definimos, então, $E[C/I|i_{ACT\&LOS}]$ como sendo a razão portadora/interferência média estimada neste caso. A razão portadora/interferência média total é, portanto,

$$E[C/I] = \sum_{i_{ACT\&LOS}=0}^{i_{TOT}} E[C/I|i_{ACT\&LOS}] p_{ACT\&LOS} \quad \text{Equação 4.9}$$

onde

$$p_{ACT\&LOS} = \binom{i_{TOT}}{i_{ACT\&LOS}} (p_{LOS} \times p_{ACT})^{i_{ACT\&LOS}} (1 - p_{LOS} \times p_{ACT})^{i_{TOT} - i_{ACT\&LOS}} \quad \text{Equação 4.10}$$

ou, equivalentemente,

$$p_{ACT\&LOS} = \binom{i_{TOT}^{(1)}}{i_{ACT\&LOS}^{(1)}} (p_{LOS}^{(1)} \times p_{ACT}^{(1)})^{i_{ACT\&LOS}^{(1)}} (1 - p_{LOS}^{(1)} \times p_{ACT}^{(1)})^{i_{TOT}^{(1)} - i_{ACT\&LOS}^{(1)}} \times \binom{i_{TOT}^{(2)}}{i_{ACT\&LOS}^{(2)}} (p_{LOS}^{(2)} \times p_{ACT}^{(2)})^{i_{ACT\&LOS}^{(2)}} (1 - p_{LOS}^{(2)} \times p_{ACT}^{(2)})^{i_{TOT}^{(2)} - i_{ACT\&LOS}^{(2)}} \quad \text{Equação 4.11}$$

$$i_{TOT}^{(1)} + i_{TOT}^{(2)} = i_{TOT} \quad \text{Equação 4.12}$$

$$i_{ACT\&LOS}^{(1)} + i_{ACT\&LOS}^{(2)} = i_{ACT\&LOS} \quad \text{Equação 4.13}$$

Como vimos na Seção 4.2, existe um único valor para p_{LOS} para *clusters* com números não-primos de microcélulas, e dois possíveis valores para p_{LOS} para *clusters* com números primos de microcélulas. Ou seja, para *clusters* com número primo de microcélulas, existem co-microcélulas com diferentes proporções de seus tamanhos em linha de visada com a microcélula alvo. Assim, temos duas equações distintas para o cálculo de $p_{ACT\&LOS}$ para o enlace reverso. A Equação 4.10 é utilizada para o cálculo de $p_{ACT\&LOS}$ para sistemas que fazem uso de um número não-primo de microcélulas por *cluster*, e a Equação 4.11 é utilizada para o cálculo do mesmo para sistemas que fazem uso de um número primo de microcélulas por *cluster*. Os valores de p_{LOS} para todos os padrões de reuso cujos desempenhos são avaliados neste trabalho podem ser encontrados na Tabela 4.1, Seção 4.2.

Os cálculos da razão C/I neste caso foram feitos considerando-se os mesmos parâmetros de sistema utilizados nas Seções 4.2 e 4.3. Também foram considerados infinitos interferentes (600 camadas) dando-se caráter aleatório aos interferentes das seis primeiras camadas e mantendo os outros interferentes na situação de pior caso (referir-se ao Apêndice 4B).

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram o desempenho dos enlaces reverso e direto em função da distância à estação rádio base normalizada em relação ao raio da célula para sistemas com *clusters* de 5 e 8 microcélulas para dois casos limites: para o caso em que o grupo de camadas internas possui uma única camada de interferentes (linhas pontilhadas), e para o caso em que o grupo de camadas internas possui seis camadas de interferentes (linhas cheias). Note que existe uma grande diferença entre os resultados obtidos nos dois casos. Isto implica em que, ao passo que a situação de pior caso pode ser facilmente modelada por uma rede de uma única camada de interferentes, uma condição mais realista pode ser analisada somente se levado em conta um número significativamente maior de camadas de interferentes. Nas figuras temos um exemplo de padrão de reuso primo e um não primo. Como a aproximação já não é válida para estes dois casos, não faz-se necessário mostrar os resultados para os outros padrões de reuso.

Nas Figuras 4.19 e 4.20 tem-se, respectivamente, o desempenho do sistema analisado dos enlaces reverso e direto em função da distância do móvel de interesse ao centro da célula alvo, normalizada em relação ao raio da célula, para *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas, considerando-se a probabilidade de atividade do canal, a probabilidade do interferente estar em linha de visada, e um número infinito de interferentes tratados da mesma forma que nas seções anteriores. Para a situação de pior caso tínhamos que o desempenho para o *uplink* em sistemas com padrão de reuso igual a 5 era igual ao de sistemas com padrão de reuso igual a 8. Considerando a localização aleatória dos móveis interferentes e a probabilidade destes estarem com o canal ativo, temos que o desempenho de sistemas com *clusters* de 5 microcélulas supera aquele de sistemas com *clusters* de 8 microcélulas. Para o *downlink*, estes sistemas têm um desempenho igual ao de sistemas com *clusters* de 10 microcélulas.

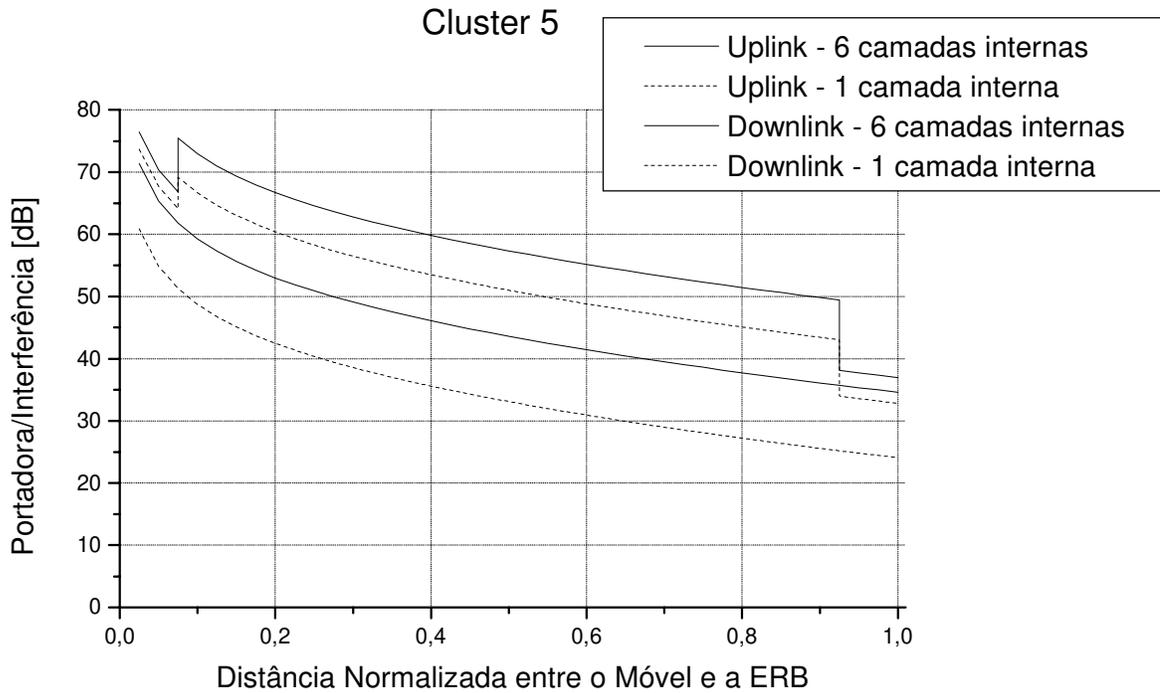


Figura 4.17 – Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para sistemas com 5 células por cluster, atribuindo caráter aleatório para a primeira camada de interferentes, e para as 6 primeiras camadas de interferentes.

