

## Capítulo VIII – Sistemas de Comunicações *Wireless* Móveis e Padrões

### 8.1 Fundamentos de Projeto de Sistemas Celulares

O objetivo do projeto dos sistemas rádio-móveis pioneiros era viabilizar uma grande área de cobertura através do uso de um único transmissor de potência elevada, com uma antena montada sobre uma torre.

O problema decorrente de tal estratégia de projeto era que, devido à elevada potência dos transmissores, se tornava impossível reusar as mesmas frequências através de todo o sistema, já que qualquer tentativa de fazê-lo resultaria em interferência.

As agências governamentais regulatórias dos serviços de telecomunicações não podiam alocar frequências no espectro na mesma proporção da crescente demanda por serviços de comunicações móveis, razão pela qual se tornou imperativo reestruturar o sistema de rádio-telefonia.

O conceito de telefonia celular foi concebido para melhor aproveitar o limitado espectro de rádio frequências, permitindo, ao mesmo tempo, grandes áreas de cobertura.

O conceito de telefonia celular basicamente consiste da substituição do transmissor único de elevada potência – *equivalente a uma grande célula* – por muitos transmissores de baixa potência – *equivalentes a pequenas células* – cada um deles permitindo a cobertura de uma pequena porção da área de cobertura que se deseja atender.

A cada estação base é alocada uma porção do número total de canais disponíveis ao sistema inteiro. A estações-base vizinhas são atribuídos diferentes grupos de canais, para que

a interferência entre as estações-base (e os usuários móveis a ela associados) seja minimizada. Desta forma, os canais disponíveis são distribuídos através da região geográfica e podem ser reusados tantas vezes quanto necessário, desde que a interferência entre canais seja mantida em níveis aceitáveis.

À medida que a demanda por serviços aumenta (ou seja, mais canais se tornam necessários dentro de um particular mercado), o número de estações-base pode ser aumentado, juntamente com um correspondente decréscimo na potência dos transmissores, para que se evite interferência.

O conceito de telefonia celular permite ainda que os aparelhos celulares dos usuários possam ser fabricados com o mesmo conjunto de canais, de tal forma que possam ser usados em qualquer região (país ou continente).

### 8.1.1 Conceito de Reuso de Frequências

A cada estação base celular é alocado um grupo de canais de rádio para serem usados dentro de uma pequena região geográfica chamada célula.

A estações-base em células adjacentes são atribuídos grupos de canais que contêm canais completamente diferentes daqueles de células vizinhas.

As antenas das estações-base são projetadas para permitir a cobertura desejada dentro de uma particular célula.

Limitando o limite de cobertura à área abrangida pela célula, o mesmo número de canais pode ser usado para cobrir diferentes células que são separadas umas das outras por distâncias grandes o suficiente para manter níveis toleráveis de interferência.

O processo de selecionar e alocar grupos de canais para as estações-base celulares dentro de um sistema é chamado reuso de frequências ou planejamento de frequências.

A Figura 8.1.1 ilustra o conceito de reuso de frequências em telefonia celular, onde células marcadas com a mesma letra usam o mesmo grupo de canais. O plano de reuso de frequências é sobreposto a um mapa para indicar onde canais de frequências diferentes serão usados.

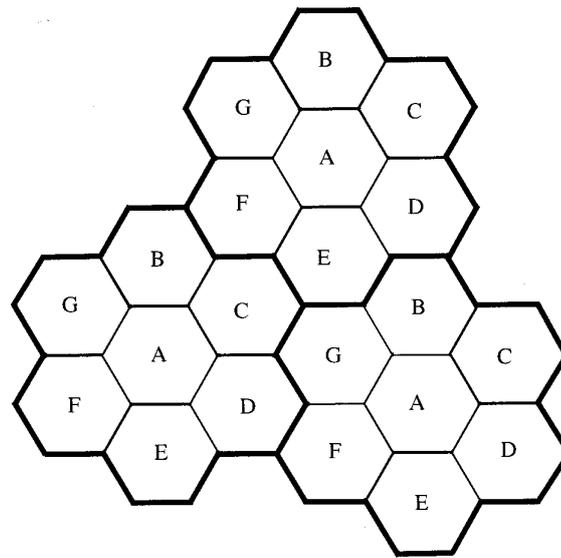


Figura 8.1.1: Ilustração do conceito de reuso de frequências. Células com a mesma letra usam o mesmo conjunto de frequências. Um *cluster* (agrupamento) de células é salientado na figura e é replicado sobre a área de cobertura. Neste exemplo o tamanho do *cluster* ( $N$ ) é igual a sete e o fator de reuso de frequências é  $1/7$ , desde que cada célula contém um sétimo do número total de canais disponíveis.

O padrão hexagonal utilizado para as células, mostrado na Figura 8.1.1 é conceitual, sendo um modelo simplificado da cobertura de rádio para cada estação base. O padrão hexagonal tem sido universalmente adotado porque facilita a análise do sistema celular.

A real cobertura de rádio de uma célula é conhecida como planta ou *footprint* (pegada) e é determinada a partir de medidas de campo ou modelos de predição de propagação. Embora a real *footprint* seja por natureza, amorfa, uma forma regular para a célula é necessária por requerimentos de projeto e de adaptação para futuro crescimento.

Embora pareça natural a escolha de um círculo para representar a área de cobertura de uma estação-base, este formato geométrico não é utilizado para a área de cobertura de uma célula porque círculos adjacentes não podem ser justapostos sem deixar espaços ou criar regiões sobrepostas. Quando se considera os formatos geométricos que podem cobrir uma região sem deixar falhas ou sobreposições, as três melhores escolhas para o padrão de uma célula recaem no quadrado, no triângulo equilátero e no hexágono, conforme mostrado na Figura 8.1.2.

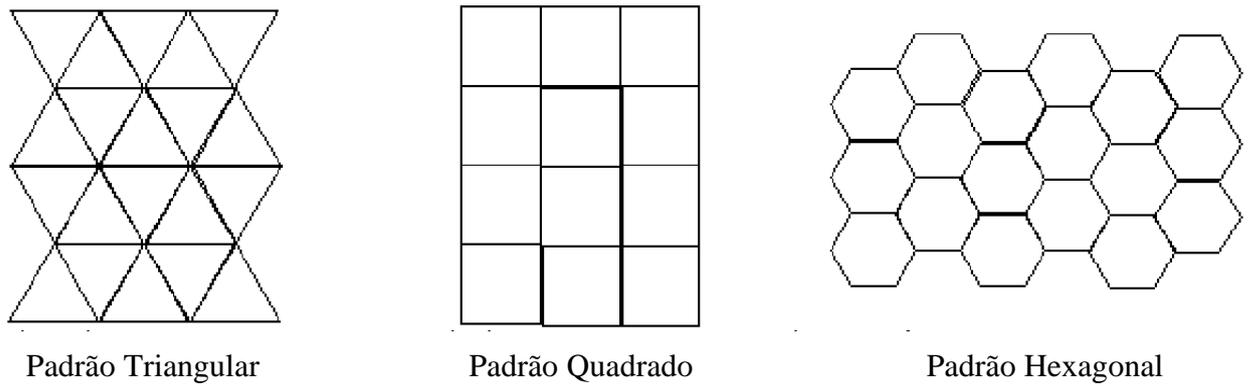


Figura 8.1.2: Possíveis padrões regulares para geometria de células.

A Figura 8.1.3 apresenta os sistemas de coordenadas convenientes para a análise das três possíveis geometrias mostradas na Figura 8.1.2.

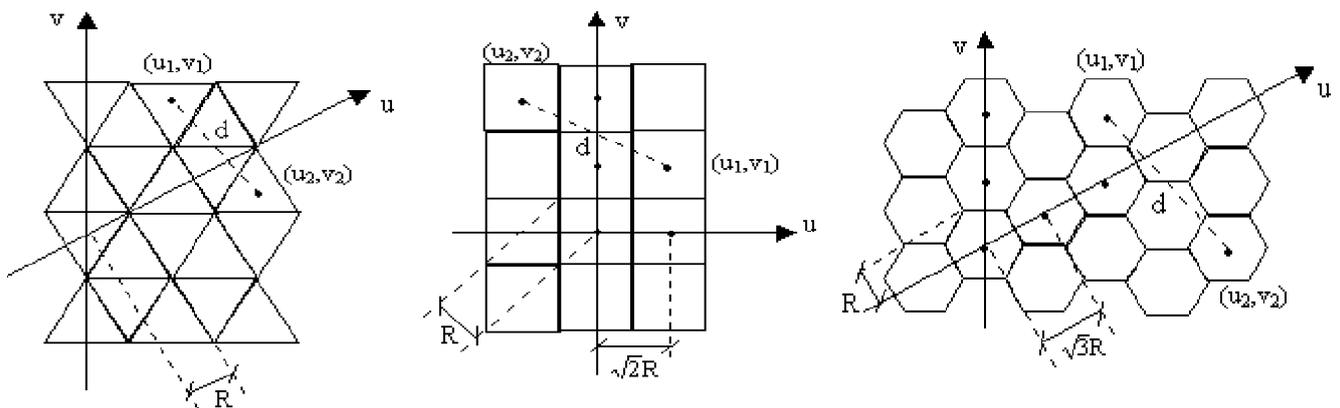


Figura 8.1.3: Sistemas de coordenadas dos padrões regulares.

As áreas do triângulo equilátero, do quadrado e do hexágono são dadas, respectivamente, nas Equações (8.1.1), (8.1.2) e (8.1.3). Em todas as Equações,  $R$  é o raio das células, de mesmo tamanho nas três geometrias, conforme indicado na Figura 8.1.3.

$$A_3 = \frac{3\sqrt{3}R^2}{4} \cong 1.3R^2 \tag{8.1.1}$$

$$A_4 = R^2 \tag{8.1.2}$$

$$A_6 = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2} \cong 2.6R^2 \tag{8.1.3}$$

Da observação das Equações (8.1.1), (8.1.2) e (8.1.3) conclui-se que, para um dado raio de célula, o hexágono é a figura geométrica que tem a maior área entre as três geometrias propostas.

Assim, a escolha do hexágono como modelo se deve ao fato de que uma célula precisa ser projetada para servir aos mais fracos usuários móveis dentro de uma *footprint*, e estes estão localizados tipicamente na borda de uma célula. De acordo com as Equações (8.1.1), (8.1.2) e (8.1.3), para uma dada distância entre o centro de um polígono e os pontos mais afastados de seu perímetro, o hexágono é a forma que possui a maior área, comparativamente às demais formas que poderiam ser adequadamente justapostas (quadrado e triângulo equilátero).

O uso da geometria hexagonal permite o uso do menor número possível de células para cobrir uma determinada região geográfica em que se deseja prestar o serviço móvel. Além disso, o hexágono aproxima de forma mais adequada o padrão de irradiação circular que ocorreria para uma antena omnidirecional de uma estação rádio base em condição de propagação em espaço livre.

É importante salientar que o modelo hexagonal aproxima a área de cobertura de uma estação rádio-base. A planta de cobertura real (a *footprint*) é, no entanto, determinada pelo real contorno da área de serviço dentro da qual um dado transmissor pode atender de forma satisfatória aos usuários móveis.

Ao utilizarmos hexágonos para modelar áreas de cobertura, os transmissores das estações-base podem estar colocados no centro da célula (*center-excited cells*) ou em três dos seis vértices da célula (*edge-excited cells*). Normalmente, antenas omnidirecionais são usadas em *center-excited cells* e antenas direcionais setorizadas são usadas em *corner-excited cells*. Devido a considerações de natureza prática, as estações-base não são geralmente localizadas exatamente no centro ou nos vértices do polígono hexagonal. A maior parte dos projetos de sistemas permitem que uma estação-base seja posicionada a até um quarto de raio da célula, a partir da localização ideal.

Conforme definido previamente, um *cluster* é um conjunto de células hexagonais vizinhas que utilizam todo o espectro de frequências (ou canais) disponível. O conceito de reuso de frequências é baseado na possibilidade da reutilização destas mesmas frequências em

*clusters* vizinhos, adequadamente espaçados, dentro da área de cobertura de um sistema celular.

No exemplo da Figura 8.1.1 é mostrada a configuração de um *cluster* de sete células. Para derivar as diferentes configurações possíveis para *clusters*, consideremos os sistemas de coordenadas mostrados na Figura 8.1.3.

A distância unitária tomada sobre os eixos é a distância entre o centro de células adjacentes. Assim, para a geometria triangular, a distância unitária é o próprio raio  $R$  da célula, para a geometria quadrada a distância unitária é  $\sqrt{2}R$  e, para a geometria hexagonal, a distância unitária é  $\sqrt{3}R$ . Esta distância unitária é chamada distância celular.

Consideremos, como exemplo, a geometria hexagonal, onde as coordenadas  $(u_1, v_1)$  e  $(u_2, v_2)$  marcam os centros de duas células (dois hexágonos) quaisquer, no sistema de coordenadas adotado. A coordenada  $u_1$  representa a distância do centro  $(u_1, v_1)$  da célula ao eixo  $u$  e a coordenada  $v_1$  representa a distância do centro  $(u_1, v_1)$  da célula ao eixo  $v$ , bem como a coordenada  $u_2$  representa a distância do centro  $(u_2, v_2)$  da célula ao eixo  $u$  e a coordenada  $v_2$  representa a distância do centro  $(u_2, v_2)$  da célula ao eixo  $v$ .

De acordo com as geometrias dadas, é possível mostrar que a distância  $d$  entre duas células é dada por:

$$d = \sqrt{i^2 - ij + j^2} \quad \text{para a geometria triangular,} \quad (8.1.4)$$

$$d = \sqrt{i^2 + j^2} \quad \text{para a geometria quadrada e} \quad (8.1.5)$$

$$d = \sqrt{i^2 + ij + j^2} \quad \text{para a geometria hexagonal, onde} \quad (8.1.6)$$

$$i = (u_2 - u_1) \quad \text{e} \quad j = (v_2 - v_1). \quad (8.1.7)$$

Também é possível mostrar que, com a geometria celular hexagonal, pode-se obter distâncias de reuso iguais (isotrópicas) entre células co-canais de *clusters* vizinhos, na região de cobertura.

Tal fato pode ser observado na Figura 8.1.1, em que os *clusters* são formados por sete células hexagonais. Nos diferentes *clusters*, letras iguais representam células que utilizam o mesmo grupo de frequências. Células marcadas com letras iguais são ditas células co-canais. Na Figura 8.1.1, todas as células co-canais apresentam a mesma distância de reuso.

Para o caso mostrado na Figura 8.1.1, a expressão para determinar o número de células por *cluster* pode ser derivada a partir da Figura 8.1.4.

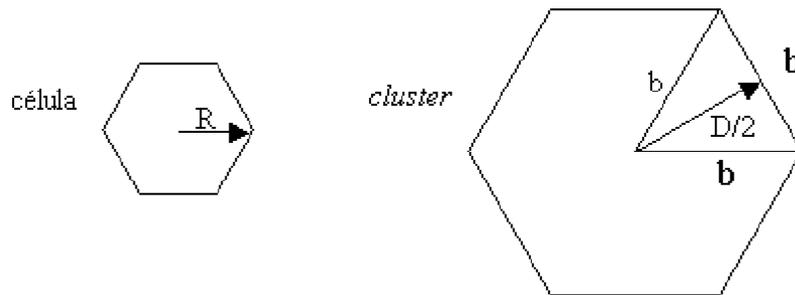


Figura 8.1.4: Representação de célula e *cluster* para determinação de  $N$ .

