

## 2 Sistemas Celulares

### 2.1 Conceitos Básicos de Sistemas Celulares

A idéia do conceito celular foi introduzida pela necessidade de reuso da faixa de espectro alocada para o serviço móvel celular. Através da configuração celular, o número limitado de canais RF disponíveis pode ser repetido em diferentes grupos de células (conhecidos como *clusters*) aumentando-se, assim, a capacidade de tráfego do sistema.

Uma consequência imediata do reuso de frequências num sistema celular é a existência de células que utilizem o mesmo grupo de frequências. Estas células são chamadas de *co-canais* e a interferência entre os sinais provenientes destas células é chamada *interferência co-canal*.

Em sistemas celulares, a distribuição de canais entre as estações base vizinhas é feita de forma que a interferência entre estações base e entre usuários móveis seja reduzida.

A seguir são apresentados os principais conceitos usados em sistemas móveis celulares.

#### 2.1.1 Razão de Reuso

Um parâmetro importante no planejamento de sistemas celulares é a razão de reuso. Para uma configuração de células hexagonais homogênea, a razão de reuso  $Q$  é dada pela expressão (2.1) abaixo:

$$Q = \frac{D}{R_C} = \sqrt{3N} \quad (2.1)$$

onde:

$D$  é a distância entre os grupos de células co-canais (células que possuem os grupos de canais em comum),

$R_C$  é o raio da célula e

$N$  é o número de células por *cluster* também chamado de fator de reuso.

Observando (2.1) pode-se ver que na razão de reuso existe um compromisso entre a capacidade de tráfego e a qualidade do sistema. Supondo um número constante de canais disponíveis, nota-se que o aumento do fator de reuso implica uma maior imunidade à interferência co-canal e, além disto, o aumento do número de células por *cluster* que resulta numa redução do número de canais por célula que tem por consequência a redução da capacidade do sistema. O inverso também acontece. Diminuindo-se o fator de reuso, o sistema fica menos imune a interferências, porém comporta mais usuários simultaneamente.

**Tabela 2.1** Fator de Reuso, Razão de Reuso, Capacidade de Tráfego e Qualidade de Transmissão

Fator de Reuso	$D/R_C$	Capacidade de Tráfego	Qualidade de Transmissão
1	1.73	Maior	Pior
3	3.00		
4	3.46	↑	↓
7	4.58		
9	5.20		
12	6.00	Menor	Melhor

Um canal só poderá ser reutilizado se os níveis de interferência, medidos pela razão sinal interferência,  $C/I$ , em cada co-canal estejam acima de um limiar de  $C/I_{min}$ .

### 2.1.2 Handoff

*Handoff* é o mecanismo de transferir o controle de uma chamada em andamento de um setor para outro dentro de uma mesma célula, chamado de *handoff* intra-celular, ou de uma célula para outra, *handoff* inter-celular.

Um aspecto importante do *handoff* é a duração do procedimento. Se o *handoff* não ocorrer rapidamente, o nível de recepção do sinal no terminal móvel pode cair abaixo de um limiar aceitável e a ligação terminar. Porém ele não poderá ser muito rápido pois o nível do sinal pode apresentar flutuações rápidas devidas a multipercursos de propagação. Uma maneira de mitigar o efeito destas flutuações é a utilização de uma janela de medidas.

Esta janela de medidas é composta pelo conjunto das últimas medidas de intensidade do sinal recebido realizadas pelo terminal móvel. O tamanho e a forma da janela indicam quantas e o quanto as medidas anteriores influenciam no procedimento. Utilizando-se uma janela retangular, por exemplo, é efetuada

uma média aritmética das amostras. Já com uma janela de forma exponencial, é realizada uma média ponderada dando mais importância às medidas mais recentes.

Uma janela muito curta não resolve o problema de quedas rápidas no sinal recebido, por outro lado, uma janela longa pode provocar um atraso maior na tomada da decisão de *handoff*.

Ao utilizar apenas a intensidade relativa do sinal, muitos *handoffs* desnecessários são provocados quando o terminal encontra-se numa região de transição entre duas células. Nestes locais, os sinais possuem amplitudes muito parecidas e ocorre o chamado efeito *ping-pong*, onde o móvel fica fazendo *handoff* de ida e volta.