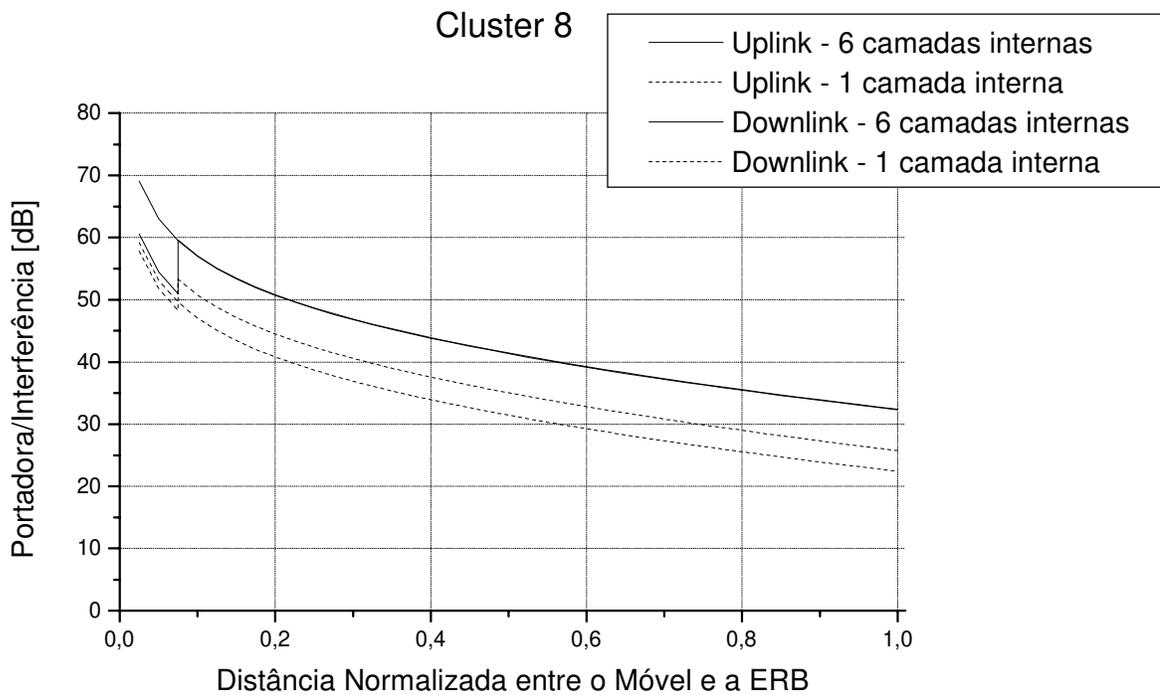


Figura 4.18 – Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para sistemas com 8 células por cluster, atribuindo caráter aleatório para a primeira camada de interferentes, e para as 6 primeiras camadas de interferentes.

Se analisarmos os valores da relação portadora/interferência para os dois enlaces de todos os padrões de reuso mostrados nas Figuras 4.19 e 4.20, vemos que todos superam em muito os 18dB mínimo sugeridos por [MCDON79]. Isto resultaria no excelente resultado da viabilidade de sistemas utilizando padrão de reuso igual a 5 com antenas omnidirecionais, com eficiência espectral muito superior à do padrão de reuso igual a 7 com antenas tri-setorizadas, tão comumente utilizados em sistemas macrocelulares de tecnologias AMPS e TDMA (IS-136).

No entanto, deve-se ter um pouco de cautela antes de tirar tal conclusão, pois não podemos esquecer que os cálculos não levam em conta os interferentes que estão obstruídos. Portanto, consideramos estes resultados apresentados nesta seção da tese como os limitantes superiores de desempenho, ao passo que consideramos os resultados apresentados no Capítulo 3 como os limitantes inferiores de desempenho.

As Figuras 4.22 a 4.26 mostram o desempenho para os enlaces reverso e direto em função da distância normalizada com relação ao raio da célula à estação rádio base servidora, considerando o posicionamento aleatório dos móveis e a probabilidade de atividade do canal do modo explanado acima, respectivamente, para *clusters* com 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas. Em cada um dos gráficos é mostrado também o resultado obtido para a situação de pior caso, para propósitos de comparação. Portanto, temos neles os limitantes superior e inferior de desempenho para os dois enlaces de todos os padrões de reuso estudados. Os dados reais devem encontrar-se dentro desta duas curvas, sendo mais provável que se encontrem mais próximas ao limitante superior.

Os dados da “situação de melhor caso” para o enlace reverso podem ser ainda melhorados se levarmos em conta o controle de potência das unidades móveis, não considerado neste trabalho.

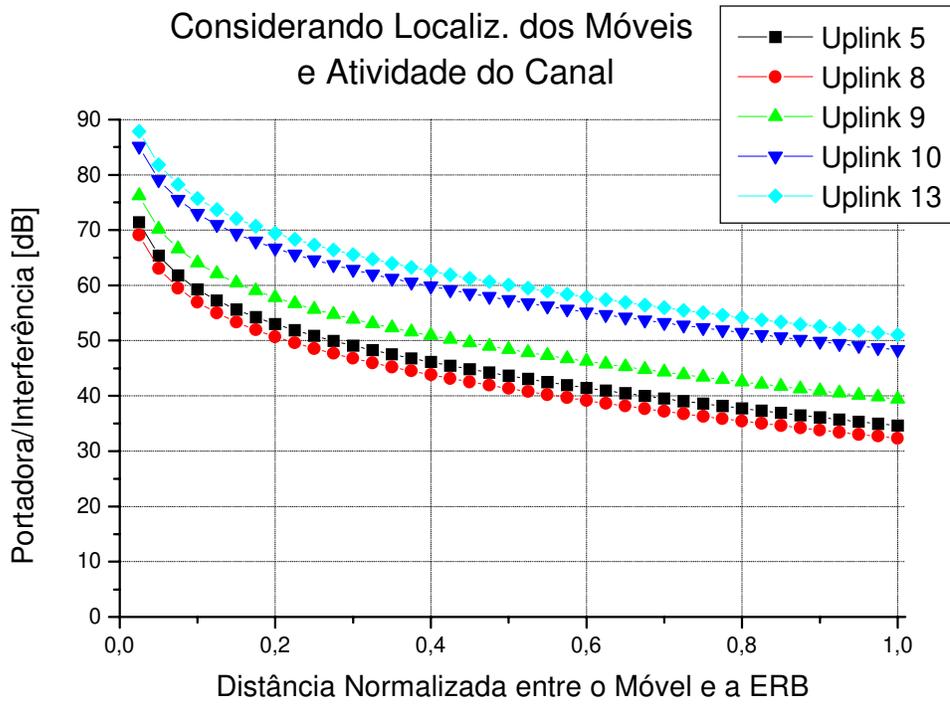


Figura 4.19 – Razão Portadora/Interferência do enlace reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13.

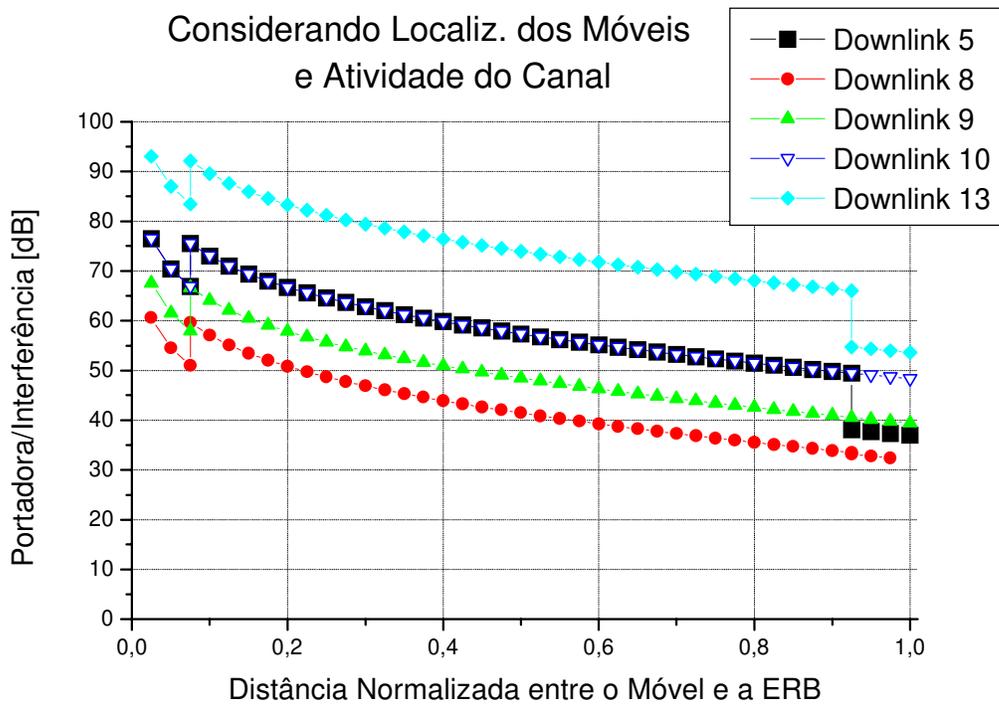


Figura 4.20 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces diretos em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5, 8, 9, 10 e 13.