De acordo com a Figura 8.1.4, seja  $A_6$  a área de uma célula hexagonal e  $A_C$  a área de um *cluster*. A área da célula é dada na Equação (8.1.4), por

$$A_6 = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2}$$

Como a distância entre os centros de *clusters* vizinhos é igual à distância de reuso co-canal  $D$ , se dividirmos o hexágono que representa um *cluster* em seis triângulos equiláteros, a altura de cada triângulo será  $D/2$ , conforme Figura 8.1.4. Assim,

$$\frac{D}{2} = \frac{b\sqrt{3}}{2}, \text{ onde} \tag{8.1.8}$$

$b\sqrt{3}/2$  é a expressão para a altura de um triângulo equilátero. A partir da Equação (8.1.8), pode-se escrever que

$$b = \frac{D\sqrt{3}}{3}. \tag{8.1.9}$$

A área do *cluster*  $A_C$  será dada, então, por

$$A_C = \frac{3\sqrt{3}b^2}{2} = \frac{3\sqrt{3}(D\sqrt{3}/3)^2}{2} = \frac{\sqrt{3}D^2}{2}. \quad (8.1.10)$$

Desta forma, o número de células que cabem dentro de um *cluster* é dado por

$$N = \frac{A_C}{A_6} = \frac{\sqrt{3}D^2}{2} \frac{2}{3\sqrt{3}R^2} = \frac{D^2}{3R^2} = \left( \frac{D}{\sqrt{3}R} \right)^2. \quad (8.1.11)$$

Sabemos (da Figura 8.1.3) que, para a geometria hexagonal,  $\sqrt{3}R$  é a distância unitária. Assim, reescrevendo (8.1.11) em função da distância unitária, teremos:

$$N = \left( \frac{D}{\sqrt{3}R} \right)^2 = \left( \frac{D}{\text{distância unitária}} \right)^2. \quad (8.1.12)$$

Na Equação (8.1.12)  $(D/\text{distância unitária})$  representa o quociente entre a distância entre as coordenadas dos centros de dois *clusters* adjacentes e a distância entre as coordenadas dos centros de duas células adjacentes, equivalendo ao número de células (nº de distâncias celulares) que podem ser contadas no caminho entre os centros de dois *clusters* adjacentes.

Das Equações (8.1.6) e (8.1.7) temos que, para a geometria hexagonal, a distância  $d$  ( $d = \sqrt{i^2 + ij + j^2}$ ) entre os centros de duas células quaisquer é expressa em função da distância entre as coordenadas  $u$  e  $v$  dos centros das células, respectivamente,  $i$  e  $j$ . A distância  $d$  é equivalente ao número de células (nº de distâncias celulares) que podem ser contadas no caminho entre os centros de duas células quaisquer.

Assim, substituindo a Equação (8.1.6) ( $d = \sqrt{i^2 + ij + j^2}$ ) na Equação (8.1.12), teremos a expressão para determinar o número de células por *cluster*, para o caso mostrado na Figura 8.1.1:

$$N = \left( \sqrt{i^2 + ij + j^2} \right)^2 = i^2 + ij + j^2. \quad (8.1.13)$$

Diferentes geometrias de *clusters* possibilitam distâncias co-canal isotrópicas. Assim, de acordo com a Equação (8.1.13), como  $i$  e  $j$  são inteiros, pela combinação de seus valores

chega-se aos valores possíveis para  $N$ , que são: 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, etc. A Tabela 8.1.1 apresenta possíveis tamanhos de *cluster* ( $N$ ) para alguns valores de  $i$  e  $j$ .

	Tamanho do Cluster ( $N$ )
$i = 1, j = 0$	1
$i = 1, j = 1$	3
$i = 1, j = 2$	7
$i = 1, j = 3$	13
$i = 1, j = 4$	21
$i = 2, j = 0$	4
$i = 2, j = 2$	12
$i = 2, j = 3$	19
$i = 3, j = 0$	9
$i = 4, j = 0$	16

Tabela 8.1.1: Tamanho do *Cluster* ( $N$ ) para alguns valores de  $i$  e  $j$ .

Para entender o conceito de reuso de frequências, consideremos um sistema celular com um total de  $S$  canais duplex disponíveis para uso. Se a cada célula é alocado um grupo de  $k$  canais ( $k < S$ ), e se os  $S$  canais são divididos entre  $N$  células em grupos de canais únicos e disjuntos, cada um tendo o mesmo número de canais, o número total de canais de rádio disponíveis pode ser expresso como

$$S = kN \quad (8.1.14)$$

Às  $N$  células, as quais usam coletivamente o conjunto completo de frequências disponíveis, é atribuída a denominação de *cluster* (ou agrupamento). Se um *cluster* é replicado  $M$  vezes dentro de um sistema, o número total de canais duplex  $C$ , que pode ser usado como uma medida da capacidade do sistema, é dado por

$$C = M k N = M S \quad (8.1.15)$$

Conforme indica a Equação (8.1.15), a capacidade de um sistema celular é diretamente proporcional ao número  $M$  de vezes que um *cluster* é replicado em uma área de serviço fixa. O fator  $N$  é chamado tamanho do *cluster* e é tipicamente igual a 4, 7 ou 12. Se o tamanho  $N$  do *cluster* é reduzido, enquanto o tamanho da célula é mantido constante, mais *clusters* serão necessários para cobrir uma dada área, aumentando o valor de  $M$  e, por conseqüência, aumentando a capacidade de usuários do sistema.

Um tamanho de *cluster* maior indica que a razão entre o raio da célula e a distância entre células co-canais é pequena, assim como um pequeno tamanho de *cluster* indica que as células co-canais são localizadas mais próximas. O valor de  $N$  é uma função de quanta interferência uma estação móvel ou base pode tolerar, mantendo uma qualidade adequada de comunicação. O fator de reuso de frequência de um sistema celular é dado por  $1/N$ , pois a cada célula dentro de um *cluster* é atribuído somente  $1/N$  dos canais totais disponíveis no sistema. Em termos de projeto, é desejável o menor valor possível de  $N$  para maximizar a capacidade do sistema sobre uma dada área de cobertura (menor  $N$ , maior fator de reuso).

O fator de reuso co-canal  $Q$  é definido pela relação  $D/R$ . A Figura 8.1.5 ilustra este conceito.

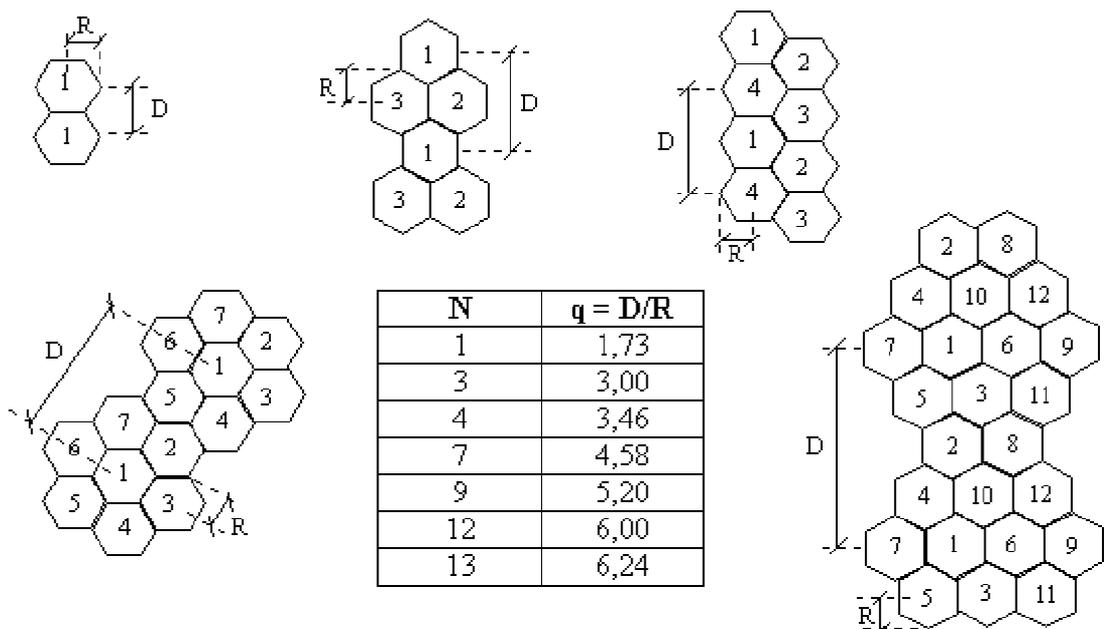


Figura 8.1.5: Fator de reuso co-canal.

Para a obtenção da Tabela mostrada na Figura 8.1.5, considera-se  $Q = D/R$ . De

acordo com a Equação (8.1.11)  $\left( N = \frac{D^2}{3R^2} \right)$ , assim,

$$Q = \frac{D}{R} = \frac{\sqrt{3R^2 N}}{R} = \sqrt{3N} \tag{8.1.16}$$

Através de variações no valor de  $N$  obtém-se os valores de  $Q$  correspondentes, ilustrados como exemplos, na Tabela da Figura 8.1.5.

De acordo com a Figura 8.1.5, uma região coberta por *clusters* de uma única célula apresentará muito mais problemas com relação à interferência co-canal do que uma região coberta por *clusters* de, por exemplo, 12 células. Desta forma, o valor escolhido para  $N$  e, por consequência para  $Q$ , além de ser função da capacidade desejada, precisa ser também função de quanta interferência co-canal o sistema pode suportar, mantendo uma qualidade aceitável de comunicação.

Estabelece-se, desta forma, um compromisso entre capacidade e interferência co-canal.

**Algoritmo para determinar os vizinhos co-canais  
mais próximos de uma particular célula:**

Devido ao fato de que a geometria hexagonal mostrada na Figura 8.1.1 apresenta exatamente seis vizinhos equidistantes e que as linhas que unem os centros de qualquer célula e cada um de seus vizinhos são separadas por múltiplos de 60 graus, há apenas certos tamanhos de *cluster* e desenhos de células que são possíveis. Para que seja possível uma conexão sem interrupções entre células adjacentes, a geometria do hexágono é tal que o número de células por *cluster*,  $N$ , pode apenas assumir valores que satisfaçam à Equação (8.1.13), ou seja,

$$N = i^2 + ij + j^2$$

onde  $i$  e  $j$  são inteiros não-negativos.

Para determinar os vizinhos co-canais mais próximos de uma particular célula, adota-se o seguinte algoritmo (ilustrado na Figura 8.1.6 para  $i = 3$  e  $j = 2$ , resultando em  $N = 19$ ):

- (1) mover  $i$  células ao longo de qualquer cadeia de hexágonos,
- (2) virar 60 graus no sentido contrário ao sentido dos ponteiros do relógio e mover  $j$  células.

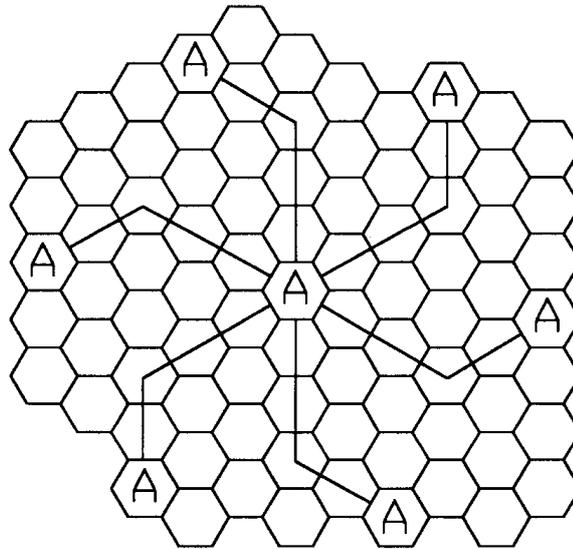


Figura 8.1.6: Método utilizado para localização de células co-canal em um sistema celular. Neste exemplo,  $N = 19$  (ou seja,  $i = 3$  e  $j = 2$ ).

### Exemplo 8.1.1:

Se um total de 33 MHz de largura de banda é alocado para um particular sistema de telefonia celular FDD, o qual usa dois canais simplex de 25 kHz para prover canais de voz e controle *full duplex*, determine o número de canais disponível por célula se um sistema usa:

- (a) Reuso de 4 células;
- (b) Reuso de 7 células e
- (c) Reuso de 12 células.

Se 1 MHz do espectro alocado é dedicado a canais de controle, determine uma distribuição eqüitativa de canais de controle e de voz em cada célula para cada um dos três sistemas.

### Solução:

- Largura de banda total: 33 MHz
  - Largura de banda do canal:  
 $25 \text{ kHz} \times 2 \text{ canais simplex} = 50 \text{ kHz/canal duplex}$
  - Número total de canais disponíveis:  $33000/50 = 660$  canais
- (a) Para  $N = 4$ ,
- o nº total de canais disponíveis por célula será  $= 660/4=165$  canais.
- (b) Para  $N = 7$ ,
- o nº total de canais disponíveis por célula será  $= 660/7=95$  canais.
- (c) Para  $N = 12$ ,
- o nº total de canais disponíveis por célula será  $= 660/12=55$  canais.

Um espectro de 1 MHz para canais de controle implica que haja  $1000/50=20$  canais de controle. Para distribuir igualmente os canais de voz e controle, aloque o mesmo número de canais de voz em cada célula sempre que possível. No presente exemplo, os 660 canais devem ser igualmente distribuídos para cada célula dentro do *cluster*. Na prática, apenas 640 canais de voz poderão ser alocados, já que os canais de controle são alocados separadamente, 1 por célula.

- (a) Para  $N = 4$ ,
- pode-se alocar 5 canais de controle e 160 canais de voz por célula. Na prática, entretanto, cada célula somente necessita de um único canal de controle. Então, um canal de controle e 160 canais de voz podem ser atribuídos a cada célula.

(b) Para  $N = 7$ ,

pode-se alocar 4 células com 3 canais de controle e 92 canais de voz, 2 células com 3 canais de controle e 90 canais de voz por célula e 1 célula com 2 canais de controle e 92 canais de voz. Na prática, entretanto, cada célula poderá ter um único canal de controle, 4 células poderão ter 91 canais de voz e 3 células poderão ter 92 canais de voz.

(c) Para  $N = 12$ ,

poderemos ter 8 células com 2 canais de controle e 53 canais de voz, e 4 células com 1 canal de controle e 54 canais de voz cada. Em um sistema real, cada célula poderá ter um canal de controle, oito células poderão ter 53 canais de voz e 4 células poderão ter 54 canais de voz.

## 8.1.2 Estratégias para Atribuição de Canais

Para uma eficiente utilização do espectro de rádio é necessário adotar um esquema para o reuso de frequências que seja consistente com os objetivos de aumentar a capacidade do sistema e minimizar a interferência. Foram desenvolvidas muitas estratégias para atribuição de canais visando atingir estes objetivos.