A utilização de uma margem de histerese serve para combater o efeito *ping-pong*. O terminal só troca de base se o sinal da ERB candidata for suficientemente maior que o recebido na atual, acrescido de uma margem, chamada margem de histerese.

### 2.1.3 Interferência

A interferência é o grande fator limitante da capacidade de um sistema celular. Algumas fontes de interferência podem ser descritas, incluindo-se [1]: outro móvel na mesma célula, uma chamada em andamento em uma célula vizinha, outras estações base operando na mesma faixa de frequências ou algum sistema não-celular que cause interferência ao sistema celular. Os dois principais tipos de interferência gerada no próprio sistema celular são a interferência co-canal e a interferência de canal adjacente.

Para combater a interferência co-canal, um aumento na potência de transmissão não é suficiente, pelo contrário, esta medida implicaria um aumento na interferência co-canal. A redução da interferência se dá quando as células co-canais são separadas fisicamente de uma *distância de reuso*. Para uma configuração hexagonal, ilustrada anteriormente, esta distância é dada por (2.1).

Quando utiliza-se uma configuração celular com geometria hexagonal, a interferência co-canal causada pelo reuso de frequências pode ser calculada considerando-se 6 células interferentes a uma distância  $D$  (primeiro anel interferente), 12 células interferentes a uma distância  $2D$  (segundo anel interferente) e assim sucessivamente.

Considerando-se uma lei de potência para a perda de propagação com a distância, isto é:

$$P_R = P_T d^{-\gamma} \quad (2.2)$$

a relação entre o sinal desejado e a interferência co-canal é dada por [2]:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{k1=1}^6 I_{k1} + \sum_{k2=1}^{12} I_{k2} + \sum_{k3=1}^{18} I_{k3} + \dots} \quad (2.3)$$

$$\frac{C}{I} = \frac{P_T d^{-\gamma}}{6P_T D^{-\gamma} + 12P_T (2D)^{-\gamma} + 18P_T (3D)^{-\gamma} + \dots} \quad (2.4)$$

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6 \left(\frac{D}{R_C}\right)^{-\gamma} (1 + 2^{-\gamma} \cdot 2 + 3^{-\gamma} \cdot 3 + \dots)} \quad (2.5)$$

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6 \left(\frac{D}{R_C}\right)^{-\gamma} \sum_{k=1}^{\infty} k^{1-\gamma}} \quad (2.6)$$

Uma aproximação usual consiste em considerar apenas o primeiro anel interferente, logo:

$$\frac{C}{I} \cong \frac{1}{6 \left(\frac{D}{R_C}\right)^{-\gamma}} = \frac{q^\gamma}{6} \quad (2.7)$$

As interferências consideradas até então eram causadas por usuários que utilizavam o mesmo canal em células diferentes. Interferências que resultam de sinais que estão numa faixa de frequências adjacente à faixa do sinal desejado são chamadas interferências de canal adjacente. Em alguns casos, a estação base pode ter dificuldade em discriminar o usuário cujo sinal está mais fraco. A interferência de canal adjacente (ICA) pode ser minimizada através de filtragem adequada e uma correta alocação de canais entre células [2]. Ela é dada, em dB, por:

$$ICA = -10 \log \left[ \left( \frac{d_i}{d_c} \right)^\gamma \right] - IC \quad (2.8)$$

onde:

$d_i$  é a distância entre a ERB (Estação Rádio-Base) que contém o canal adjacente e o móvel,

$d_c$  é a distância entre a ERB que possui o canal desejado e o móvel e

$IC$  é o isolamento de canal adjacente, dependente da filtragem (valor típico 26 dB).

O pior caso de interferência de canal adjacente acontece quando o móvel está próximo à fronteira entre duas células que operam em planos de frequência que utilizam canais adjacentes. Como mencionado anteriormente, o problema de interferência de canal adjacente não faz parte do escopo da ferramenta desenvolvida neste trabalho.

#### 2.1.4 Setorização

Na seção anterior foi visto que a interferência é um dos principais fatores limitantes da capacidade de um sistema celular. Uma das formas de mitigar este problema é obtida através da setorização. Este processo consiste em substituir a antena omnidirecional de cada ERB por antenas direcionais que irradiam em uma determinada direção (setor). A cobertura setorizada por antenas diretivas reduz o número de co-canais interferentes, que são rejeitados pelo diagrama de radiação mais estreito. Isto permite a redução da separação entre células co-canais em relação ao caso não setorizado. Para setores iguais, o fator de redução de fontes interferentes é dado por:

$$\alpha_s = \theta/360 \quad (2.9)$$

onde  $\theta$  é a cobertura angular (em graus) de cada setor. Para três setores de 120 graus cada um, o número de fontes interferentes reduz para um terço quando comparado ao caso não setorizado.