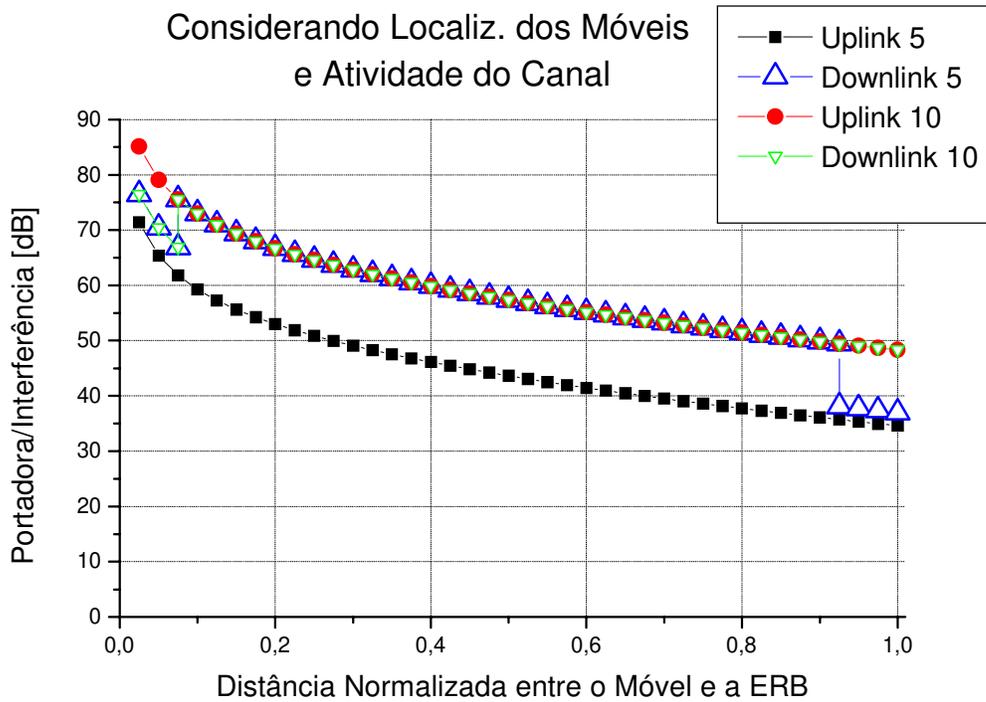


Figura 4.21 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para os padrões de reuso 5 e 10.

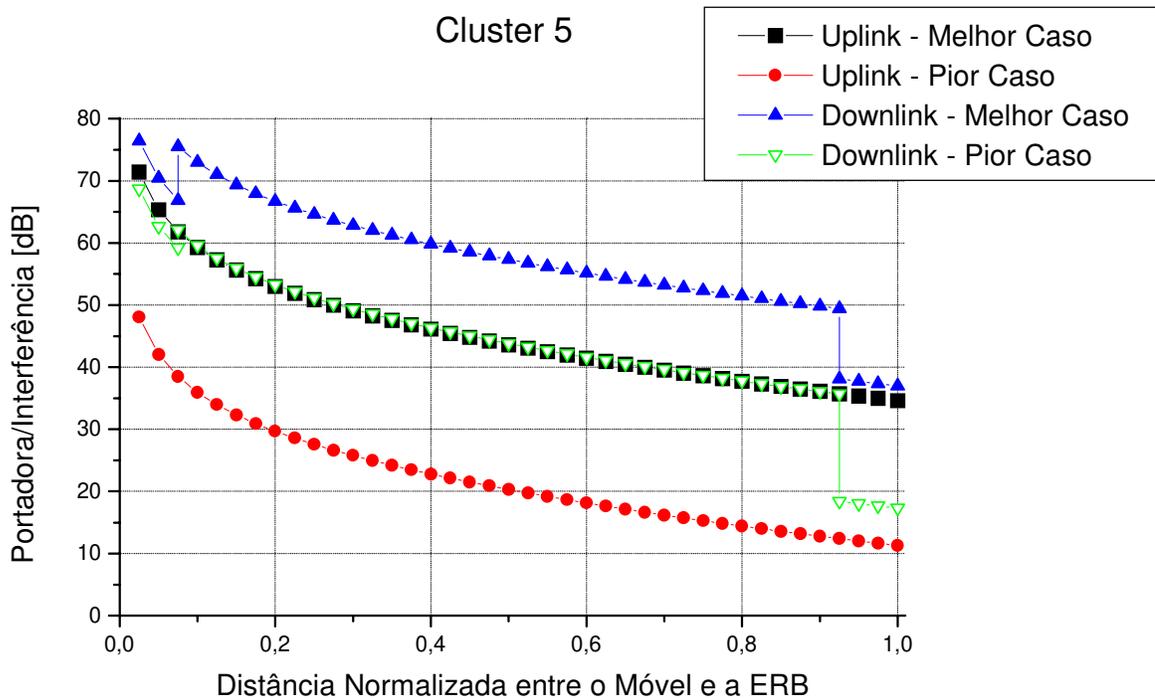


Figura 4.22 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 5 células: comparação entre o pior e o melhor caso.

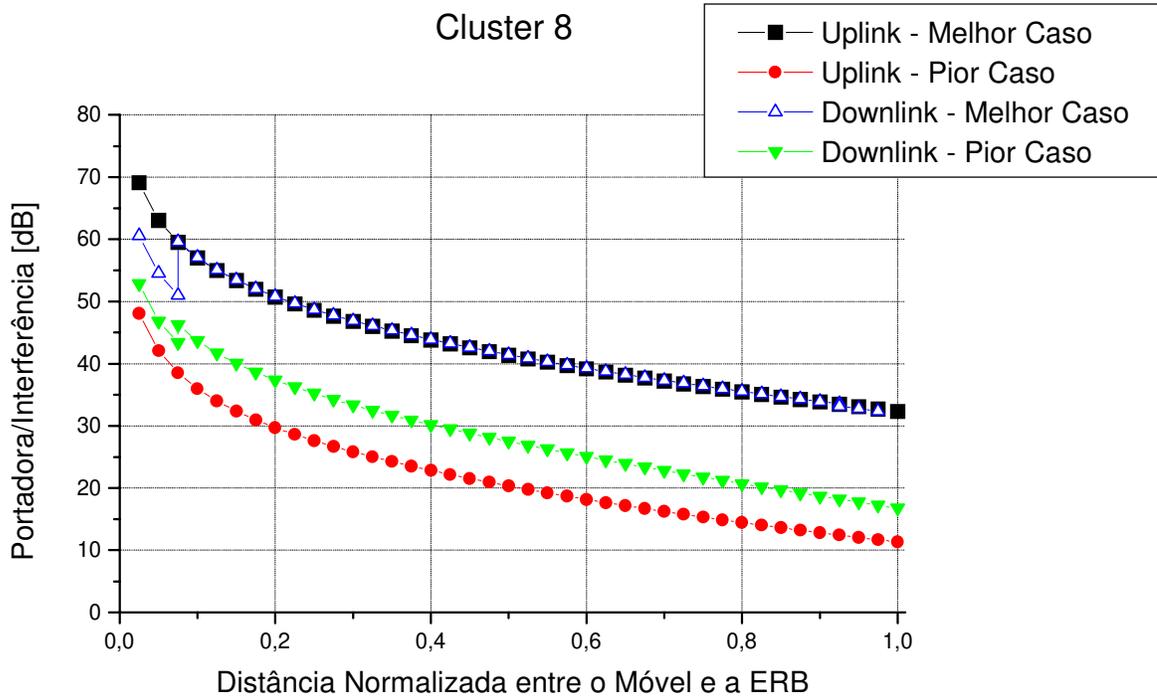


Figura 4.23 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 8 células: comparação entre o pior e o melhor caso.