As estratégias para atribuição de canais podem ser classificadas como fixas ou dinâmicas. A escolha da estratégia para atribuição de canais tem impacto no desempenho do sistema, particularmente na forma com a qual as chamadas são gerenciadas quando um usuário móvel é "passado" de uma célula a outra.

Em uma estratégia para atribuição de canais fixa, é alocado a cada célula um pré-determinado conjunto de canais de voz. Cada tentativa de chamada dentro da célula pode apenas ser servida pelos canais não utilizados naquela particular célula. Se todos os canais na célula estão ocupados a chamada é bloqueada e o assinante não recebe o serviço. Uma variação da estratégia fixa é a estratégia chamada *borrowing strategy* (*borrowing* = empréstimo), na qual uma célula pode pedir canais emprestados de uma célula vizinha se todos os seus canais já estiverem ocupados. O Centro de Comutação e Controle supervisiona

os procedimentos de empréstimo e garante que o empréstimo de um canal não interrompa ou interfira com qualquer das chamadas em progresso na célula doadora.

Em uma estratégia dinâmica para atribuição de canais os canais de voz não são alocados a diferentes células de forma permanente. Ao invés disto, cada vez que uma solicitação de chamada é feita, a estação base em serviço solicita um canal ao CCC. O CCC então aloca um canal para a célula requerida de acordo com um algoritmo que leva em conta a probabilidade de bloqueios futuros dentro da célula, a frequência de uso do canal candidato, a distância de reuso do canal e outras funções de custo.

O CCC apenas aloca uma dada frequência se aquela frequência não está presentemente em uso na célula ou em outra célula qualquer que caia dentro da mínima distância restrita de reuso de frequências para evitar interferência co-canal. A atribuição dinâmica de canais reduz a probabilidade de bloqueio, a qual aumenta a capacidade de *trunking* do sistema, desde que todos os canais disponíveis dentro de um mercado são acessíveis a todas as células. As estratégias de atribuição dinâmica de canais requerem que o CCC colete dados em tempo real e de forma contínua sobre ocupação de canal, distribuição de tráfego e indicações de intensidade de sinal de rádio dos canais. Este fato aumenta a carga computacional e de armazenamento do sistema, mas provê a vantagem de aumentar a utilização dos canais e diminuir a probabilidade de uma chamada bloqueada.

### 8.1.3 Estratégias de *Handoff*

Quando uma estação rádio-móvel se muda para uma diferente célula enquanto uma conversação está em progresso, o CCC automaticamente transfere a chamada para um novo canal que pertença à nova estação base. Esta operação, chamada de *handoff*, não envolve apenas a identificação de uma nova estação base, mas também requer que os sinais de voz e controle sejam alocados a canais associados com a nova estação base.

Muitas estratégias de *handoff* priorizam operações de *handoff* sobre solicitações de inicialização de chamadas quando alocam canais não utilizados em uma célula. *Handoffs* devem ser processados com sucesso e tão infreqüentes quanto possível, além de serem imperceptíveis aos usuários. Para cumprir estes requerimentos os projetistas de sistemas

devem especificar um nível ótimo de sinal para o qual a operação de *handoff* seja iniciada. Uma vez que um particular nível de sinal é especificado como o mínimo sinal utilizável para qualidade de voz aceitável no receptor da estação base, um nível de sinal levemente mais intenso é usado como *threshold*, ao qual a operação de *handoff* é feita. Esta margem, dada por  $\Delta = P_{r \text{ handoff}} - P_{r \text{ mínima utilizável}}$ , não pode ser muito grande ou pequena. Se  $\Delta$  é muito grande, poderão ocorrer operações de *handoff* desnecessárias, que irão sobrecarregar o CCC. Se  $\Delta$  é muito pequeno, poderá não haver tempo suficiente para completar uma operação de *handoff* antes que uma chamada seja perdida devido a fracas condições de sinal. Portanto,  $\Delta$  deverá ser cuidadosamente escolhido, visando atender a estes requerimentos conflitantes.

A Figura 8.1.7 ilustra uma situação de *handoff*. A Figura 8.1.7(a) demonstra o caso onde uma operação de *handoff* não é feita e o sinal cai abaixo do nível mínimo aceitável para manter o canal ativo.

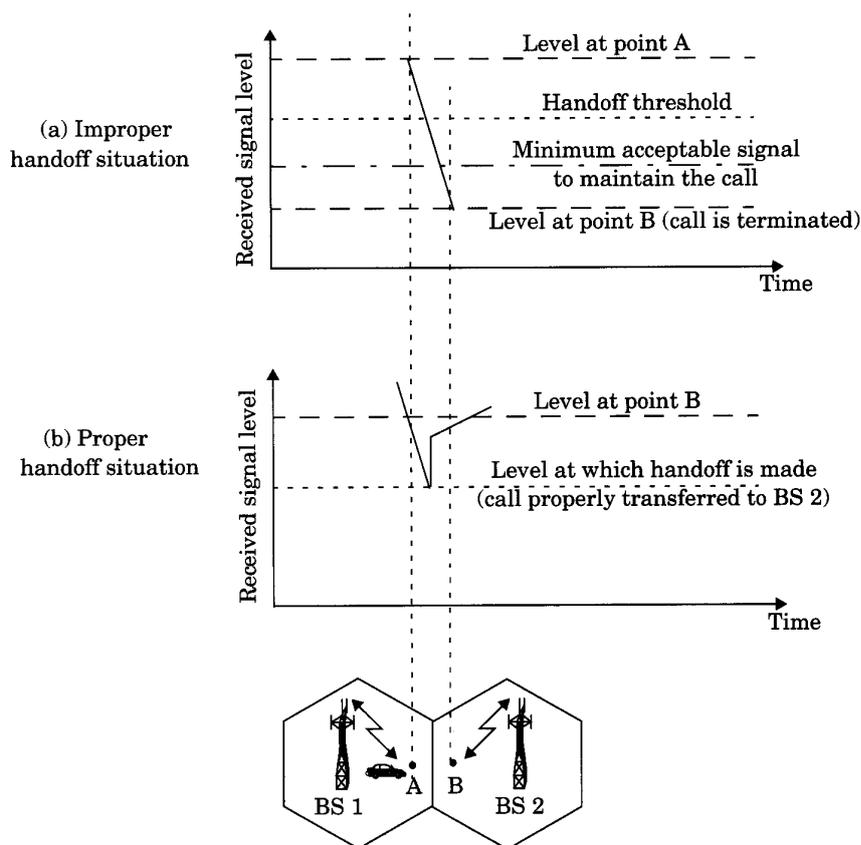


Figura 8.1.7: Ilustração de uma operação de *handoff*.

Este evento de interrupção de chamada pode ocorrer quando há um atraso excessivo por parte do CCC em atribuir uma operação de *handoff* ou quando o limiar  $\Delta$  é assumido muito pequeno para o tempo de *handoff* no sistema. Atrasos excessivos podem ocorrer durante condições de alto tráfego devido à carga computacional no CCC ou devido ao fato de que não hajam canais disponíveis em qualquer uma das estações rádio-base vizinhas (forçando o CCC a esperar até que um canal em uma célula próxima se torne livre).

Ao decidir quando proceder à operação de *handoff* é importante garantir que a queda no nível do sinal medido não é devida a desvanecimento momentâneo (o desvanecimento pode ocorrer mesmo para um usuário estacionário, quando há movimento na vizinhança da estação rádio-base e da estação móvel) e que a estação móvel está realmente se deslocando para fora da área da estação base de serviço. Para garantir isto, a estação base monitora o nível de sinal por um certo período de tempo antes de iniciar a operação de *handoff*. O tempo necessário para decidir se uma operação de *handoff* é necessária depende da velocidade na qual o veículo está se movendo. Se a declividade da média de curta duração do nível de sinal recebido em um determinado intervalo de tempo é acentuada, a operação de *handoff* precisa ser realizada rapidamente. Informações sobre a velocidade do veículo em que se encontra o aparelho celular podem ser também computadas a partir da estatística do desvanecimento de curta duração do sinal recebido na estação base.

O tempo durante o qual uma chamada pode ser mantida dentro de uma célula, sem que se realize a operação de *handoff* é chamado de *dwell time* (tempo de demora ou pausa). O *dwell time* de um particular usuário é governado por um número de fatores, incluindo propagação, interferência, distância entre o assinante e a estação base e outros efeitos, também variantes com o tempo.

Nos atuais sistemas de telefonia de segunda geração, as decisões de *handoff* são assistidas pelo equipamento móvel (MAHO- *Mobile Assisted Handoff*) ou seja, cada estação móvel mede a potência recebida das estações rádio-base ao seu redor e continuamente reporta os resultados destas medidas para a estação rádio base em serviço. Um processo de *handoff* é iniciado quando a potência recebida da estação base de uma célula vizinha começa a exceder a potência recebida da estação base atual por um certo valor ou por um certo período de tempo. O método MAHO permite que a chamada seja “passada” entre estações-base de forma mais rápida do que nos sistemas de primeira geração analógicos, desde que as medidas

de *handoff* são feitas por cada estação móvel e o CCC não mais monitora constantemente a intensidade dos sinais. A estratégia MAHO é particularmente adequada para ambientes microcelulares, onde *handoffs* são mais freqüentes.

Durante o curso de uma chamada, se o usuário móvel se move de um sistema celular a outro sistema celular controlado por um diferente CCC, um *intersystem handoff* se torna necessário. Uma CCC é envolvida em uma operação de *handoff* inter-sistemas quando um sinal de um usuário móvel se torna fraco em uma dada célula e o CCC não pode encontrar outra dentro do próprio sistema para a qual possa transferir a chamada em progresso. Há muitos fatores que precisam ser tratados quando se implementa uma operação de *handoff* inter-sistemas. Por exemplo, uma chamada local pode se tornar uma chamada de longa distância à medida que o usuário móvel sai do seu sistema de origem e se torna um *roamer* em um sistema vizinho. Outro fator a considerar é a compatibilidade entre dois CCCs, que deve ser determinada antes de implementar uma operação de *handoff* inter-sistemas.

Diferentes sistemas apresentam diferentes políticas e métodos para gerenciar solicitações de *handoff*. Alguns sistemas tratam solicitações de *handoff* da mesma forma que tratam chamadas que são originadas no sistema. Em tais sistemas, a probabilidade de que uma solicitação de *handoff* não seja atendida por uma nova estação base é igual à probabilidade de bloqueio de chamadas. Entretanto, do ponto de vista do usuário, ter uma chamada abruptamente interrompida no meio de uma conversação é mais indesejável do que ser bloqueado ocasionalmente em uma nova tentativa de estabelecer ligação. Para que a qualidade de serviço possa ser melhorada, vários métodos têm sido concebidos com o objetivo de priorizar solicitações de *handoff* sobre solicitações de inicialização de novas chamadas, ao serem alocados canais de voz.

### 8.1.3.1 Priorizando Operações de *Handoff*

Um método para priorizar *handoffs* é chamado de "conceito de canal de guarda". Por meio deste método, uma fração dos canais totais disponíveis em uma célula é reservada exclusivamente para solicitações de *handoff* de chamadas em andamento, as quais podem ser conduzidas a outra célula. Este método tem a desvantagem de reduzir o tráfego total, à medida que menos canais acabam por ser alocados para chamadas que estão sendo

originadas. Os canais de guarda oferecem, no entanto, eficiente utilização do espectro quando são usadas estratégias dinâmicas de atribuição de canais, as quais minimizam o número total de canais de guarda requeridos, devido à alocação eficiente, baseada na demanda.

Uma outra estratégia para diminuir a probabilidade de interromper uma chamada devido à falta de canais disponíveis é o "chaveamento de solicitações de *handoff*". Nesta estratégia há um compromisso entre o decréscimo da probabilidade de interromper uma chamada em andamento e o decréscimo no tráfego total. O "chaveamento de solicitações de *handoff*" é possível porque há um intervalo de tempo finito desde o momento em que o sinal recebido cai abaixo do limite de *handoff* e o momento em que a chamada é interrompida devido ao nível de sinal insuficiente. O tamanho do atraso é determinado a partir do padrão de tráfego da área particular de serviço. Deve ser notado que o chaveamento não garante uma probabilidade zero de interrupção de chamadas, pois grandes atrasos causam a queda do nível do sinal recebido abaixo do nível mínimo requerido para manter a comunicação, o que conduz à interrupção forçada da chamada em andamento.

### 8.1.3.2 Considerações práticas de *Handoff*

No projeto de sistemas práticos de comunicações celulares há o problema de acomodar as operações de *handoff* para diferentes velocidades de diferentes estações móveis. Por uma mesma célula passam veículos rápidos (em questões de segundos) e pedestres (que podem não necessitar da operação de *handoff* durante a duração da chamada inteira).

Para lidar com o tráfego simultâneo de usuários se deslocando em alta e baixa velocidade, uma solução é adicionar microcélulas ao sistema. No entanto, com esta providência, o CCC pode se tornar rapidamente sobrecarregado quando usuários se deslocam em rápida velocidade dentro da região de cobertura e precisam ser "passados" de uma célula muito pequena a outra célula muito pequena.

Embora o conceito de comunicações celulares permita o aumento da capacidade pela adição de novas células, na prática é difícil para os provedores de serviços de comunicação celular encontrar e obter novos espaços físicos para localizar estações rádio-base adicionais em regiões urbanas. Muitas vezes é mais fácil instalar canais adicionais e novas estações-base nos mesmos locais de células pré-existentes do que encontrar outros locais para as novas

instalações. Através do uso de antenas de diferentes alturas (no mesmo prédio ou torre) e diferentes níveis de potência é possível prover células grandes e células pequenas localizadas na mesma localização. Esta abordagem é chamada "*umbrella cell approach*" (*umbrella cell* = célula guarda-chuva) e permite que sejam criadas grandes áreas de cobertura para usuários que se deslocam a altas velocidades e pequenas áreas de cobertura para usuários que se deslocam a baixas velocidades. A Figura 8.1.8 ilustra uma célula guarda-chuva que é co-localizada com algumas microcélulas menores. Esta abordagem permite a minimização do número de operações de *handoff* para o caso da existência de usuários se deslocando a altas velocidades e provê canais adicionais (microcélulas) para usuários pedestres.

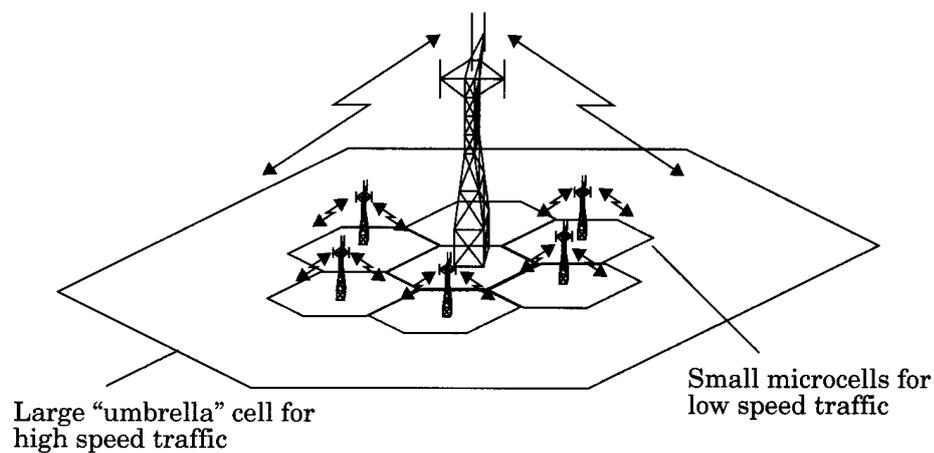


Figura 8.1.8: Abordagem "*umbrella cell*".