É interessante notar que se a setorização não for acompanhada da redução da razão de reuso, haverá uma redução da capacidade do sistema.

Uma outra desvantagem da setorização é a existência do *handoff intracelular*, que ocorre quando o terminal móvel passa de um setor para outro. Este novo tipo de *handoff* acarreta aumento da carga de sinalização do sistema.

As figuras 2.1 e 2.2 ilustram as ERBs co-canais do primeiro anel interferente para um sistema que faz uso de antenas omnidirecionais e um sistema que faz uso de setorização tripla. No primeiro caso, o número de interferentes é 6 e no segundo caso este número é reduzido para 2.

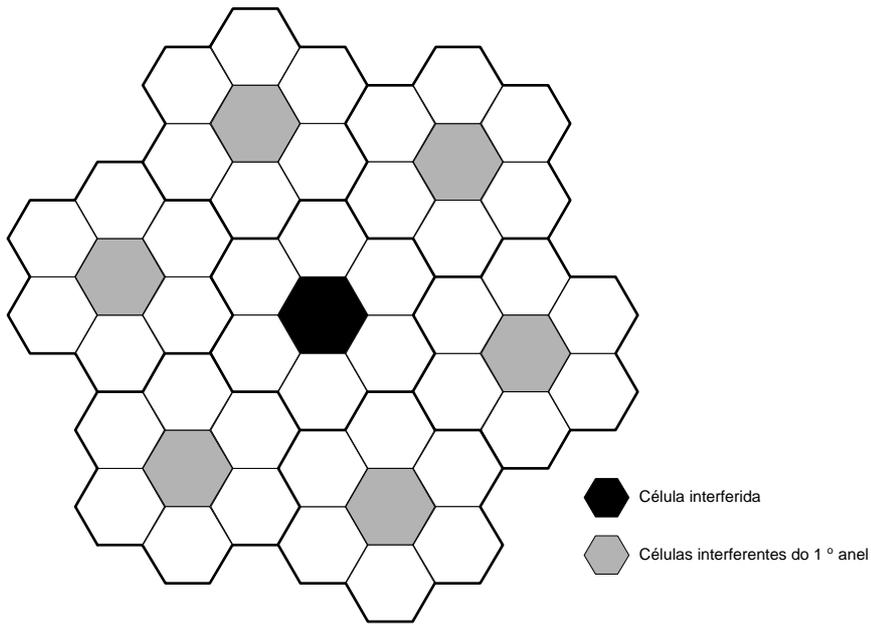


Figura 2.1 Interferência sem Setorização

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116415/CA

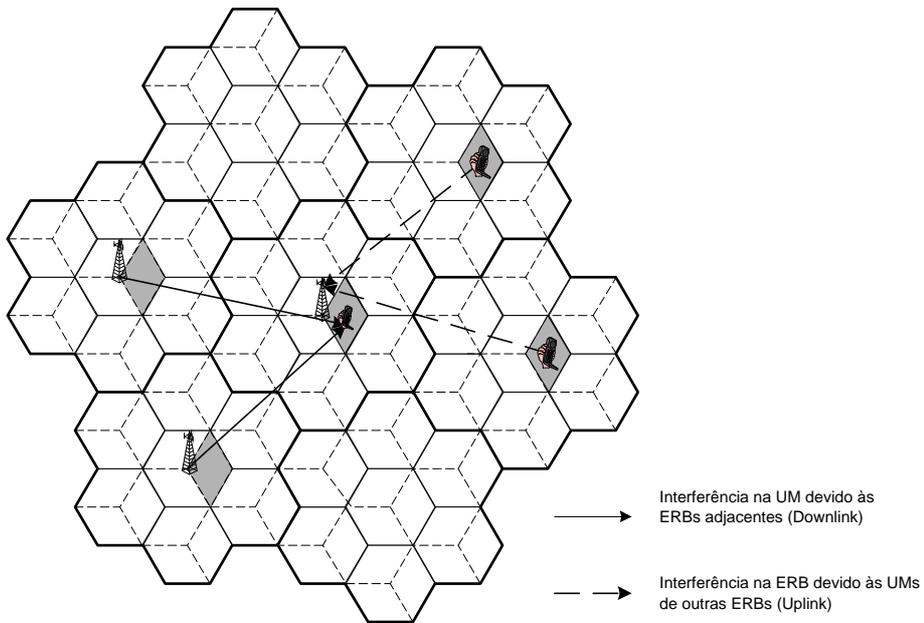


Figura 2.2 Interferência com Setorização Tripla

## 2.2 Sistemas Micro-celulares

À medida em que a demanda por serviços sem-fio aumenta, o número de canais alocados a uma determinada célula pode passar a ser insuficiente para atender ao número de usuários não oferecendo qualidade de serviço adequada.

Além da setorização, mostrada na seção anterior, a divisão celular é uma técnica utilizada para aumentar a capacidade de sistemas celulares. O seu princípio é dividir a célula congestionada em células menores, cada uma delas com a sua própria ERB. A diferença é que as antenas dessas ERBs não precisam estar localizadas à mesma altura ou transmitir à mesma potência do que anteriormente, já que o seu raio é bem menor.

Tem-se então as micro-células que podem ser classificadas em unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais dependendo de sua localização, se elas estão ao longo de uma rua ou estrada, cobrindo uma área de ruas adjacentes ou localizadas em prédios, respectivamente.

Tipicamente o transmissor de uma micro ERB transmite a baixas potências com a antena colocada à altura dos postes na rua (aproximadamente 5m) [1]. A estação móvel também transmite a baixas potências o que implica economia de bateria. Outra característica dos sistemas micro-celulares é que dada a baixa altura das antenas das ERBs comparada com a dos prédios ao seu redor, as ruas funcionam com um *corredor* para o sinal transmitido pela ERB.