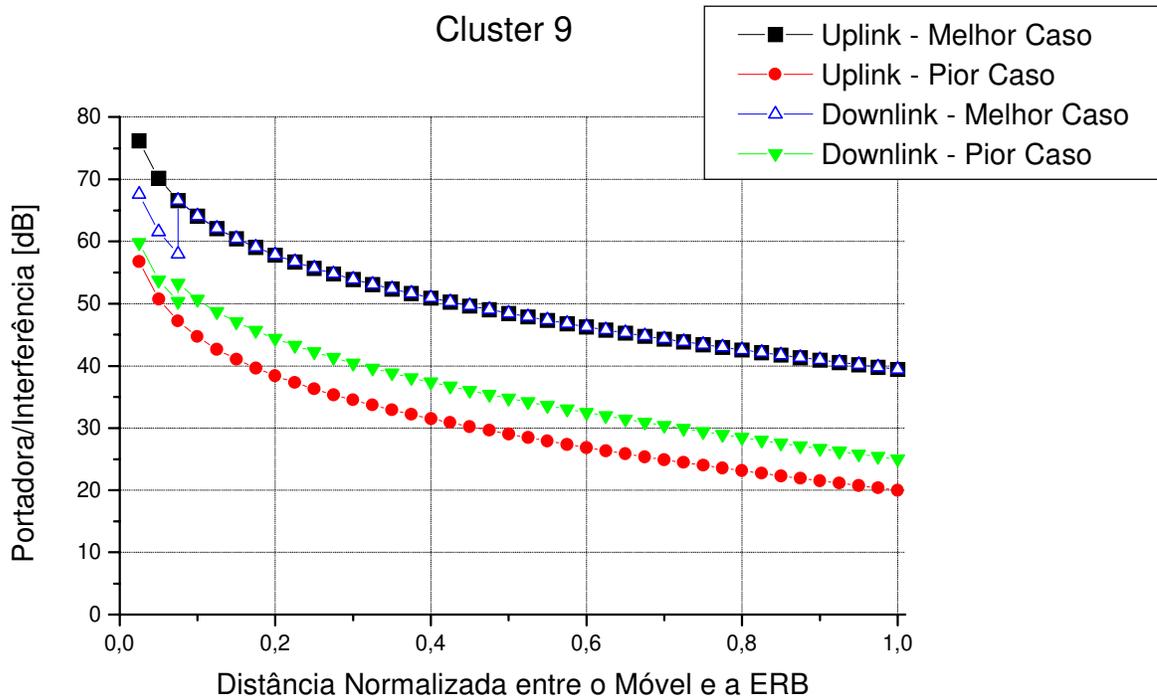


Figura 4.24 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 9 células: comparação entre o pior e o melhor caso.

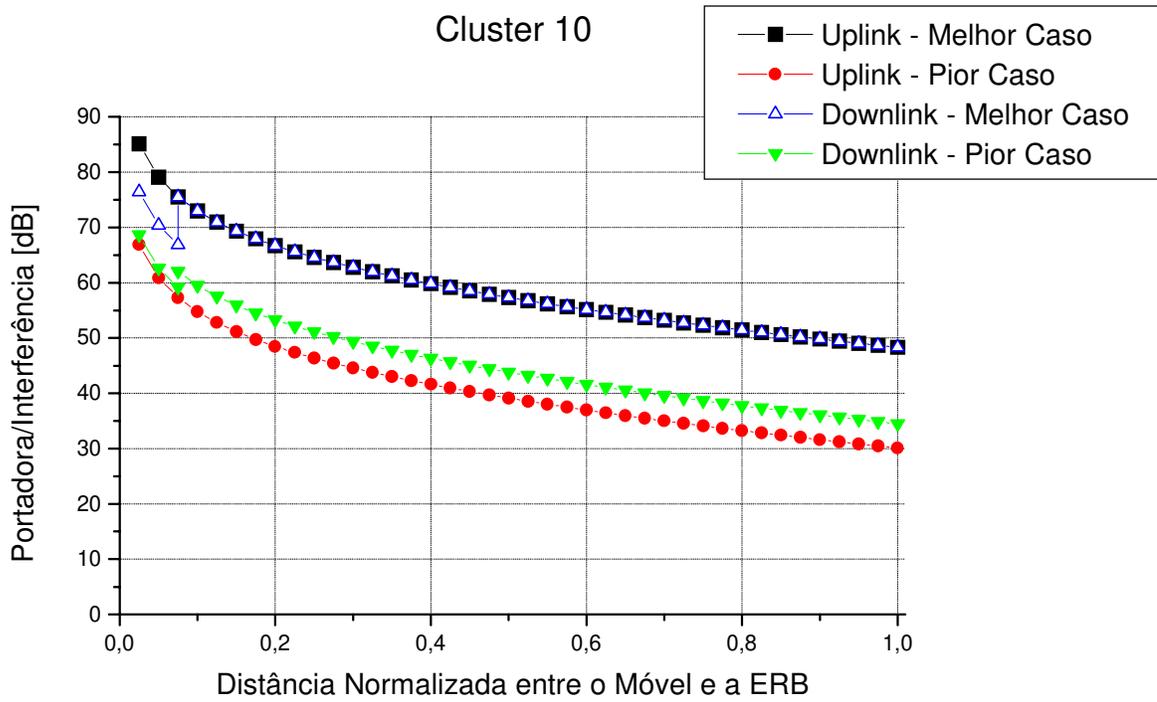


Figura 4.25 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 10 células: comparação entre o pior e o melhor caso.

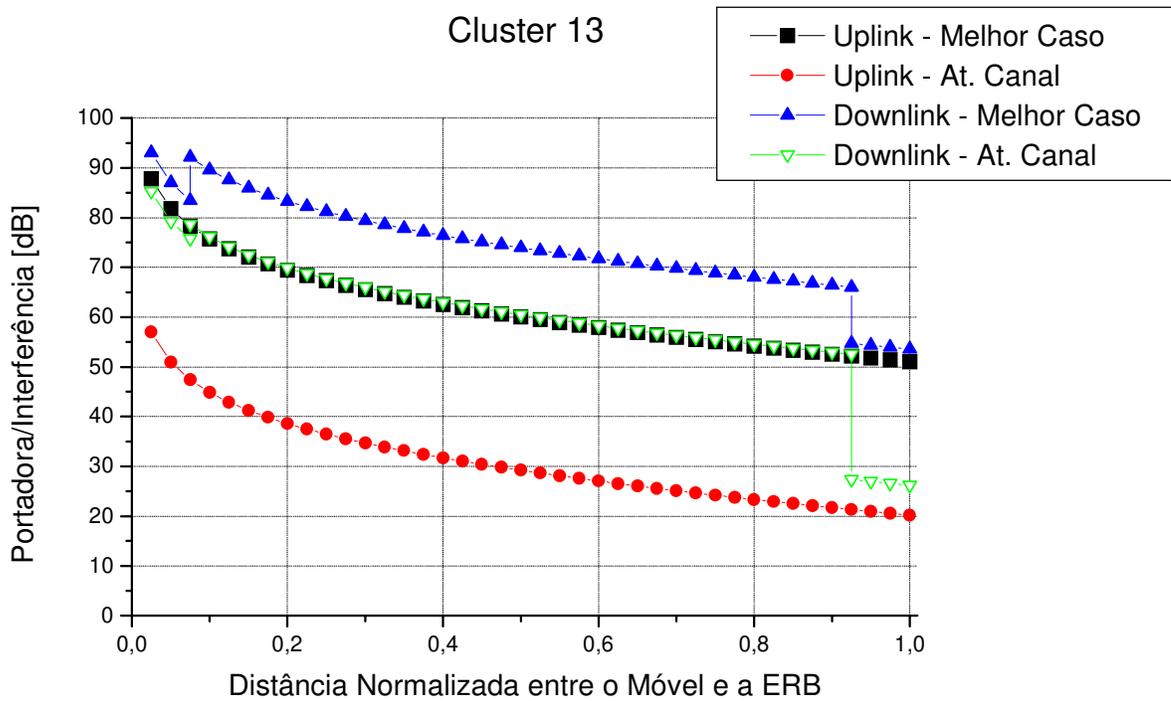


Figura 4.26 – Razão Portadora/Interferência dos enlaces direto e reverso em função da distância normalizada para clusters de 13 células: comparação entre o pior e o melhor caso.

Vemos pelas Figuras 4.19 a 4.26 que o desempenho do sistema para todos os casos melhorou muito se comparado à situação de pior caso. Para sistemas que fazem uso de *clusters* com 8, 9 e 10 microcélulas, o desempenho para os dois enlaces é praticamente o mesmo, com a exceção dos pontos bem próximos à estação rádio base servidora para os quais o desempenho do *downlink* é ligeiramente inferior ao do *uplink*. Para os sistemas com *clusters* de 5 e 13 microcélulas, o desempenho do *downlink* é melhor que o do *uplink*, o que se justifica pela disposição dos interferentes.