Outro problema prático encontrado nas operações de *handoff* em sistemas que contam com microcélulas é conhecido como "*cell dragging*" (*to dragg* = arrastar). Este problema resulta de usuários pedestres que provêem um sinal muito forte à estação rádio-base, em um ambiente urbano, quando há linha de visada entre o assinante e a estação base. À medida que o usuário se afasta da estação rádio-base a uma velocidade muito lenta, a intensidade média do sinal não decai rapidamente. Mesmo após o usuário haver se deslocado além do alcance designado para a célula, o sinal recebido na estação-base pode estar acima do limiar de *handoff*, impedindo que se efetue a operação de *handoff*. Este processo cria um problema de potencial interferência e de gerenciamento de tráfego, desde que o usuário, neste ínterim,

adentrou uma célula vizinha. Para evitar este tipo de problema, os limiares de *handoff* e os parâmetros de cobertura de rádio devem ser ajustados cuidadosamente.

Nos sistemas celulares analógicos de primeira geração, o procedimento de *handoff* levava aproximadamente 10 segundos para ocorrer após o nível do sinal ter caído abaixo do limiar estabelecido para a operação de *handoff*, o que equivalia a aproximadamente 6 a 12 dB. Em sistemas celulares digitais o tempo requerido caiu para 1 a 2 segundos, equivalendo a valores entre zero e 6 dB. Em sistemas digitais a decisão de *handoff* é baseada em uma ampla gama de métricas, além da intensidade do sinal, por exemplo: a medição da interferência co-canal e da interferência de canal adjacente podem ser medidas na ERB ou na ERM, e esta informação pode ser usada em conjunto com medidas de intensidade de sinal para prover um algoritmo multi-dimensional que determine quando uma operação de *handoff* é requerida.

## 8.1.4 Interferência e Capacidade do Sistema

A interferência é o principal fator limitante do desempenho de sistemas de comunicações rádio celulares, constituindo o maior gargalo no aumento da capacidade de um sistema e sendo o fator prioritariamente responsável por chamadas perdidas.

Fontes de interferência incluem: outros telefones móveis na mesma célula, uma chamada em progresso em uma célula vizinha, outras estações-base operando na mesma banda de frequência, ou mesmo qualquer sistema não celular no qual frequências próximas à frequência celular se espalhem para a banda de frequência celular.

A interferência em canais de voz ocasiona "linhas cruzadas", onde o assinante escuta a interferência no fundo devido a transmissões indesejáveis. Nos canais de controle, a interferência conduz a chamadas perdidas ou bloqueadas devido a erros no fluxo de sinais digitais de controle (sinalização digital).

A interferência é mais severa em áreas urbanas, devido à maior presença de ruído e ao grande número de estações-base e estações móveis existentes.

Os dois maiores tipos de interferência geradas pelo próprio sistema celular são: a interferência co-canal e a interferência por canal adjacente.

Embora sinais interferentes sejam frequentemente gerados dentro do próprio sistema celular, são difíceis de serem controlados (devido aos efeitos aleatórios de propagação). Na prática, os transmissores de portadoras do sistema celular que competem entre si são uma fonte significativa de interferência de fora da banda, pois os competidores frequentemente alocam suas estações-base em locais próximos às estações-base de outras provedoras de serviço celular, para que possam prover cobertura comparável para os usuários do sistema.

### 8.1.4.1 Interferência Co-canal e Capacidade do Sistema

O reuso de frequências implica que, em uma dada área de cobertura, haja várias células utilizando o mesmo conjunto de frequências. Estas células são chamadas células

co-canal e a interferência entre sinais associados a estas células é chamada interferência co-canal.

De forma diferente da que acontece quando se trata ruído térmico (cujos efeitos podem ser combatidos aumentando a relação sinal/ruído), a interferência co-canal não pode ser combatida simplesmente aumentando a potência da portadora de um transmissor, já que em sistemas celulares um aumento na potência de transmissão da portadora implicará em interferência com células co-canais vizinhas.

Para reduzir a interferência co-canal, as células co-canal devem estar, portanto, fisicamente separadas por uma distância mínima, de forma que seja garantido um isolamento adequado entre elas.

O cálculo da interferência é feito através da determinação da relação entre o sinal desejado e os sinais interferentes,  $S/I$ .

Para um dado sistema celular, quando o tamanho de cada célula é aproximadamente o mesmo e as estações-base transmitem com a mesma potência, a razão interferência co-canal é independente da potência transmitida e se torna uma função do raio da célula ( $R$ ) e da distância entre centros das células co-canais mais próximas ( $D$ ).

Aumentando a razão  $D/R$ , a separação espacial entre células co-canais relativa à distância de cobertura de uma célula é aumentada, permitindo a redução da interferência co-canal. O parâmetro  $Q$ , chamado de razão de reuso co-canal é relacionado ao tamanho do *cluster*, conforme vimos na Figura 8.1.5. De acordo com a Equação (8.1.16), para uma geometria celular hexagonal, teremos

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (8.1.16)$$

Um pequeno valor para  $Q$  implica em uma maior capacidade para o sistema. De acordo com a Equação (8.1.16), a razão de reuso co-canal  $Q$  é diretamente proporcional ao tamanho do *cluster*  $N$ . Desta forma, quanto menor for  $Q$ , menor terá sido o tamanho do *cluster*  $N$  utilizado para determinar  $Q$  através da Equação (8.1.16). Quanto menor for  $N$ , maior será a razão de reutilização de frequências, pois a cada célula dentro de um *cluster* são atribuídos  $(1/N)$  do número total de canais disponíveis, conduzindo a uma maior capacidade do sistema sobre uma dada área de cobertura.

Por outro lado, quanto maior for o fator de reuso co-canal  $Q$ , melhor será a qualidade da transmissão, devido a um menor nível de interferência co-canal. Como  $Q = D/R$ , um valor alto para  $Q$  decorre de uma maior razão entre a distância entre células co-canais ( $D$ ) e o raio das células ( $R$ ), o que possibilita um menor nível de interferência co-canal para o sistema celular.

No projeto de um sistema celular existe, portanto, um compromisso a ser obedecido na escolha dos parâmetros  $Q$  e  $N$ . A Tabela 8.1.2 apresenta valores de Razão de Reuso Co-Canal para alguns valores de  $N$ .

	Tamanho do Cluster ( $N$ )	Razão de Reuso Co-Canal ( $Q$ )
$i = 1, j = 1$	3	3
$i = 1, j = 2$	7	4.58
$i = 2, j = 2$	12	6
$i = 1, j = 3$	13	6.24

Tabela 8.1.2: Razão de Reuso Co-Canal para alguns valores de  $N$ .

A Figura 8.1.9 apresenta um conjunto de células co-canais, para o caso em que o *cluster* é constituído de  $N = 7$  células (Vide Figura 8.1.5). Na Figura, a célula central representa qualquer das células componentes de um *cluster* de  $N = 7$ , a qual sofre interferência causada por seis células co-canais dispostas ao seu redor, em anel. As células interferentes dispostas ao redor da célula central do *cluster* de  $N = 7$  são pertencentes aos seis *clusters* vizinhos ao *cluster* central. As seis células interferentes constituem o que se chama de primeiro anel interferente.

Para este caso, buscamos determinar a relação entre o sinal desejado e os sinais interferentes, chamada razão sinal/interferência (S/I). O desenvolvimento apresentado refere-se à determinação da relação S/I relativa à interferência que as estações rádio-base vizinhas ocasionam em uma estação rádio-móvel que se comunica na mesma frequência com a estação rádio-base de sua célula. Da mesma forma, o desenvolvimento também é válido para a interferência que estações rádio-móveis localizadas nas células vizinhas causam na estação rádio-base localizada na célula central.

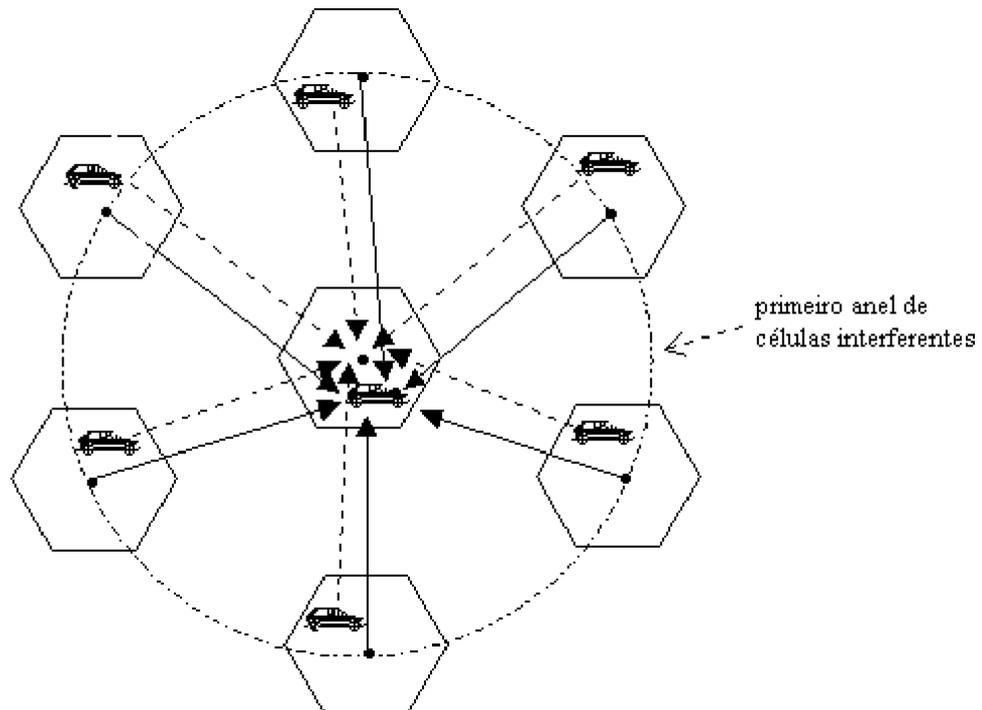


Figura 8.1.9: Interferência co-canal – célula central (interferida) e primeiro anel de células interferentes.

A relação entre o sinal desejado e os sinais interferentes, chamada razão sinal/interferência ( $S/I$  ou  $SIR$ ) pode ser determinada pela Equação (8.1.17), se os níveis de sinal das células co-canais são conhecidos.

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i} \quad (8.1.17)$$

Na Equação (8.1.17), o parâmetro  $i_0$  expressa o número de células que ocasionam interferência co-canal em, por exemplo, um receptor móvel que esteja monitorando um canal direto (interferência que as estações rádio-base vizinhas ocasionam em uma estação rádio-móvel que se comunica na mesma frequência com a estação rádio-base de sua célula), o parâmetro  $S$  é a potência do sinal desejado e  $I_i$  é a potência de interferência causada pelo  $i^{\text{ésimo}}$  co-canal interferente ( $i^{\text{ésima}}$  fonte de interferência).

As medidas de propagação em um canal rádio móvel mostram que a intensidade média do sinal recebido em qualquer ponto decai de acordo com a distância de separação entre o

transmissor e o receptor. A potência média recebida  $P_r$  a uma distância  $d$  a partir da antena transmissora é aproximada por

$$P_r = P_0 \left( \frac{d_0}{d} \right)^n = P_0 \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-n} \quad (8.1.18)$$

ou

$$P_r \text{ (dBm)} = P_0 \text{ (dBm)} - 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (8.1.19)$$

onde  $P_0$  é a potência recebida em um ponto de referência a uma pequena distância  $d_0$  da antena transmissora situado em sua Região de Campo Distante ( $d_0 > 10\lambda$ ) e  $n$  é o expoente de perdas no trajeto de propagação. Para o espaço livre  $n = 2$ .

Consideremos uma estação rádio-móvel que monitora o *link* direto da estação rádio-base que está lhe possibilitando a comunicação. O sinal desejado é, então, o sinal da estação base em serviço e a interferência sofrida é devida a estações rádio-base co-canalais.

Se  $D_i$  é a distância da  $i^{\text{ésima}}$  interferência, medida a partir da estação rádio-móvel, a potência recebida pela estação móvel, devida à  $i^{\text{ésima}}$  célula interferente será proporcional a  $(D_i)^{-n}$ . O expoente de perdas no trajeto de propagação tipicamente varia entre dois e quatro, em sistemas celulares urbanos. Ainda, a partir da Equação (8.1.18) pode-se escrever que

$$P_r d^n = P_0 d_0^n \quad (8.1.20)$$

onde  $P_r$  é a potência média recebida a uma distância  $d$  a partir de uma antena transmissora e  $P_0$  é a potência recebida em um ponto de referência a uma pequena distância  $d_0$  da antena transmissora. Assim, para cada célula interferente, com relação à célula interferida pode-se escrever que

$$S d^n = I_i D_i^n \quad (8.1.21)$$

onde  $S$  é a potência recebida pelo móvel a uma distância  $d$  a partir da antena transmissora desejada (base da célula),  $I_i$  é a potência recebida a uma distância  $D_i$  do móvel ao  $i^{\text{ésimo}}$  transmissor interferente e  $n$  é o expoente de atenuação do sinal com a distância.

Na Equação (8.1.21) a distância  $d$  pode ser aproximada pelo raio  $R$ , porque a pior situação teórica para recepção do sinal desejado é aquela em que o móvel encontra-se no extremo da célula. A distância  $D_i$  pode ser aproximada por  $D$  (distância co-canal), se considerarmos todas as estações base interferentes equidistantes da estação base desejada, o que é uma aproximação que também considera uma situação pior do que a real para um usuário posicionado no extremo da célula, como pode ser observado na Figura 8.1.10 (muitas distâncias  $D_i$  serão maiores do que  $D$ ). Assim, a Equação (8.1.21) pode ser reescrita como

$$SR^n = I_i D^n, \quad (8.1.22)$$

e, se as potências dos transmissores de todas as estações rádio-base interferentes são iguais e o expoente de perdas no trajeto de propagação é o mesmo em toda a área de cobertura, a razão  $S/I$  para o usuário móvel pode ser aproximada através de

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} \frac{SR^n}{D^n}} = \frac{S}{i_0 \frac{SR^n}{D^n}} = \frac{1}{i_0 R^n D^{-n}} = \frac{D^n}{i_0 R^n} = \frac{1}{i_0} \left( \frac{D}{R} \right)^n = \frac{Q^n}{i_0} \quad (8.1.23)$$

Observe na Equação (8.1.23) que, quanto mais urbanizada for uma região (o que conduz a maiores valores para o coeficiente de atenuação com a distância – valores maiores para  $n$ ), maior será a relação  $S/I$ . Ou seja, regiões altamente urbanizadas contribuem para o isolamento do sinal entre células co-canal.