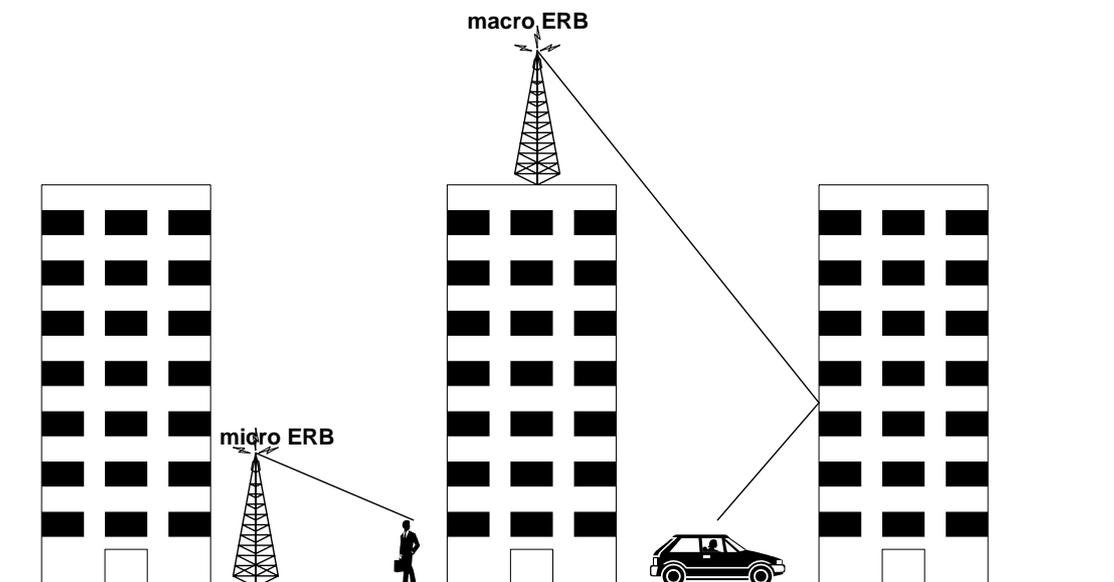


Figura 2.3 Funcionamento dos prédios como um corredor

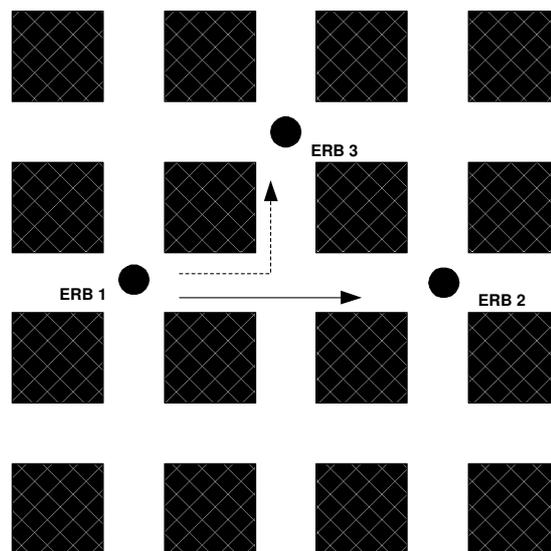
### 2.2.1

#### **Handoff em Sistemas Micro-celulares**

A gerência de *handoffs* em micro-células é muito mais difícil do que em macro-células [1]. Isto se deve ao fato de que as micro-células são muito mais sensíveis às variações de tráfego e interferência [3]. O número de *handoffs* por célula é aumentado de uma ordem de grandeza e o tempo disponível para se fazer o *handoff* torna-se bastante reduzido devido as mudanças ocorridas na topologia do ambiente de propagação. Estas mudanças acarretam sérios problemas em sistemas micro-celulares tais como o chamado *efeito de esquina*.

O efeito de esquina se dá quando um usuário móvel dobra uma esquina dentro de uma cidade. O nível do sinal recebido da estação pode cair rapidamente. Esta perda, que está, aproximadamente, em torno de 15 a 25 dB é devida à falta de visada entre a ERB e o móvel. O efeito de esquina demanda rapidez no procedimento de *handoff*, que deve ser feito logo após o usuário dobrar a esquina. Portanto, a janela de medidas não pode ser muito grande e além disso existe a probabilidade de obstáculos móveis se interporem entre o móvel e a ERB simulando o efeito de esquina.

Existe a distinção entre *handoff* LOS (*line of sight* - com visada entre o móvel e a ERB) e *handoff* NLOS (*non line of sight* - sem visada entre o móvel e a ERB). Para o caso LOS a margem de histerese pode ser útil para prevenir *handoffs* prematuros em troca de algum atraso. O *handoff* NLOS por outro lado deve ser feito o mais rápido possível.



**Figura 2.4** *Handoff* LOS (Linha Cheia) e *Handoff* NLOS (Linha Tracejada)

Como descrito acima, observam-se duas posições distintas no que tange a rapidez dos procedimentos de *handoff* LOS e NLOS. Quando o *handoff* é do tipo LOS o efeito *ping-pong* deve ser evitado, enquanto que o *handoff* do tipo