Os resultados do *downlink*, como esperado, são os mesmos obtidos para o caso que considera somente a probabilidade de atividade do canal analisado na Seção 4.3, pois os interferentes neste caso são as estações rádio base, que têm posição fixa.

Vale ressaltar que na esquina limítrofe das células para padrões de reuso primos, ocorre uma melhora substancial no desempenho do *downlink*. Estes pontos mostravam uma relação C/I baixa para a situação de pior caso, e agora, considerando-se uma situação mais realista, eles apresentam uma grande melhora de desempenho.

4.5 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se o estudo de interferência em uma rede microcelular para sistemas utilizando padrões de reuso iguais a 5, 8, 9, 10 e 13. Considerou-se um caso mais próximo do real do que aquele de pior caso analisado no Capítulo 3, levando-se em consideração o posicionamento aleatório de móveis interferentes dentro de suas células servidoras e a atividade do canal de acordo com um determinado tráfego. Foi considerada uma distribuição uniforme dos móveis dentro da célula e utilizou-se 8 canais por célula com uma probabilidade de bloqueio igual a 2%. Para casos reais de análise, podem ser utilizadas distribuições de tráfego de acordo com observações feitas no local. Certamente, esta distribuição não será uniforme, mas com maior concentração em ruas principais e menor concentração em ruas secundárias.

Para os cálculos neste capítulo também utilizou-se um número infinito de interferentes (600 camadas). Como realizar os cálculos da razão C/I para um número infinito de interferentes nos casos que atribuem uma probabilidade ao posicionamento dos móveis e à atividade do canal tornaria o problema inviável, e limitar o número de interferentes poderia comprometer os resultados, os interferentes foram então divididos em dois grupos: aqueles pertencentes às camadas mais próximas da célula alvo (*camadas internas*), e aqueles pertencentes às outras camadas (*camadas externas*). Por motivos de praticidade, somente aos interferentes do primeiro grupo foram atribuídas propriedades aleatórias. Os outros interferentes foram mantidos na condição de pior caso. Mostrou-se neste trabalho que 6 camadas de interferentes de *camadas internas* é suficiente para chegar a resultados estatisticamente confiáveis.

No decorrer do capítulo foram feitas várias análises dos desempenhos encontrados para os sistemas estudados, mostrando, principalmente, a razão da melhora destes em determinados casos. Os resultados mostraram uma melhora substancial de desempenho para todos os casos quando comparados aos da situação de pior caso. Deve-se lembrar que foram considerados para os cálculos de interferência total somente os interferentes em condição de visada com a célula alvo. Assim, os resultados aqui obtidos podem ser considerados como limitantes superiores de desempenho, enquanto que os resultados obtidos no Capítulo 3 podem ser considerados como limitantes inferiores de desempenho.

Como a atenuação de sinais obstruídos é muito maior que a de sinais com condição de visada, espera-se que o desempenho de sistemas reais se aproxime mais do limitante superior do que do limitante inferior.

Apêndice 4A

Posicionamento dos interferentes para padrões de reuso microcelulares

Utilizam-se as distâncias dadas abaixo para os casos em que considera-se a probabilidade do móvel estar em linha de visada. Para a situação de posicionamento de pior caso utilizam-se as distâncias para os interferentes dadas no Capítulo 3.

As definições dos quatro grupos de *clusters* abaixo encontra-se na Seção 3.3 desta tese. Exemplos dos mesmos podem ser encontrados nas Figuras 3.1 a 3.6.

(obs: $k \in Z$)

Grupo 1: Colineares

Neste caso, utilizamos a variável m como sendo $m = i$ ou $m = j$, sendo a escolha entre os dois dada para qualquer valor não nulo.

- $d_{\min} = 2m$
- Uplink: $n_k = 2mk$
- Downlink: $\begin{cases} \text{Região 1: } n_k = 2mk \\ \text{Região 2: } n_k = 2mk \end{cases}$

Grupo 2: Não-colineares Pares

- $d_{\min} = N$
- Uplink: $n_k = Nk$
- Downlink: $\begin{cases} \text{Região 1: } n_k = Nk \\ \text{Região 2: } n_k = Nk \end{cases}$

Grupo 3: Não-Colineares Ímpares-Não-Primos

Define-se N' como $N' = \frac{N}{m}$, $m \in \mathbb{Z}$. Então

- $n_k = m \times n_{k(N')}$

onde $d_{\min(N')}$ é a distância mínima entre co-células alinhadas para o mesmo padrão de reuso N' .

Grupo 4: Não-Colineares Primos

Definimos p como sendo o número primo imediatamente anterior a N

- $d_{\min} = 2N$

- Uplink:
$$\begin{cases} n_{3(k-1)+1} = p + 2N(k-1) \\ n_{3(k-1)+2} = 2N - p + 2N(k-1) \\ n_{3(k-1)+3} = 2Nk \end{cases}$$

- Downlink:
$$\begin{cases} \text{Região 1: } n_k = 2Nk \\ \text{Região 2: } n_k = 2Nk \\ \text{Região 3: } \begin{cases} n_k = 2Nk \\ \bar{n}_{2(k-1)+1} = p + 2N(k-1) \\ \bar{n}_{2(k-1)+2} = 2N - p + 2N(k-1) \end{cases} \end{cases}$$

Note que somente o quarto grupo possui as distâncias dos interferentes para o enlace direto no caso em que o móvel chega ao limite da célula, adquirindo nova linha de visada, e novos interferentes.

Apêndice 4B

Número de camadas interferentes aos quais se deve atribuir caráter aleatório

O sistema considerado no Capítulo 4 leva em conta um número infinito de interferentes. Deve-se notar que os cálculos da razão portadora/interferência total média para um número infinito de interferentes nos casos que consideram os móveis interferentes posicionados aleatoriamente ou a atividade do canal de acordo com um dado tráfego, ou no caso que une os dois anteriores tornam o problema inviável. Limitar o número de interferentes, no entanto, pode comprometer os resultados. Então, os interferentes foram divididos em dois grupos: aqueles pertencentes às camadas mais próximas da célula alvo (*camadas internas*), e aqueles pertencentes às outras camadas (*camadas externas*). Por motivos de praticidade, somente aos interferentes do primeiro grupo foram atribuídas propriedades aleatórias. Os outros interferentes foram mantidos na condição de pior caso. O propósito, então, é determinar o número necessário de camadas no grupo de *camadas internas* para chegar a resultados estatisticamente confiáveis.

Os cálculos foram realizados para 600 camadas de microcélulas interferentes, e com os mesmos parâmetros de sistema utilizados em todo o Capítulo 3. O número de *camadas internas* foi variado progressivamente partindo de 1 até atingir um número para o qual os resultados se mostram estatisticamente estáveis.

As Figuras 4B.1 a 4B.2 mostram respectivamente para os enlaces direto e reverso de *clusters* com 5 microcélulas, a diferença entre o cálculo do desempenho feito utilizando-se um número x e um número $x-1$ de camadas internas. Estes números, nos gráficos, aparecem nas legendas entre colchetes. Por exemplo, um dos resultados mostrados é a diferença entre o cálculo do desempenho utilizando-se duas camadas de interferentes com características aleatórias (e o restante na situação de pior caso) e o resultado do cálculo utilizando-se uma única camada no grupo de camadas internas. As Figuras 4B.3 e 4B.4 mostram resultados análogos para um sistema com padrão de reuso de 10 microcélulas por cluster. Os resultados para clusters de 8 e 9 microcélulas são análogos aos de 10 microcélulas, e os resultados para clusters de 13 microcélulas são análogos aos de 5

microcélulas. Pode-se notar pelos gráficos que a diferença entre os cálculos torna-se cada vez menor à medida que aumenta o número de camadas no grupo de camadas internas. Deve-se, agora, estabelecer qual é um bom limite de erro para propósitos práticos. Sabe-se que existe um próprio erro intrínseco de modelagem, que torna sem sentido uma precisão extremada de cálculos matemáticos.

É interessante notar que o tempo de processamento do cálculo do desempenho aumenta muito com o aumento do número de camadas no grupo de *camadas internas*. Isto deve-se ao fato de o número de combinações de possibilidades de posicionamento dos interferentes aumentar demasiado. Portanto, encontrar um bom número de camadas de interferentes aos quais será atribuído caráter aleatório para o cálculo de desempenho do sistema deve levar em conta também o tempo de processamento. Por exemplo, os cálculos utilizando-se 9 camadas internas levam aproximadamente uma semana para um único enlace e para um único padrão de reuso, em um Pentium II, 300 MHz, com 168Mbytes de RAM. Já os cálculos utilizando-se 6 ou menos camadas internas são processados em poucos minutos, para as mesmas condições.