A Equação (8.1.23) considera apenas a interferência sofrida pelo primeiro anel de células interferentes. Embora as células do primeiro anel sejam as que mais contribuam para a interferência, se é desejado um cálculo de  $S/I$  mais fiel a uma situação real, as contribuições dos demais anéis devem ser computadas. A Equação (8.1.24) permite determinar a  $S/I$  para qualquer número desejado de anéis interferentes.

$$\frac{S}{I} = \frac{Q^n}{6} \frac{1}{\sum_{k=1}^K k^{1-n}} \quad (8.1.24)$$

onde  $K$  é o número de anéis interferentes considerados.

A Equação (8.1.23) pode ser escrita em função do tamanho do cluster  $N$ , de acordo com a Equação (8.1.16). Assim, a Equação (8.1.23) se torna

$$\frac{S}{I} = \frac{(D/R)^n}{i_0} = \frac{(\sqrt{3N})^n}{i_0} \quad (8.1.25)$$

A Equação (8.1.25) relaciona  $S/I$  ao tamanho do *cluster*  $N$ , o qual por sua vez determina a capacidade global do sistema a partir da Equação (8.1.15).

Por exemplo, assuma que as 6 células mais próximas são próximas o suficiente para criar interferência significativa e que estão todas aproximadamente equidistantes a partir da estação base desejada. Para o sistema celular AMPS americano, o qual usa modulação FM e canais de 30kHz, testes subjetivos indicam que a qualidade de voz adequada é provida quando a  $S/I$  é maior ou igual a 18dB. Usando a Equação (8.1.25), pode ser mostrado que, para atender a este requerimento, o tamanho do *cluster*  $N$  deve ser pelo menos 6.46, assumindo um expoente de perdas no trajeto  $n = 4$ . Então, um tamanho mínimo de *cluster* de 7 é requerido para atingir ao requerimento de  $S/I$  de 18dB.

Deve-se notar que a Equação (8.1.25) é baseada na geometria celular hexagonal e para *clusters* de  $N = 7$ , onde todas as células interferentes estão equidistantes a partir da estação base receptora, o que de fato não ocorre, em muitos casos. Para alguns planos de reuso de frequência as células interferentes mais próximas possuem distâncias variadas com relação à célula desejada.

Quando o usuário móvel está no limite da célula ele é submetido ao pior caso de interferência co-canal no canal direto. Usando o diagrama de geometria de célula mostrado na Figura 8.1.10 pode ser simulado o pior caso de interferência co-canal, para um *cluster* de 7 células.

Para tal *cluster*, com a unidade móvel no limite externo da célula, o usuário móvel está a uma distância  $D - R$  das duas células interferentes co-canais mais próximas e a exatamente  $D + \frac{R}{2}$ ,  $D$ ,  $D - \frac{R}{2}$  e  $D + R$  das outras células interferentes, localizadas na primeira camada.

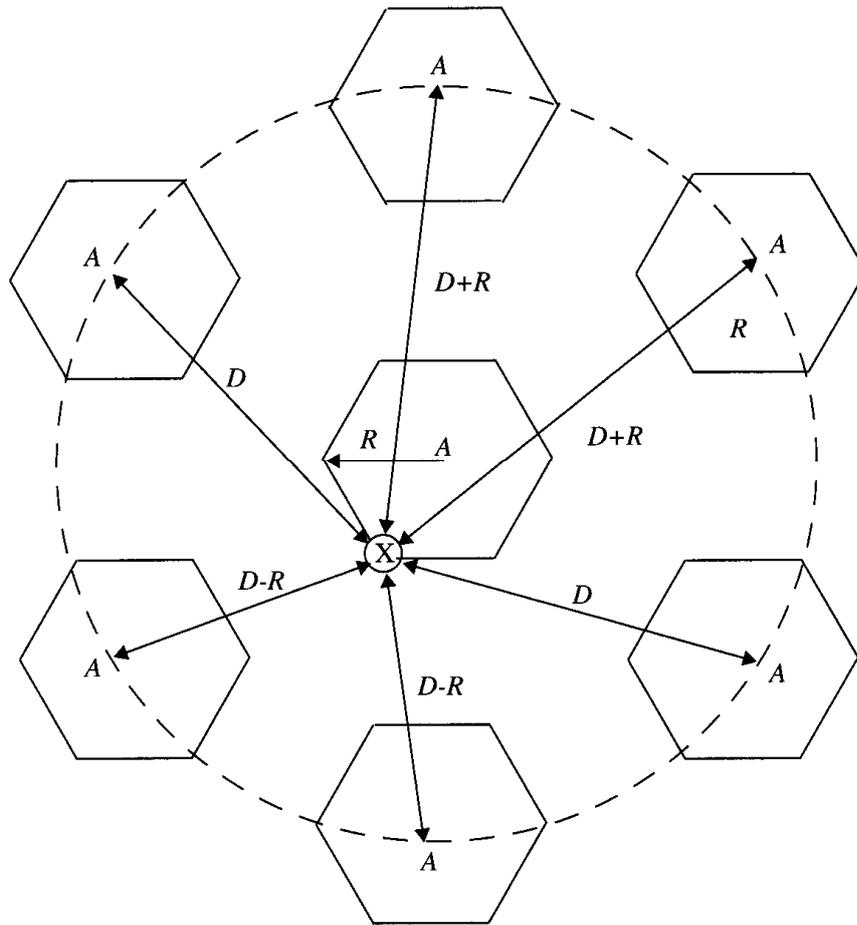


Figura 8.1.10: Ilustração da primeira camada de células co-canal para um *cluster* de tamanho  $N = 7$ . Quando o usuário móvel está no limite da célula (ponto X na Figura), ele é submetido ao pior caso de interferência co-canal no canal direto. As distâncias marcadas entre o usuário móvel e as diferentes células co-canal são baseadas em aproximações feitas para facilitar a análise.

A partir da geometria mostrada na Figura 8.1.10, das Equações (8.1.17) e (8.1.23), e assumindo  $n = 4$ , a razão Sinal/Interferência para o pior caso pode ser aproximada por

$$\begin{aligned} \frac{S}{I} &= \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} \frac{SR^n}{D_i^n}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_0} \frac{R^n}{D_i^n}} = \frac{R^{-n}}{\sum_{i=1}^{i_0} D_i^{-n}} = \\ &= \frac{R^{-4}}{2(D-R)^{-4} + 2(D+R)^{-4} + 2D^{-4}} \end{aligned} \tag{8.1.26}$$

A Equação (8.1.26) pode ser reescrita em termos da razão de reuso co-canal  $Q$ , conforme

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{2(Q-1)^{-4} + 2(Q+1)^{-4} + 2Q^{-4}} \quad (8.1.27)$$

Para  $N = 7$ , a razão  $Q$  de reuso co-canal é 4.6, e a  $S/I$  pode ser obtida a partir de (8.1.27) para o pior caso, resultando em aproximadamente 49.56, ou 17dB.

Como, para o sistema celular AMPS americano, a qualidade de voz adequada é provida quando a  $S/I$  é maior ou igual a 18dB, para projetar um sistema celular com desempenho adequado na condição equivalente ao pior caso, o modelo de *cluster* considerado não poderá ser adotado. Seria necessário aumentar  $N$  para o próximo tamanho imediatamente superior, o qual, a partir da Equação (8.1.13) resulta em 12 (correspondendo a  $i = j = 2$ ).

Este procedimento conduz a uma significativa diminuição na capacidade do sistema, porque o reuso de 12 células oferece uma utilização espectral de 1/12 em cada célula, enquanto que o reuso de 7 células oferece uma utilização de espectro de 1/7. Na prática, a redução da capacidade do sistema (aumento de 7 para 12 células no *cluster*) visando acomodar a situação de pior caso (a qual raramente ocorre) muitas vezes não é utilizada.

A partir da discussão feita, fica claro que a interferência co-canal determina o desempenho do *link*, que, por sua vez, dita o plano de reuso de frequência e a capacidade global dos sistemas celulares.

### **Exemplo 8.1.2:**

Se uma razão Sinal/Interferência de 15dB é requerida para o adequado desempenho do canal direto de um sistema celular, um modelo em que o fator de reuso de frequência, associado a um *cluster* de tamanho  $N = 7$ , poderá ser usado para obter máxima capacidade, se o expoente de perdas no trajeto for:

- (a)  $n = 4$ ,
- (b)  $n = 3$ ?

Assuma que a camada próxima é constituída por 6 células co-canal e todas elas apresentam mesma distância, a partir do usuário móvel.

### Solução:

(a)  $n = 4$ . Para um padrão de reuso de 7 células, usando a Equação (8.1.16), a razão de reuso co-canal  $D/R$  resulta em 4.583.

Usando a Equação (8.1.25), a razão Sinal/Interferência é dada por

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6} \times (4.583)^4 = 75.3 = 18.66 \text{ dB}$$

Como o valor encontrado é superior à  $S/I$  mínima requerida,  $N = 7$  pode ser utilizado.

(b)  $n = 3$ . Da mesma forma que em (a), para um padrão de reuso de 7 células, usando a Equação (8.1.25), a razão Sinal/Interferência é dada por

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6} \times (4.583)^3 = 16.04 = 12.05 \text{ dB}$$

Como o valor encontrado é inferior à  $S/I$  mínima requerida, é necessário utilizar um valor maior do que 7 para  $N$ . Através da Equação (8.1.13), o próximo valor possível a ser adotado para  $N$  é 12 (equivalendo a  $i = j = 2$ ).

## 8.1.4.2 Planejamento de Canais para Sistemas *Wireless*

A escolha judiciosa de canais de rádio apropriados para cada estação base é um processo importante, muito mais difícil na prática do que na teoria.

A Equação (8.1.25) é uma regra valiosa para determinar a razão de reuso de frequência apropriada (ou tamanho do *cluster*) e a separação apropriada entre células co-canal adjacentes. No entanto, na prática, o projeto de sistemas *wireless* esbarra em dificuldades reais de propagação de rádio e regiões de cobertura imperfeitas, peculiares a cada célula.

Geralmente, o espectro disponível para comunicações rádio-móveis é dividido em canais, que são usados em um determinado país ou continente. Estes canais são canais de controle (vitais para inicialização, solicitação, ou *paging* de uma chamada) e canais de voz (dedicados ao tráfego de sinais de voz). Tipicamente, aproximadamente 5% do total do

espectro móvel é devotado a canais de controle, os quais suportam mensagens de dados que são, por natureza, muito breves e ocorrem em surtos, enquanto os 95% restantes do espectro são dedicados a canais de voz.

Os canais são atribuídos pelos provedores de serviço, de diferentes maneiras, de acordo com o mercado que pretendem atender, com as particulares condições de propagação decorrentes da geografia da região e de acordo com a tecnologia escolhida.

### 8.1.4.3 Interferência entre Canais Adjacentes

A interferência entre canais adjacentes ocorre devido à imperfeição dos filtros presentes nos receptores, os quais permitem que frequências próximas se espalhem para a banda passante do canal adjacente, que está em serviço. Este tipo de interferência pode ser minimizada através de criteriosos processos de filtragem e de atribuição de canais.

Como cada célula recebe apenas uma fração dos canais disponíveis, não é necessário que a uma célula sejam atribuídos canais que são adjacentes em frequência.

Para reduzir a interferência entre canais adjacentes é necessário manter uma separação tão grande quanto possível entre as frequências dos canais em uma dada célula. Assim, ao invés de atribuir canais que constituam uma banda contígua de frequências dentro de uma particular célula, a atribuição de canais em uma mesma célula deve ser tal que a separação entre frequências seja maximizada.

Atribuindo seqüencialmente canais sucessivos na banda de frequência a diferentes células, muitos esquemas de alocação de canais permitem uma separação entre canais adjacentes de, pelo menos  $N$  larguras de banda, onde  $N$  é o tamanho do *cluster*.

Alguns esquemas de alocação de canais permitem também prevenir uma fonte secundária de interferência entre canais adjacentes, que seria gerada pela utilização de canais adjacentes em células vizinhas.

Se o fator de reuso de frequência é grande ( $N$  pequeno), a separação entre canais adjacentes na estação base pode não ser suficiente para manter o nível de interferência entre canais adjacentes em limites toleráveis. Por exemplo, se um usuário móvel está 20 vezes mais próximo da estação base do que outro usuário móvel e ocorre espalhamento espectral para

fora de sua banda passante alocada, a razão Sinal/Interferência da estação base para o usuário móvel fraco é aproximadamente

$$\frac{S}{I} = (20)^{-n} \quad (8.1.28)$$

Para um expoente de perdas no trajeto de propagação  $n = 4$ , a relação expressa por (8.1.28) equivale a -52 dB.

Em geral o filtro de FI no receptor da estação base possui uma declividade (*roll-off*) de 20 dB/oitava fora de sua banda de passagem  $B$ , de modo que a sua função de transferência é dada por:

$$G(f)_{\text{dB}} = \begin{cases} 0 & f < B \\ -66.439 \log\left(\frac{f}{B}\right) & f \geq B \end{cases} \quad (8.1.29)$$

De (8.1.29) temos que para  $f = 6B \rightarrow G(f)_{\text{dB}} \approx -52 \text{ dB}$ . Portanto, um canal adjacente que está provocando interferência deve ser colocado a pelo menos 6 vezes a largura da banda de passagem  $B$  do filtro de FI no receptor a partir da frequência central do filtro para que seja possível obter 52dB de atenuação.

Assim, uma separação equivalente a 6 larguras de banda do canal é requerida para filtros típicos que objetivam prover 0 dB de SIR (Razão Sinal/Interferência) com relação a um canal adjacente, o que conduz à necessidade de utilizar filtros com *roll-off* íngreme nas estações base quando usuários próximos e distantes dividem o mesmo canal.

#### 8.1.4.4 Controle de Potência para Redução de Interferência

Em sistemas práticos de comunicação celular e *Personal Communications Systems*, os níveis de potência transmitidos por cada usuário estão sob constante controle por parte das estações base em serviço. Isto é feito para garantir que cada estação móvel transmita com a menor potência necessária para manter um *link* de boa qualidade no canal reverso. O controle da potência não ajuda apenas a prolongar a vida útil da bateria para a unidade do usuário, mas também reduz drasticamente a S/I no sistema.

### 8.1.5 *Trunking* e Grau de Serviço

Os sistemas de comunicações rádio-celulares são baseados no conceito de *trunking* (troncalização), o qual permite o acesso sob demanda a um grande número de usuários do espectro de rádio (limitado, por natureza), compartilhando o uso de um número relativamente menor de canais disponíveis.

Em um sistema de rádio baseado no conceito de *trunking*, cada usuário recebe um canal a cada chamada e, após a finalização da chamada, o canal previamente ocupado é imediatamente devolvido ao conjunto de canais disponíveis.

O sistema de *trunking* explora o comportamento estatístico dos usuários, de tal forma que um número fixo de canais podem acomodar um número grande e aleatório de usuários.

As companhias telefônicas utilizam a teoria de *trunking* para determinar o número de circuitos telefônicos que necessitam ser alocados para prédios de escritórios com centenas de telefones. Este mesmo princípio é utilizado no projeto de sistemas rádio celulares.