NLOS deve ser feito o mais rápido possível devido à queda brusca no nível de potência quando o usuário dobra a esquina. Algumas soluções possíveis para esta situação são [4]:

- A utilização de células guarda-chuva, que é o tema desta dissertação;
- Macro-diversidade;
- *Mobile Controlled Handoff* (MCHO).

### **Macro-diversidade**

A Macro-diversidade permite que uma estação móvel possa comunicar-se com a parte fixa da rede através de mais de um rádio-enlace, isto é, o móvel pode enviar/receber informações para/de mais de um transceptor, que são separados espacialmente, com esta distância variando desde dezenas de metros (pico-células) até alguns quilômetros (micro-células). Como as condições de propagação para cada enlace são diferentes, geralmente uma combinação dos sinais recebidos é igual ou maior do que o sinal individual, o que melhora a qualidade do rádio-enlace.

### ***Mobile Controlled Handoff* (MCHO)**

No protocolo de *handoff* MCHO o móvel possui o controle completo sobre o procedimento de *handoff*. Este tipo de *handoff* possui um tempo de reação bastante curto (da ordem de 100 ms) e é adequado para sistemas micro-celulares [5]. Como um móvel não possui informações a respeito do nível de sinal dos outros móveis, então, se algum procedimento de *handoff* estiver em curso o mesmo não poderá causar interferência nos demais móveis.

O móvel mede a intensidade dos sinais das ERBs vizinhas e o nível de interferência em todos os canais. Um *handoff* pode ser iniciado somente se o nível de sinal da ERB que está servindo o móvel for mais baixo do que o de uma das ERBs vizinhas. O móvel vai procurar alocar na ERB escolhida o canal de menor interferência.