A título de argumentação, explicita-se na Tabela 4B.1 alguns resultados dos gráficos anteriores, para o único valor de distância normalizada à ERB de 0,5 e para clusters de 10 microcélulas. Verifica-se que a diferença entre os valores da relação portadora/interferência obtidos para 5 e 4 camadas de interferentes no grupo de camadas internas já é menor do que 1dB, e entre 6 e 5 camadas é menor ainda. Este valor é aceitável para aplicações em comunicações móveis. Chega-se à mesma conclusão ao se analisar os resultados para outras distâncias e para outros padrões de reuso.

Assim, são utilizadas 6 camadas de interferentes no grupo de camadas internas para o cálculo dos resultados apresentados no Capítulo 4. Este número mostrou levar a resultados confiáveis num bom tempo de processamento. Vale notar também que é um número bem realista, já que não existem muitos sistemas com um número maior de células (deve-se lembrar que não estamos falando de seis camadas de células, e sim seis camadas de co-células).

	<i>Cluster de 10 células Enlace Direto</i>	<i>Cluster de 10 células Enlace Reverso</i>
[2]-[1]	3.0446	3.9522
[3]-[2]	1.5424	2.2030
[4]-[3]	0.8748	1.3624
[5]-[4]	0.5314	0.9028
[6]-[5]	0.3392	0.6260
[7]-[6]	0.2248	0.4482
[8]-[7]	0.1537	0.3292

Tabela 4B.1 – Valores da diferença da relação C/I calculada para distintos números de camadas de interferentes no grupo de camadas internas, para o móvel alvo localizado a uma distância normalizada da ERB igual a 0,5 (50m)

Finalmente, vale observar a diferença dos resultados para o enlace reverso de clusters com número primo de células (Figura 4B.2) e de clusters com número não-primo de células (Figura 4B.4). No segundo caso, como pode ser visto nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, todas as co-microcélulas possuem a mesma proporção em condição de visada. Já no primeiro, como pode ser visto nas Figuras 3.1 e 3.5, isto não é verdade. Algumas camadas de interferentes têm apenas uma esquina em condição de visada, enquanto outras possuem a rua inteira em condição de visada. Assim, a diferença entre os resultados considerando-se número diferente de camadas no grupo de camadas internas nem sempre diminui. Quando uma camada com interferentes em maior condição de visada é adicionada, essa diferença pode aumentar. No entanto, a tendência geral dessa diferença continua sendo de diminuir, e, portanto, o resultado acima continua válido.

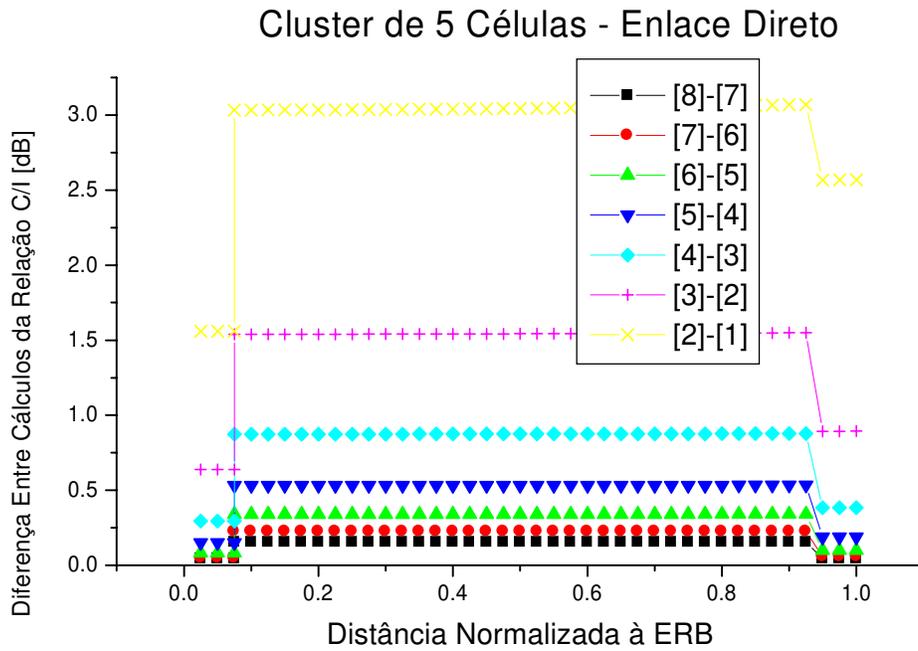


Figura 4B.1 – Diferença da relação C/I calculada para distintas condições em função da distância para o enlace direto e clusters de 5 microcélulas.

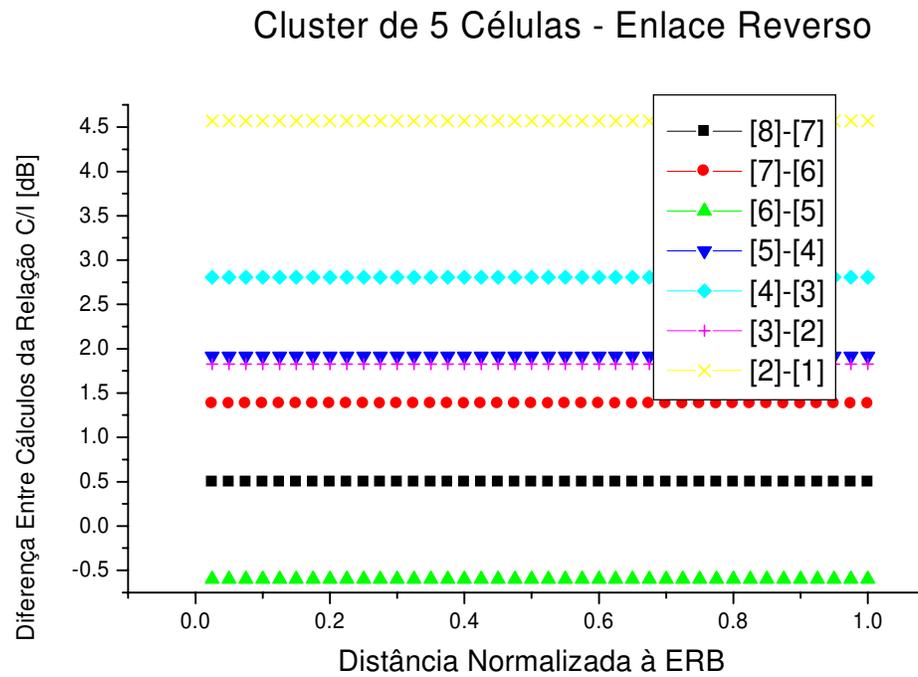


Figura 4B.2 – Diferença da relação C/I calculada para distintas condições em função da distância para o enlace reverso e clusters de 5 microcélulas.

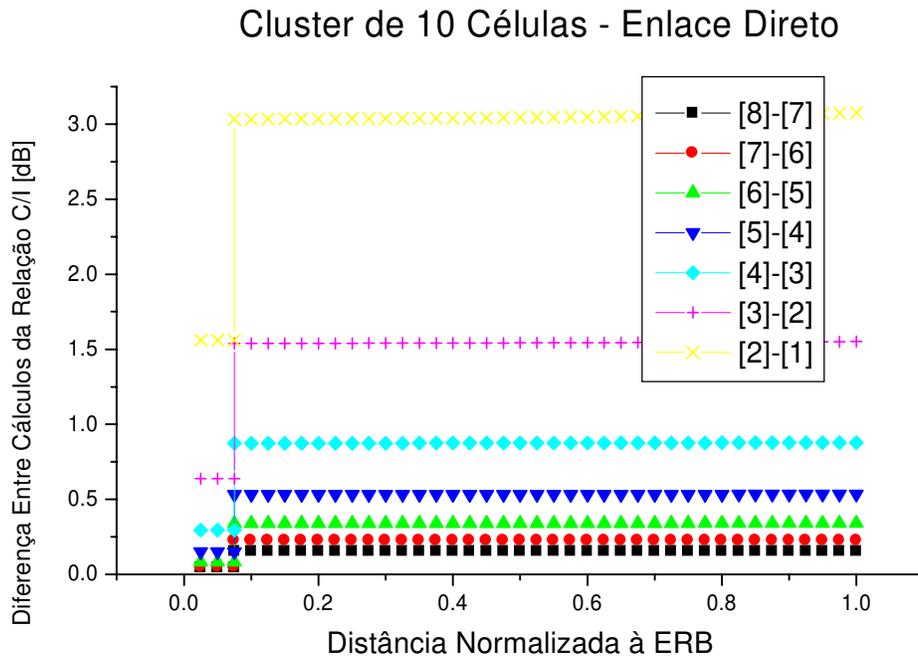


Figura 4B.3 – Diferença da relação C/I calculada para distintas condições em função da distância para o enlace direto e clusters de 10 microcélulas.