Em um tal sistema, há um compromisso entre o número de circuitos de telefones disponíveis e a probabilidade de um particular usuário não encontrar circuitos disponíveis durante o período de pico de ocorrência de chamadas. À medida que o número de linhas telefônicas diminui, se torna mais provável que todos os circuitos estejam ocupados para um particular usuário.

Em um sistema de rádio móvel baseado no conceito de *trunking*, quando um particular usuário solicita o serviço e todos os canais de rádio já estão em uso, a tentativa de chamada é bloqueada (o acesso ao sistema é negado). Em alguns sistemas é utilizada uma fila para "segurar" os usuários solicitantes, até que um canal se torne disponível.

Para projetar sistemas de rádio baseados no conceito de *trunking*, capazes de lidar com uma capacidade específica, a um determinado grau de serviço, é essencial compreender a teoria de *trunking* e a teoria de filas.

Os fundamentos da teoria de *trunking* foram desenvolvidos por Erlang, um matemático dinamarquês, no final do século XIX. Por esta razão, a medida de intensidade de tráfego leva seu nome.

Um Erlang representa a quantidade de tráfego transportada por um canal que está completamente ocupado em um dado período de tempo (a intensidade de tráfego). Por exemplo, um canal de rádio ocupado por trinta minutos durante uma hora, transporta um tráfego de 0.5 Erlangs.

O Grau de Serviço (GOS) é uma medida da probabilidade de um usuário acessar um sistema baseado em *trunking* (troncalização) durante a hora mais ocupada (ou seja, a probabilidade do usuário encontrar um canal disponível para efetuar sua chamada, na hora de maior movimento). A hora ocupada é definida como aquela mais ocupada durante a semana, mês ou ano. As horas ocupadas para sistemas rádio celulares tipicamente ocorrem durante as horas de *rush*, entre 4 e 6 horas da tarde, em quintas ou sextas-feiras.

O grau de serviço é uma referência utilizada para definir o desempenho desejado de um particular sistema baseado no conceito de *trunking*, através da especificação da probabilidade de um usuário obter acesso a um canal, dentre um específico número de canais disponíveis no sistema.

É uma tarefa do projetista de um sistema *wireless* estimar a capacidade máxima requerida e alocar um número apropriado de canais para atingir o GOS. O GOS é tipicamente dado como a probabilidade de uma chamada ser bloqueada, ou a probabilidade de uma chamada ser submetida a um atraso maior do que um determinado tempo de espera em uma fila.

A Tabela 8.1.3 apresenta um conjunto de definições que são utilizadas no universo da teoria de *trunking*, para fazer estimativas a respeito da capacidade de sistemas baseados no conceito de *trunking*.

A intensidade de tráfego gerada por cada usuário é igual à taxa de solicitação de chamadas, multiplicada pela duração média de uma chamada típica (*holding time*, ou tempo de retenção de chamada). Ou seja, cada usuário pode gerar uma intensidade de tráfego de  $A_u$  Erlangs dada por

$$A_u = \lambda H \quad (8.1.30)$$

onde  $H$  é duração média de uma chamada e  $\lambda$  é o número médio de solicitações de chamada por unidade de tempo para cada usuário.

<b><i>Set-up Time</i></b>	O tempo requerido para alocar um canal de rádio para um usuário solicitante em um sistema baseado na teoria de <i>trunking</i> .
<b><i>Blocked Call</i></b>	A chamada que não pode ser completada no momento da solicitação, devido a congestionamento. Esta chamada é também referida como "chamada perdida".
<b><i>Holding Time</i></b>	Duração média de uma chamada típica. Denotada por $H$ (em segundos).
<b><i>Traffic Intensity</i></b>	Medida do tempo de utilização do canal, a qual representa a ocupação média do canal, medida em Erlangs. Esta quantidade é adimensional e pode ser utilizada para medir o tempo de utilização de canais simples ou múltiplos. Denotada por $A$ .
<b><i>Load</i></b>	Intensidade do tráfego através de um sistema de rádio baseado no conceito de <i>trunking</i> , medida em Erlangs.
<b><i>Grade of Service (GOS)</i></b>	Uma medida de congestionamento, a qual é especificada como a probabilidade de uma chamada ser bloqueada (para o modelo Erlang B), ou a probabilidade de uma chamada ser atrasada por um tempo maior que um tempo pré-estabelecido (para o modelo Erlang C).
<b><i>Request Rate</i></b>	O número médio de chamadas solicitadas por unidade de tempo. Denotada por $\lambda$ segundos <sup>-1</sup> .

Tabela 8.1.3: Definições de termos comuns usados na teoria de *trunking*.

Para um sistema que contenha  $U$  usuários e um número de canais não especificado, o total de intensidade de tráfego gerado ( $A$ ) é dado por

$$A = UA_u \quad (8.1.31)$$

Ainda, em um sistema baseado em *trunking* com  $C$  canais, se o tráfego é igualmente distribuído entre os canais, então a intensidade de tráfego por canal ( $A_c$ ) é dada por

$$A_c = \frac{UA_u}{C} \quad (8.1.32)$$

Note que a intensidade de tráfego acima referida não é necessariamente o tráfego que é transportado pelo sistema, e sim aquele que pode ser suportado pelo sistema. Na prática, o tráfego solicitado pode exceder a capacidade máxima do sistema, ocorrendo uma limitação de tráfego, devido ao número limitado de canais. O sistema celular AMPS, por exemplo, é projetado para um GOS de 2% de bloqueios. Isto implica que as alocações de canais por

célula são projetadas de tal forma que duas em cem chamadas sejam bloqueadas devido à ocupação de canais durante a hora mais congestionada.

Há dois tipos de sistemas baseados em *trunking* comumente utilizados. O primeiro tipo não oferece a possibilidade de espera em uma fila para as chamadas solicitadas. Ou seja, para cada usuário que solicita um serviço, é assumido que não há um tempo de *setup* e que o usuário recebe imediatamente o acesso ao canal (desde que haja, pelo menos, um canal disponível). Se não há canais disponíveis, o usuário solicitante é bloqueado, ficando sem acesso ao sistema e livre para tentar novamente mais tarde. Este tipo de sistema de *trunking* é denominado Chamadas Bloqueadas Liberadas (*Blocked Calls Cleared*) e assume que as chamadas obedecem uma distribuição de Poisson<sup>1</sup>. Além disso, é assumido que há um número infinito de usuários, e que:

- (a) as chegadas de solicitação são sem memória, implicando que qualquer usuário, incluindo os usuários bloqueados, possam requisitar uma chamada a qualquer tempo;
- (b) a probabilidade de um usuário ocupar um canal é exponencialmente distribuída, de tal forma que chamadas mais longas são menos prováveis de ocorrer (conforme seria descrito por uma distribuição exponencial);
- (c) há um número finito de canais disponíveis, em um grupo de canais troncalizados.

Este tipo de sistema conduz à derivação da fórmula Erlang B (também conhecida como a fórmula *Blocked Calls Cleared*). A fórmula Erlang B determina a probabilidade de uma chamada ser bloqueada e é medida pelo GOS, para um sistema baseado no conceito de *trunking* que não provê uma fila para chamadas bloqueadas. A fórmula Erlang B é expressa por

$$\Pr[\text{bloqueio}] = \frac{A^C}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} = GOS \quad (8.1.33)$$

onde  $C$  é o número de canais oferecidos por um sistema de rádio baseado no conceito de *trunking* e  $A$  é o tráfego total gerado.

É possível modelar um sistema baseado no conceito de *trunking* considerando-se um número finito de usuários, no entanto, as expressões resultantes acabam por ser muito mais complicadas do que as expressões para o modelo Erlang B, e o modelamento se torna

---

<sup>1</sup> Um processo de Poisson é um processo em que as ocorrências são variáveis aleatórias independentes. Este tipo de processo descreve fenômenos tais como a ocorrência de falhas em componentes de um sistema e a demanda por serviços que envolvem a espera em filas.

inadequado para casos em que o número de usuários é muitas ordens de magnitude maior do que o de canais disponíveis.

Sendo assim, a expressão Erlang B provê uma estimativa conservadora do GOS pois, como o número real de usuários é finito, os resultados sempre predizem uma probabilidade de bloqueio um pouco maior do que aquela que pode, de fato, ocorrer.

Valores para a expressão Erlang B são tabelados, de forma que a análise das combinações desejadas de GOS, tráfego e número de canais necessários se torna mais prática. A Tabela 8.1.4 mostra alguns exemplos de capacidade de um sistema troncalizado do tipo Chamadas Bloqueadas Liberadas (*Blocked Calls Cleared*), para vários possíveis valores de GOS e números de canais.

Número de Canais $C$	Capacidade (Erlangs) para GOS			
	= 0.01	= 0.005	= 0.002	= 0.001
2	0.153	0.105	0.065	0.046
4	0.869	0.701	0.535	0.439
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09
20	12.0	11.1	10.1	9.41
24	15.3	14.2	13.0	12.2
40	29.0	27.3	25.7	24.5
70	56.1	53.7	51.0	49.2
100	84.1	80.9	77.4	75.2

Tabela 8.1.4: Capacidade de um Sistema Erlang B.

O segundo tipo de sistema baseado no conceito de *trunking* é aquele em que é formada uma fila para reter as chamadas que são bloqueadas. Se não há canal disponível imediatamente, a solicitação de chamada pode ser atrasada até que um canal se torne disponível (ou seja, a requisição da chamada pode esperar algum tempo na fila até que um canal seja liberado).

Esta forma de troncalização é denominada Chamadas Bloqueadas Retardadas (*Blocked Keys Delayed*) e sua medida de GOS é definida como a probabilidade de que uma chamada seja bloqueada após esperar um determinado intervalo de tempo na fila. Este método dá origem à outra formulação denominada Erlang C. Usualmente, os cálculos de troncalização

são feitos utilizando a expressão Erlang B. No entanto, é relevante analisarmos o caso em que é utilizada a expressão Erlang C.

Neste segundo caso, para determinar o GOS, primeiro é necessário determinar a probabilidade de uma chamada ter o acesso ao sistema inicialmente negado. A probabilidade de uma chamada não receber acesso imediato a um canal é determinada pela expressão denominada Erlang C, expressa na Equação (8.1.34).

$$\Pr[\text{atraso} > 0] = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}} \quad (8.1.34)$$

Se não há canais imediatamente disponíveis, a chamada é atrasada. A probabilidade de que a chamada atrasada seja forçada a esperar mais do que  $t$  segundos é dada pela probabilidade de uma chamada ser atrasada multiplicada pela probabilidade condicional de o atraso ser maior do que  $t$  segundos.

O GOS de um sistema *trunked* onde chamadas bloqueadas são atrasadas é, então,

$$\begin{aligned} \Pr[\text{atraso} > t] &= \Pr[\text{atraso} > 0] \Pr[\text{atraso} > t \mid \text{atraso} > 0] = \\ &= \Pr[\text{atraso} > 0] \exp(-(C - A)t/H) \end{aligned} \quad (8.1.35)$$

O atraso médio  $D$  para todas as chamadas em um sistema que opera por meio de filas será

$$D = \Pr[\text{atraso} > 0] \frac{H}{C - A} \quad (8.1.36)$$

onde o atraso médio para aquelas chamadas que são colocadas na fila é dado por  $H/(C - A)$ .

As fórmulas Erlang B e Erlang C são plotadas graficamente nas Figuras 8.1.11 e 8.1.12. Os gráficos mostrados nas figuras são úteis para determinar o GOS de forma rápida, embora simulações computacionais sejam freqüentemente utilizadas para determinar comportamentos transientes experimentados por usuários particulares em um sistema móvel. Para usar as Figuras 8.1.11 e 8.1.12, procede-se de acordo com o seguinte algoritmo:

- (1) localiza-se o número de canais na parte superior do gráfico;
- (2) localiza-se a intensidade do tráfego do sistema na base do gráfico;
- (3) encontra-se a probabilidade de bloqueio  $P_r[\text{bloqueio}]$  na abcissa da Figura 8.1.11 ou
- (4) encontra-se a probabilidade de uma chamada não receber acesso imediato ao sistema  $P_r[\text{atraso}] > 0$ , na abcissa da Figura 8.1.12.

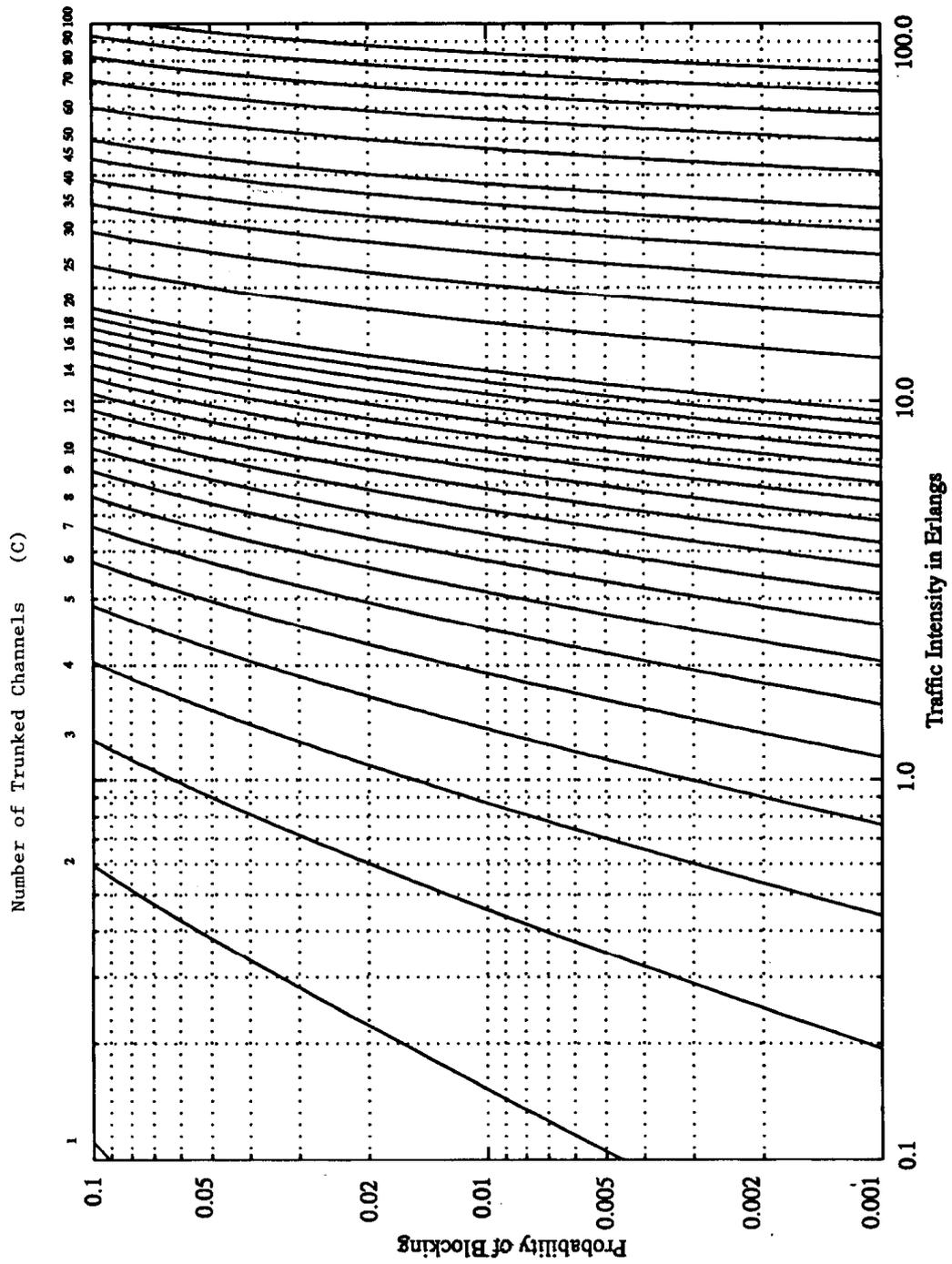


Figura 8.1.11: Carta para o modelo Erlang B, mostrando a probabilidade de bloqueio como uma função do número de canais e da intensidade de tráfego em Erlangs.