O MCHO é o maior grau de descentralização de *handoff*. Algumas vantagens da descentralização de *handoff* são:

- Decisão rápida;
- O MSC (*Mobile Switching Center*) não precisa tomar a decisão de efetuar ou não o *handoff* para todos os usuários. Num sistema de alta capacidade esta tarefa sobrecarregaria bastante o MSC.

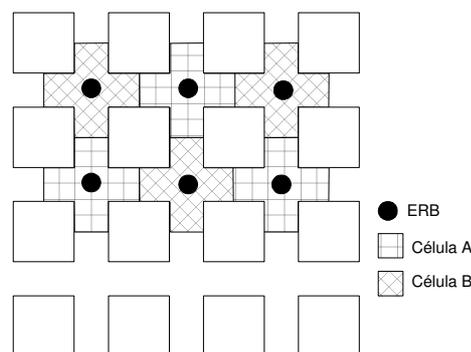
Apesar destas vantagens o MCHO ainda não está sendo muito difundido nas tecnologias celulares atuais. Apenas o DECT (*Digital European Cordless Telephone*) utiliza este protocolo [6] para tráfego de voz.

### 2.2.2 Planejamento de Sistemas Micro-celulares

Um outro tópico interessante a respeito de sistemas micro-celulares é o planejamento das células. Este planejamento afeta de forma significativa o desempenho de sistemas no que diz respeito a razão  $C/I$ . Para ambientes do tipo *Manhattan Grid*, comum nos grandes centros, onde os quarteirões são dispostos em forma de uma grade retangular como o da figura 2.4 existem vários tipos de planejamento de células simétricos. Estes planos são classificados como *Half Square*(HS), *Full Square*(FS) e Retangular (R) [7]. A seguir é apresentada uma breve descrição destes planos.

#### Plano de Células *Half Square*

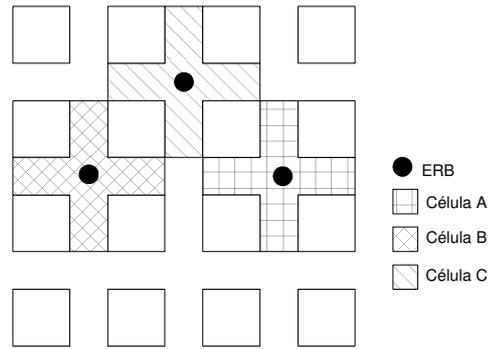
Este tipo de planejamento coloca as ERBs em todas as esquinas do *grid* e cada uma delas cobre metade de um bloco em todas as direções. Este tipo de planejamento evita o efeito de esquina e provê a maior capacidade. Além disso todos os *handoffs* existentes são do tipo LOS. A figura 2.5 ilustra este tipo de planejamento.



**Figura 2.5** Plano de Células *Half Square*

#### Plano de Células *Full Square*

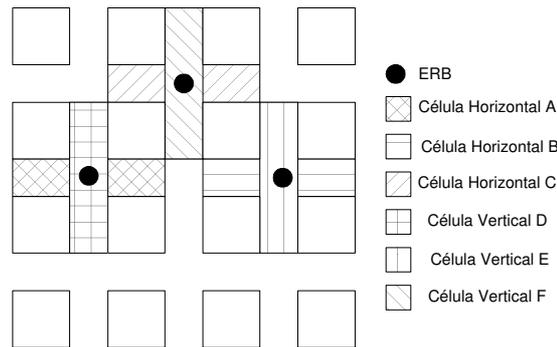
Este tipo de planejamento coloca as ERBs em esquinas alternadamente e cada uma delas cobre inteiramente de um bloco em todas as direções. Este tipo de planejamento não evita o efeito de esquina e os *handoffs* existentes podem ser do tipo LOS ou NLOS. A figura 2.6 ilustra este tipo de planejamento.



**Figura 2.6** Plano de Células *Full Square*

### Plano de Células Retangular

Neste tipo de planejamento cada ERB cobre uma fração de uma rua horizontal ou vertical do *grid*. A estação é colocada no meio da célula. Este tipo de planejamento, que é facilmente adaptável a penetração do mercado [3] não evita o efeito de esquina e os *handoffs* existentes podem ser do tipo LOS ou NLOS. A figura 2.7 ilustra este tipo de planejamento.



**Figura 2.7** Plano de Células Retangular