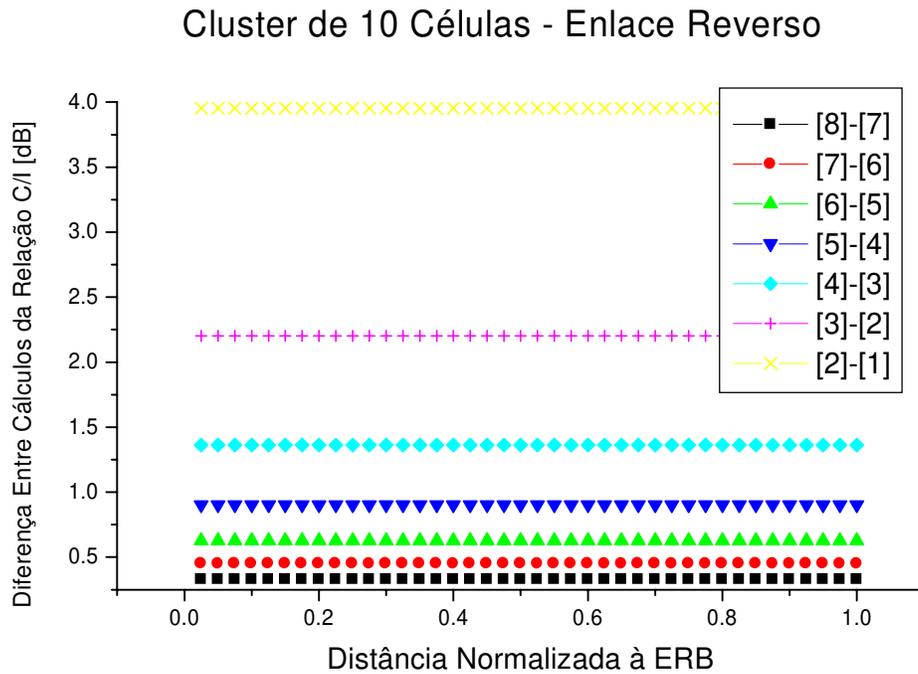


Figura 4B.4 – Diferença da relação C/I calculada para distintas condições em função da distância para o enlace reverso e clusters de 10 microcélulas.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusões

A expansão e a evolução das redes sem fio devem ser apoiadas por uma vasta estrutura microcelular, tanto para satisfazer as altas demandas de tráfego em regiões densamente urbanas, como para prover serviços de baixa mobilidade. O conceito de redes microcelulares é bastante diferente daquele de redes macrocelulares, empregados em larga escala em sistemas celulares analógicos e digitais. Em sistemas macrocelulares, as antenas das estações rádio base são posicionadas acima da maior obstrução da sua área de cobertura. Já em sistemas microcelulares, as antenas são posicionadas abaixo do nível dos prédios, confinando o sinal nas ruas. Assim, a pressuposta simetria de propagação em

sistemas macrocelulares não é mais válida e portanto os padrões de reuso baseados em células de formato hexagonal também não fazem mais sentido.

A cobertura ubíqua de uma área de serviço baseada em uma rede microcelular terá que fazer uso de um número de estações rádio base muito maior que aquele utilizado por uma rede macrocelular. Os maiores requisitos de capacidade de processamento e o grande aumento no número de *handoffs* efetuados (devido ao pequeno tamanho das células) chama a atenção para os custos de tal tipo de projeto. Portanto, dentre os fatores importantes a serem levados em conta no planejamento de um sistema microcelular, o custo por assinante é determinante. Este custo, por sua vez é intimamente relacionado com a eficiência com a qual os recursos de rádio são re-utilizados em uma dada área de serviço. A eficiência de reuso depende do ambiente interferente da rede e da habilidade da tecnologia envolvida em lidar com as fontes interferentes.

Os estudos de interferência em sistemas macrocelulares é muito facilitado pela simetria do problema. No caso microcelular, a assimetria inerente ao problema implica em um fator complicador adicional. Neste caso, a interferência depende tanto da distância entre o transmissor e o receptor, quanto, e principalmente, da condição de visibilidade (LOS – *Line-of-Sight*) do caminho de rádio. Por exemplo, considere um sistema com suas estações rádio base posicionados nas interseções das ruas, como mostra a Figura 1.1. Usuários móveis deslocando-se nas ruas radiais a estas estações rádio base podem encontrar um padrão de interferência que varia ao longo da rua, a medida que partem da vizinhança de suas estações rádio base servidoras, onde o sinal desejado é forte e os sinais interferentes relevantes estão obstruídos por edifícios (NLOS - *non-Line-of-Sight*) e se aproximam de novas interseções, nas quais podem ter condição de visibilidade não só para sua estação rádio base servidora, mas também para estações rádio base interferentes. Portanto, a situação de interferência seguirá um padrão completamente distinto em ruas perpendiculares. Novamente, a assimetria do problema é agravada pela distribuição de tráfego, que tem maior probabilidade de ter configurações não uniformes, com as ruas e avenidas principais tendo mais usuários móveis do que as ruas secundárias.

Assim, pode-se dividir em dois tipos a propagação em sistemas microcelulares: propagação em linha de visada (LOS: *Line-of-Sight propagation*) e propagação obstruída (NLOS: *non-Line-of-Sight propagation*). Os dois modos de propagação são bem diferentes entre si. No modo de propagação obstruída, a média da potência do sinal decai monotonicamente com a distância, enquanto que no modo com linha de visada o comportamento do decaimento da propagação pode ser dividido em duas partes: para distâncias menores que o *breakpoint*, a potência média do sinal decai com uma lei exponencial próxima daquela do espaço livre ($\alpha \approx 2$); e para distâncias maiores que o *breakpoint*, a lei exponencial se aproxima muito daquela de uma propagação de plano reto terrestre ($\alpha \approx 4$). Vale notar que a propagação NLOS é sempre muito menor que a propagação LOS. Por esta razão, nos cálculos de desempenho realizados neste trabalho, foram considerados somente os interferentes que possuíam condição de visada com a célula alvo.

Baseado em vários estudos anteriores [MEDIDAS], este trabalho propôs novos padrões de reuso para sistemas microcelulares utilizando células quadradas como blocos construtores. Formalizamos a teoria de reuso microcelular e apresentamos a tesselação dos padrões de reuso mais prováveis de serem implementados em sistemas microcelulares urbanos. Partimos então para o objetivo principal deste trabalho de tese: investigar o desempenho desses sistemas. Para tanto utilizamos como modelo um centro urbano cujas ruas formam uma grade quadrangular perfeita, e localizamos as estações rádio base a cada duas esquinas, de forma colinear, como mostra a Figura 2.11. Assim, cada microcélula cobre quatro setores de 90°, sendo cada setor definido por metade de uma quadra dividida em sua diagonal.

O desempenho dos sistemas microcelulares foi analisado através da relação portadora/interferência (C/I - *carrier-to-interference ratio*) inicialmente para os móveis interferentes posicionados na situação de pior caso e com o sistema funcionando a plena carga, e em seguida, para situações mais realistas, com os móveis interferentes posicionados aleatoriamente e para uma dada atividade de canal. Para tanto, foram apresentadas fórmulas fechadas para o cálculo da relação portadora/interferência C/I para o novo padrão de reuso microcelular. Para todos os casos, foram apresentados os resultados

dos desempenhos de sistemas com *clusters* de 5, 8, 9, 10 e 13 microcélulas, tanto para o enlace direto (*downlink*) como para o enlace reverso (*uplink*). As Figuras 3.1 a 3.5 mostram a tesselação destes padrões de reuso. Nelas, os círculos indicam os interferentes para o *uplink* posicionados na situação de pior caso, e as estrelas indicam os interferentes para o *downlink*.