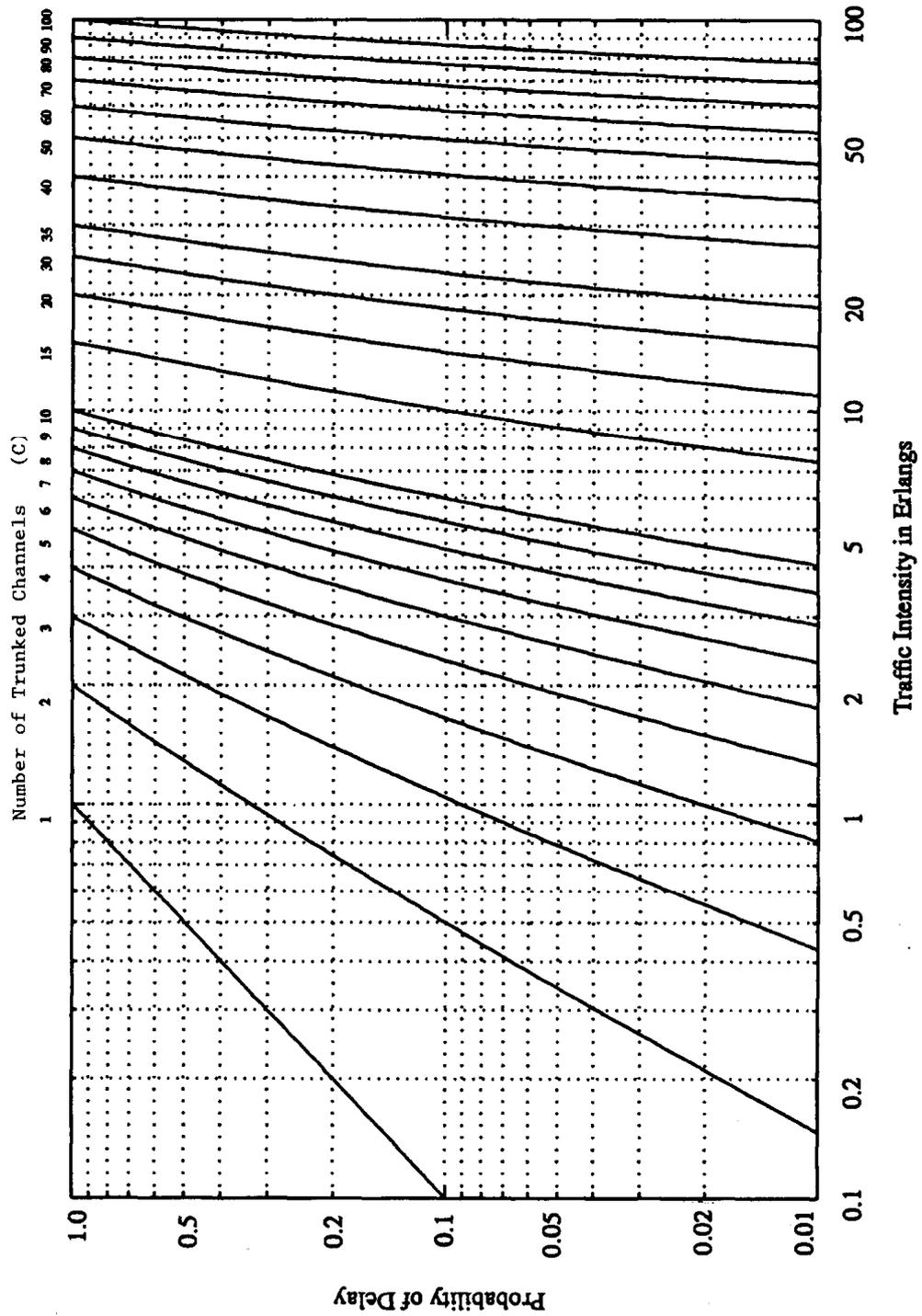


Figura 8.1.12: Carta para o modelo Erlang C, mostrando a probabilidade de uma chamada ser atrasada como uma função do número de canais e da intensidade de tráfego em Erlangs.

A eficiência de *trunking* é uma medida do número de usuários aos quais pode ser oferecido um particular GOS, com uma determinada configuração de canais fixos. A forma pela qual os canais são agrupados altera substancialmente o número de usuários que podem ser suportados por um sistema baseado na técnica de *trunking*, e é um fator de grande impacto na capacidade global do sistema.

Por exemplo, a partir da Tabela 8.1.4, pode-se verificar que 10 canais operando sob a filosofia de *trunking* a um GOS de 0.01 podem suportar 4.46 Erlangs de tráfego, enquanto que 2 grupos de 5 canais podem suportar  $2 \times 1.36$  Erlangs, ou 2.72 Erlangs de tráfego (1.36 Erlangs é o tráfego suportado por cinco canais para oferecer um GOS de 0.01). Ou seja, um grupo de 10 canais operando de acordo com a filosofia de *trunking* suporta 60% mais tráfego, a um dado GOS, do que 2 grupos com 5 canais cada, operando independentemente da mesma forma.

Fica claro, desta forma, que a alocação de canais em um sistema troncalizado tem um grande impacto na capacidade final do sistema. A diferença de eficiência decorrente da distribuição de canais deve-se à não linearidade da expressão Erlang B. A eficiência de troncalização pode ser calculada pela expressão (8.1.37):

$$\eta_T (\%) = \frac{\text{Tráfego em Erlangs}}{\text{Número de Canais}} \times 100 \quad (8.1.37)$$

Para exemplificar, considere a Figura 8.1.13. Pode-se observar na figura que, para agrupamentos de menos do que 15 canais, a eficiência da operação de troncalização para um GOS de 2% é de pouco mais do que 10%, correspondendo a uma capacidade de aproximadamente 10 Erlangs para o sistema, o que é um desempenho desfavorável para a operadora do serviço celular.

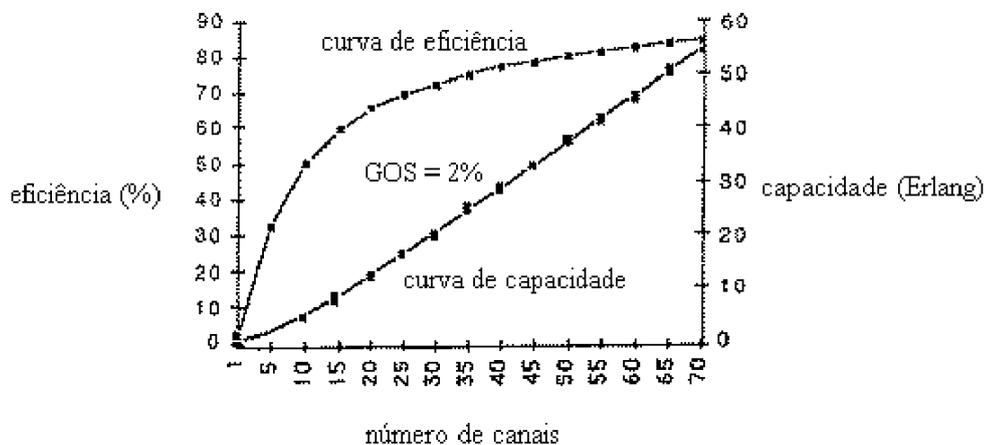


Figura 8.1.13: Eficiência de troncalização.

### Exemplo 8.1.3:

Quantos usuários podem ser suportados para uma probabilidade de bloqueio de 0.5%, para os seguintes números de canais, operando sob a filosofia de *trunking* em um sistema *Blocked Calls Cleared*? Assuma que cada usuário gera 0.1 Erlangs de tráfego.

(a) 4,

(b) 10.

### Solução:

A partir da Tabela 8.1.4, pode-se encontrar a capacidade total em Erlangs para um GOS de 0.5%, para diferentes números de canais.

Através do uso da relação  $A = UA_u$ , pode-se obter o número total de usuários que podem ser suportados no sistema.

(a) Dado  $C = 4$ ,  $A_u = 0.1$ ,  $GOS = 0.005$ .

A partir da Figura 8.1.11, obtém-se  $A \approx 0.7$ .

Portanto, o número total de usuários,

$$U = A/A_u \cong 0.7/0.1 = 7 \text{ usuários.}$$

(b) Dado  $C = 10$ ,  $A_u = 0.1$ ,  $GOS = 0.005$ .

A partir da Figura 8.1.11, obtém-se  $A \approx 3.96$ .

Portanto, o número total de usuários,  $U = A/A_u \cong 3.96/0.1 = 39$  usuários.

### Exemplo 8.1.4

Uma área urbana conta com uma população de 2 milhões de residentes.

Duas redes de telefonia móvel correntes operando com base no sistema de *trunking* (sistemas A e B) provêm serviços de telefonia celular nesta área.

O sistema A possui 394 células, com 19 canais cada uma, enquanto que o sistema B possui 98 células, com 57 canais cada.

Encontre um número de usuários que podem ser suportados, a uma taxa de bloqueio de 2%, se cada usuário efetua, na média, duas chamadas por hora, cada uma delas com duração média de 3 minutos.

Assumindo que os dois sistemas são operados em capacidade máxima, calcule a porcentagem de penetração de mercado de cada empresa provedora do sistema celular.

### Solução:

Para o Sistema A são dados:

Probabilidade de bloqueio = 2% = 0.02.

Número de canais por célula usados no sistema,  $C = 19$ .

Intensidade de tráfego por usuário,  $A_u = \lambda H = 2 \times (3/60) = 0.1$  Erlangs

Para  $GOS = 0.02$  e  $C = 19$ , a partir da carta Erlang B, o tráfego total transportado  $A$ , resulta em 12 Erlangs.

Portanto, o número de usuários que podem ser suportados por célula é igual a  $U = A/A_u = 12/0.1 = 120$ .

Desde que há 394 células, o número total de assinantes que podem ser suportados pelo Sistema A é  $120 \times 394 = 47280$ .

Para o Sistema B são dados:

Probabilidade de bloqueio = 2% = 0.02.

Número de canais por célula usados no sistema,  $C = 57$ .

Intensidade de tráfego por usuário,  $A_u = \lambda H = 2 \times (3/60) = 0.1$  Erlangs

Para  $GOS = 0.02$  e  $C = 57$ , a partir da carta Erlang B, o tráfego total transportado  $A$  resulta em 45 Erlangs.

Portanto, o número de usuários que podem ser suportados por célula é igual a  $U = A/A_u = 45/0.1 = 450$ .

Desde que há 98 células, o número total de assinantes que podem ser suportados pelo Sistema B é igual a  $450 \times 98 = 44100$ .

Portanto, o número total de assinantes do sistema celular que podem ser suportados por estes 2 sistemas é igual a  $47280 + 44100 = 91380$  usuários.

Desde que há um total de 2 milhões de residentes na área urbana e o número de assinantes do sistema celular A é igual a 47280, a porcentagem de penetração de mercado deste provedor é  $47280/2000000 = 2.36\%$ .

De forma similar, a penetração de mercado do sistema B é expressa por  $44100/2000000 = 2.205\%$ .

A penetração de mercado dos dois sistemas combinados será, portanto,  $91380/2000000 = 4.569\%$

### Exemplo 8.1.5

Uma cidade tem uma área de 1300 milhas quadradas e é coberta por um sistema celular que utiliza um padrão de reuso de células igual a 7. Cada célula tem um raio de 4 milhas e a cidade utiliza uma alocação de 40MHz do espectro, com uma largura de banda *full duplex* de 60kHz (Lembre que a área de uma célula hexagonal é dada por  $2.5981R^2$ ). Assuma um GOS de 2% para o sistema Erlang B. Se o tráfego por usuário é igual a 0.03 Erlangs, determine:

- o número de células na área de serviço;
- o n° de canais por célula;
- a intensidade de tráfego suportada por cada célula;
- o tráfego máximo transportado pelo sistema;
- o n° total de usuários que podem ser servidos, a um GOS de 2%;
- o n° de usuários móveis por canal (considerando o reuso de canais);
- o n° máximo teórico de usuários que podem ser servidos ao mesmo tempo pelo sistema celular e
- o n° máximo teórico de usuários que poderiam ser servidos ao mesmo tempo pelo sistema, caso não fosse adotada a filosofia de comunicações celulares.

### Solução:

- a) São dados:

Área total de cobertura = 1300 milhas.

Raio das células = 4 milhas.

Como a área de uma célula hexagonal é igual a  $2.5981R^2$ , cada célula terá uma área de cobertura de  $2.5981 \times (4)^2 = 41.57$  milhas<sup>2</sup>.

Desta forma, o número total de células será

$$N_c = \frac{1300 \text{ milhas}^2 \text{ totais a serem cobertas}}{41.57 \left( \frac{\text{milhas}^2}{\text{célula}} \right)} = 31 \text{ células}$$

- b) O número total de canais por célula  $C$  é dado por

$$C = \frac{\text{espectro alocado}}{\left( \text{banda do canal} \times \left( \text{fator de reuso de frequência} \right)^{-1} \right)} = \frac{40000000}{60000 \times 7} = 95 \text{ canais/célula}$$

\* Observe que o fator de reuso de frequências é dado por  $1/N = 1/7$ .

- c) São dados  $C = 95$  canais/célula e  $GOS = 0.02$ . A partir do gráfico Erlang B, encontra-se uma intensidade de tráfego por célula  $A = 84$  Erlangs/célula.

- d) Máximo tráfego transportado = n° de células × intensidade de tráfego/célula =  
= 31 células × 84 (Erlangs/célula) = 2604 Erlangs.

e) Número total de usuários = tráfego total/tráfego por usuário.

O tráfego por usuário é dado, sendo = 0.03 Erlangs. Assim,

$$\text{Número total de usuários} = \frac{2604 \text{ Erlangs}}{0.03 \frac{\text{Erlangs}}{\text{usuário}}} = 86800 \text{ usuários.}$$

f) N° de usuários por canal, considerando o reuso de frequências:

N° de usuários por canal = N° total de usuários / N° total de canais

N° total de usuários = 86800 (conforme determinado em (e)).