Os cálculos de desempenho apresentados foram avaliados considerando-se o móvel partindo do centro da célula alvo em direção à sua borda, utilizando um sistema com microcélulas de raio igual a 100m, largura de rua de 15m, frequência de operação de 890MHz, altura das antenas transmissoras e receptoras de 4m e 1,5m respectivamente.

Para conseguir um resultado preciso da relação portadora/interferência foi necessário criar-se uma formulação geral para a determinação dos valores das distâncias entre os interferentes da L-ésima camada e a célula alvo. No caso das macrocélulas, que utilizam mosaicos de células hexagonais, a distância entre uma célula e sua interferente é ditada diretamente pelo número de células no *cluster* e pelo raio da célula. Já no caso das microcélulas, como a radiação das antenas não se dá por igual em todas as direções, as distâncias variam de acordo com o tipo de tesselação. Por exemplo, em uma tesselação tortuosa, o bloqueio de sinais vindos de co-células é maior do que no caso em que todas as co-células são colineares, e portanto apresentam interferentes mais distantes. Os padrões de reuso de células quadradas foram divididos em quatro grupos, dentro dos quais foi desenvolvida a uma regra comum de disposição das co-células interferentes.

Esta distância pode ser obtida através de uma simples inspeção visual, como podemos ver claramente através das Figuras 3.1 a 3.6. No entanto, este método é válido para um número limitado de camadas. A formulação apresentada possibilitou encontrar todos os possíveis interferentes para cada padrão de reuso estudado, e portanto utilizá-la para cálculos bem precisos de interferência. Assim, nos cálculos de desempenho, utilizou-se um número infinito de camadas de interferentes (na prática, 600 camadas).

Os resultados para a situação de pior caso, na qual consideraram-se os interferentes situados na posição de maior interferência e o sistema funcionando em plena carga, mostram uma diferença substancial de desempenho para os enlaces reverso e direto, com o primeiro desempenhando-se menos satisfatoriamente que o último. Essa diferença tem a tendência geral de diminuir a medida que o número de células no *cluster* aumenta (tendo, no entanto, alguns casos particulares).

Observou-se que, ainda para a situação de pior caso, sistemas que fazem uso de *clusters* com 9 e 10 microcélulas apresentam um desempenho excelente e que, se explorado de forma apropriada, pode-se encontrar uma notável compensação entre capacidade e interferência para sistemas com *clusters* de 5 microcélulas. Este padrão de reuso apresenta desempenho igual ao de sistemas com *clusters* de 8 microcélulas para o *uplink*, e igual ao de sistemas com *clusters* de 10 células para a maior parte de trajetória na microcélula para o *downlink*, piorando muito na esquina limítrofe da microcélula. O grande problema encontrado no desempenho de sistemas com este padrão de reuso foi exatamente na esquina limítrofe. Porém, ao considerar casos mais realistas vimos que o desempenho destes sistemas melhora muito nesta região.

Vale ressaltar que todos os resultados para o enlace reverso mostrados neste trabalho podem ser ainda melhorados se levarmos em conta o controle de potência das unidades móveis não considerado para os cálculos.

Com o objetivo de examinar a influência do número de camadas de co-células interferentes no resultado do desempenho do sistema microcelular analisou-se o desempenho de uma rede microcelular com uma única camada de interferentes (a primeira camada) e comparou-se os resultados de desempenho àqueles obtidos com um número infinito de camadas interferentes (600 camadas). Observou-se que a diferença de valores da relação portadora/interferência para os dois casos foi imperceptível. Assim, consideramos o cálculo utilizando uma única camada de interferentes como uma boa aproximação do cálculo de relação portadora/interferência (C/I) com os interferentes localizados na situação de pior

caso, e com o sistema funcionando a plena carga. Neste caso, as equações da razão C/I são muito simplificadas e de fácil manipulação.

Em seguida considerou-se o cálculo de desempenho para um caso mais próximo do real, levando-se em consideração o posicionamento aleatório de móveis interferentes dentro de suas células servidoras e a atividade do canal de acordo com um determinado tráfego. Foi considerada uma distribuição uniforme dos móveis dentro da célula e utilizou-se 8 canais por célula com uma probabilidade de bloqueio igual a 2%.

Para os cálculos deste caso também utilizou-se um número infinito de interferentes (600 camadas). Deve-se notar que os cálculos da razão portadora/interferência total média para um número infinito de interferentes nos casos que consideram os móveis interferentes posicionados aleatoriamente e a atividade do canal de acordo com um dado tráfego tornariam o problema inviável. Limitar o número de interferentes, no entanto, poderia comprometer os resultados. Então, os interferentes foram divididos em dois grupos: aqueles pertencentes às camadas mais próximas da célula alvo (*camadas internas*), e aqueles pertencentes às outras camadas (*camadas externas*). Por motivos de praticidade, somente aos interferentes do primeiro grupo foram atribuídas propriedades aleatórias. Os outros interferentes foram mantidos na condição de pior caso. Mostrou-se neste trabalho que 6 camadas de interferentes de *camadas internas* é suficiente para chegar a resultados estatisticamente confiáveis.

Os resultados de desempenho para estas situações mais realistas mostraram-se substancialmente melhores que aqueles para a situação de pior caso. No entanto, como os interferentes obstruídos não foram levados em conta no cálculo de desempenho destes sistemas, estes resultados foram considerados como sendo os *limitantes superiores* de desempenho do sistema, enquanto que os resultados para a situação de pior caso foram considerados como sendo os *limitantes inferiores* de desempenho do sistema. Temos assim determinada a margem dentro da qual o sistema deve operar. No entanto, como a atenuação de sinais obstruídos é muito maior que a de sinais em condição de visibilidade, e como a

situação de pior caso é muito pior que a situação real, espera-se que o desempenho de sistemas reais se aproxime mais do limitante superior do que do limitante inferior.

Se analisarmos os valores da relação portadora/interferência para os dois enlaces de todos os padrões de reuso analisados para o melhor caso, vemos que todos superam em muito os 18dB de requisição de qualidade mínima de um sistema celular sugeridos por [MCDON79]. Isto resultaria no excelente resultado da viabilidade de sistemas utilizando padrão de reuso igual a 5 com antenas omnidirecionais, para sistemas urbanos operando na faixa de 900MHz, resultando em uma eficiência espectral muito superior à do padrão de reuso igual a 7 com antenas tri-setorizadas, tão comumente utilizados em sistemas macrocelulares de tecnologias AMPS e TDMA (IS-136).

5.2 Trabalhos Futuros

5.2.1 Propagação obstruída

Neste trabalho de tese fizemos a análise de desempenho considerando sinais com propagação em linha de visada. Seria interessante analisar-se também a influência de sinais com propagação NLOS. Esta nova consideração possibilitaria fazer a correção no cálculo de desempenho de melhor caso apresentado nesta tese, aproximando-o mais da realidade.

O sistema analisado neste trabalho considera células de um quarteirão de raio. Este tamanho de microcélulas é bem próximo do real, já que a demanda por serviços móveis celulares tem se tornado cada vez maior e, conseqüentemente, a concentração de usuários também. No entanto, se for de interesse a análise de sistemas com microcélulas maiores, a inserção da propagação obstruída na análise de desempenho se faz necessária, já que existirão pontos nas microcélulas nos quais o próprio sinal da estação rádio base servidora estará obstruído.

5.2.2 Outage Probability

Este trabalho de tese considerou apenas a relação C/I em termos do seu valor médio. Uma extensão imediata do trabalho consideraria a probabilidade de a razão C/I exceder os requisitos de qualidade de serviço do sistema (C/I instantâneo). Para isto, diversas distribuições de probabilidade para o sinal em desvanecimento poderiam ser consideradas. A condição de visada ou não dá ensejo a que um número grande de combinações destas distribuições possa ser utilizado. Por exemplo, para os sinais em condição de visada as distribuições Rice ou Nakagami se aplicariam. Para os sinais obstruídos as distribuições Rayleigh, lognormal e as compostas Rayleigh-lognormal, Rice-lognormal e Nakagami lognormal seriam apropriadas. Um trabalho para sistemas macrocelulares neste tema pode ser encontrado em [KEFFE97].

5.2.3 Hierarquia Celular

Este trabalho de tese considerou sistemas microcelulares isolados. Em geral, sistemas mega-, macro-, micro- e picocelulares co-existem no mesmo ambiente e são dispostos em hierarquia. Seria interessante, então, analisar o desempenho de sistemas microcelulares considerando a influência que outros sistemas co-existentz causam nele.