N° total de canais = 95 (canais/célula) x 31 células = 2945 canais.

$$\text{N° de usuários por canal} = \frac{86800}{2945} \approx 29.5 \text{ usuários/canal.}$$

g) Para um sistema celular, o n° máximo teórico de usuários é igual ao n° de canais disponíveis no sistema, na situação em que todos os canais estejam ocupados (n° de canais por célula x n° total de células). Assim,

N° máximo teórico de usuários no sistema celular =  $C \times N_C =$

$$= 95 \times 31 = 2945 \text{ usuários, o que corresponde a}$$

$$\frac{2945}{86800} = 3.39 \% \text{ da base de assinantes.}$$

h) Para um sistema não celular, o n° máximo teórico de usuários também é igual ao n° de canais disponíveis no sistema, na situação em que todos os canais estejam ocupados. Assim,

N° máximo teórico de usuários sistema não celular =  $\frac{\text{espectro alocado}}{(\text{banda do canal})} =$

$$= \frac{40000000}{60000} = 666 \text{ usuários, o que corresponde a}$$

$$\frac{666}{86800} = 0.77 \% \text{ da base de assinantes.}$$

### Exemplo 8.1.6

Uma célula hexagonal pertencente a um sistema de 4 células tem um raio de 1.387 km. O sistema inteiro utiliza um total de 60 canais. Se a demanda por usuário é 0.029 Erlangs e  $\lambda = 1$  chamada/hora calcule, para um sistema Erlang C que tem uma probabilidade de 5% de uma chamada ser atrasada:

a) Quantos usuários por km quadrado este sistema suportará?

b) Qual é a probabilidade de que uma chamada atrasada tenha que esperar mais do que 10 segundos?

### Solução:

São dados:

Raio da célula,  $R = 1.387 \text{ km}$

$$\text{Área coberta por célula} = 2.598 \times (1.387)^2 = 5 \text{ km}^2$$

Número de células por *cluster* = 4

Número total de canais = 60

Portanto, o número de canais por célula =  $60/4 = 15$  canais.

a) A partir do gráfico Erlang C: para uma probabilidade de atraso de 5%, com  $C = 15$ , a intensidade de tráfego será 9.0 Erlangs por célula.

Assim:

Nº de usuários por célula = Intensidade total de tráfego por célula/tráfego por usuário =

$$\frac{9.0 \text{ Erlangs/célula}}{0.029 \text{ Erlangs/usuário}} = 310 \text{ usuários por célula}$$

Nº de usuários/km<sup>2</sup> = Nº de usuários por célula/Área coberta por célula =

$$\frac{310 \text{ usuários/célula}}{5 \text{ km}^2 / \text{célula}} = 62 \text{ usuários / km}^2$$

b) A duração média de uma chamada típica (*holding time*) pode ser

expressa por  $H = \frac{A_u}{\lambda}$ .

O número médio de chamadas solicitadas por unidade de tempo é  $\lambda = 1$  chamada/hora e  $A_u = 0.029$  Erlangs. Assim,

$$H = \frac{A_u}{\lambda} = \frac{0.029 \text{ Erlangs}}{1 \text{ chamada/hora}} = \frac{0.029 \text{ Erlangs}}{\frac{1 \text{ chamada/hora}}{3600 \text{ s/hora}}} = 0.029 \times 3600 = 104.4 \text{ s/chamada}.$$

A probabilidade de que uma chamada atrasada tenha que esperar mais do que 10 segundos é dada por

$$\begin{aligned} P_r[\text{atraso} > t] &= P_r[\text{atraso} > 0] P_r[\text{atraso} > t | \text{atraso} > 0] = P_r[\text{atraso} > 0] \exp(-(C - A)t/H) = \\ &= 0.05 \exp(-(15 - 9.0)10/104.4) = 2.814\% \end{aligned}$$

## 8.1.6 Melhorando a Área de Cobertura e a Capacidade de Sistemas Celulares

À medida que a demanda por serviços *wireless* aumenta, o número de canais atribuídos a uma célula eventualmente se torna insuficiente para suportar o número de usuários requerido. A solução para este problema consiste em prover mais canais por área de cobertura.

As técnicas denominadas divisão de células (*cell splitting*) e setorização (*sectoring*) são usadas na prática para expandir a capacidade dos sistemas celulares.

### 8.1.6.1 Divisão de Células (*Cell Splitting*)

A técnica de divisão de células consiste em subdividir uma célula congestionada em células menores, cada uma com sua própria estação base e uma conseqüente redução na potência de transmissão.

Esta técnica aumenta a capacidade de um sistema celular, através do aumento do número de vezes que os canais são reutilizados.

Definindo novas células de raio menor do que o raio das células originais e instalando estas células menores (chamadas microcélulas) entre as células existentes, a capacidade do sistema é aumentada devido ao número adicional de canais por área de cobertura. A Figura 8.1.14 exemplifica o conceito de divisão celular.

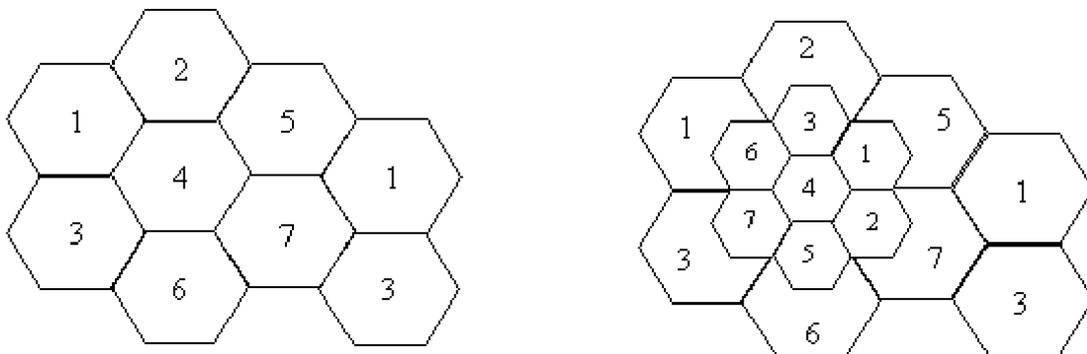


Figura 8.1.14: Conceito de divisão celular.

O conceito de divisão de células, se bem aplicado, permite a um sistema crescer através da substituição de grandes células por células menores, sem atrapalhar o esquema de alocação de canais requerido para manter a razão mínima de reuso co-canal  $Q$  entre células co-canais.

Uma desvantagem decorrente do processo de divisão celular é o aumento do número de estações rádio-base, fator que implica em aumento de custo para o sistema. Uma redução do raio da célula por um fator  $k$  aumenta o número de ERBs por um fator  $k^2$ . Ou seja, se uma célula hexagonal for reduzida, de tal forma que seu raio seja a metade do raio da célula original ( $r = R/2$ , fator  $k = 2$ ) será necessário utilizar 4 vezes ( $k^2 = 4$ ) mais células para cobrir a mesma área de serviço, gerando a necessidade de 4 vezes mais ERBs.

Para ilustrar esta afirmação considere um hexágono de raio  $R$ . A área coberta por tal hexágono é 4 vezes maior do que a área coberta por um hexágono hipotético de raio  $r = R/2$ , já que a área da célula original é expressa por 8.1.38

$$A_{\text{célula original}} = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2} \quad (8.1.38)$$

enquanto que a área da nova célula será

$$A_{\text{nova célula}} = \frac{3\sqrt{3}(R/2)^2}{2} = \frac{3\sqrt{3}R^2}{8} \quad (8.1.39)$$

Um outro exemplo de divisão de células é mostrado na Figura 8.1.15. Na Figura 8.1.15 as estações base são colocadas nos cantos das células e a área servida pela estação base A apresenta condições de tráfego saturadas, ou seja, as taxas de bloqueio de chamadas da estação base A excedem as taxas aceitáveis para o serviço celular. A solução para este problema consiste em instalar novas estações base na região para aumentar o número de canais disponíveis, reduzindo a área servida pela única estação base (estação base A).

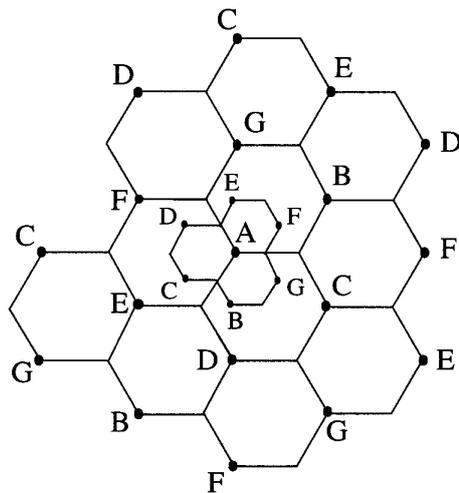


Figura 8.1.15:  
 Divisão de células em que ERBs são colocadas nos cantos das células.

No exemplo mostrado na Figura 8.1.15, células menores foram adicionadas, de forma a preservar o plano de reuso de frequências do sistema. Observe, por exemplo, que a estação base microcelular denominada *G* foi colocada na metade da distância entre duas estações maiores que utilizam o mesmo canal (*G*). Este também é o caso para as demais microcélulas incluídas na mesma figura. Na Figura 8.1.15, a técnica divisão de células simplesmente aplica uma escala à geometria de um *cluster*, neste caso, o raio de cada nova microcélula é a metade do raio da célula original.

Com a redução do raio das células, a potência transmitida pelas novas células deverá ser reduzida. Para o caso de novas células com raio igual à metade do raio das células originais, a potência transmitida pode ser determinada igualando as potências recebidas  $P_r$  nos limites da nova célula e da célula antiga. Esta medida é necessária para garantir que o plano de reuso de frequências para as novas microcélulas se comporte exatamente como o das células originais. Para a Figura 8.1.15,

$$P_r[\text{no limite da célula antiga}] \propto P_{t1} R^{-n} \quad \text{e} \quad (8.1.40)$$

$$P_r[\text{no limite da célula nova}] \propto P_{t2} (R/2)^{-n} \quad (8.1.41)$$

onde  $P_{t1}$  e  $P_{t2}$  são as potências transmitidas, respectivamente pela estação base maior e pela estação base menor, e  $n$  é o expoente de perdas de propagação. Se considerarmos  $n = 4$  e igualarmos as potências recebidas, teremos

$$P_{t2} = \frac{P_{t1}}{16} \quad (8.1.42)$$

Em outras palavras, a potência deve ser reduzida 12dB para preencher a área original de cobertura com microcélulas mantendo, ao mesmo tempo, a S/I requerida.

Na prática, no entanto, não são todas as células que são subdivididas em uma particular operação de divisão de células. É freqüentemente difícil para os provedores de serviço encontrarem locações que sejam perfeitamente situadas para a operação de divisão de células. Portanto, diferentes tamanhos de células irão coexistir.

Em tais situações, um especial cuidado é necessário para manter a mínima distância entre células co-canais requerida e, conseqüentemente, a atribuição de canais se torna uma operação mais complicada.

Para exemplificar este problema considere o caso particular mostrado na Figura 8.1.16, em que foi realizada divisão celular. A distância entre as células co-canais originais é mantida, ou seja,  $D = 4.6R$ , onde  $R$  é o raio das células originais. Da mesma forma, pelo fato da divisão seguir o mesmo arranjo de *clusters* original, a distância entre duas novas células co-canais (menores) é de  $d = 4.6r = 4.6R/2$ , onde  $r$  é o raio das novas células. O nível de interferência é, portanto, igual entre células co-canais de mesmo tamanho, e igual ao nível de projeto.

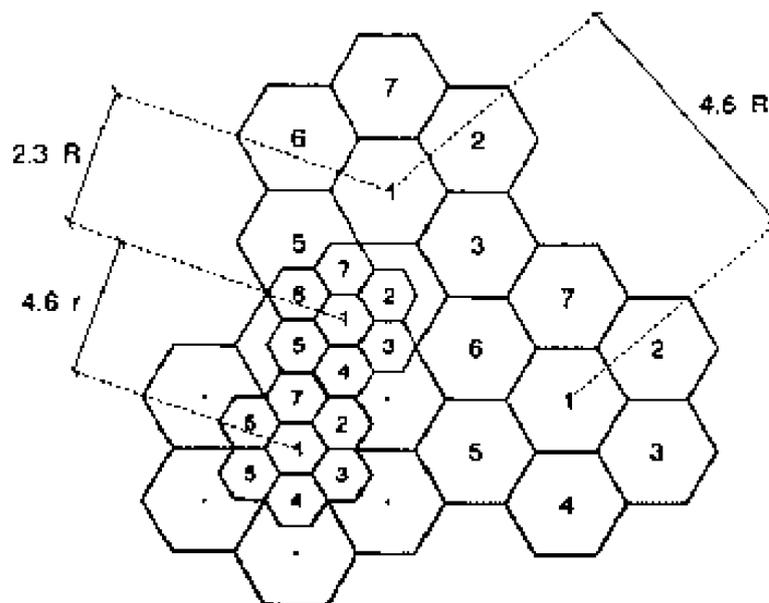


Figura 8.1.16: Divisão celular. Novas distâncias de reuso de freqüências.

Na Figura 8.1.16 pode-se observar que uma ligação em andamento em uma célula pequena não interferirá em uma célula co-canal original pois, sendo atendida a distância de reuso entre as células co-canais menores ( $4.6r$ ), ao mesmo tempo será atendida a distância entre as novas células co-canais e as células co-canais originais ( $2.3R$ ) que é a mesma ( $4.6r=2,3R$ ).

No entanto, uma chamada em andamento em uma célula original interferirá numa célula pequena co-canal, pois a distância de reuso entre as células de tamanho original ( $4.6R$ ) é maior do que a distância de reuso entre células co-canais novas e originais ( $2.3R$ ).

Para examinar o aumento de interferência resultante, expresso pela diminuição na relação  $S/I$ , comparemos os valores do fator de reuso co-canal para o sistema original e para o sistema que considera divisão celular.

O fator de reuso co-canal entre as células originais (de mesmo tamanho) é dado por  $Q = D/R = 4.6$ , enquanto que o fator de reuso co-canal entre as células originais e as novas células é reduzido na proporção da redução da distância entre as células co-canais novas e originais ( $4.6R/2.3R$ ) resultando, portanto, em  $q = 2.3$ .

De posse dos valores de fator de reuso co-canal para os dois sistemas, pode-se determinar a diminuição da relação  $S/I$ , a partir da Equação (8.1.25). Assim,

$$\frac{S/I \text{ do sistema que considera divisão de células}}{S/I \text{ do sistema original}} \Big|_{dB} = \frac{(q^n/i_0)}{(Q^n/i_0)} \Big|_{dB} = \quad (8.1.43)$$

$$= \frac{q^n}{Q^n} \Big|_{dB} = \frac{(2.3)^n}{(4.6)^n} \Big|_{dB} = \frac{(2.3)^n}{(2^n)(2.3)^n} \Big|_{dB} = 2^{-n} \Big|_{dB} = 10 \log 2^{-n} \cong -3.01n,$$

o que representa uma perda de aproximadamente 3.01 dB com relação à relação  $S/I$  do sistema original (sem divisão celular).

Uma solução possível para este problema é apresentada na Figura 8.1.17, em que as células originais (maiores) são divididas em duas camadas concêntricas. Na camada mais externa da célula maior só poderá haver canais pertencentes ao grupo B de canais, que não estejam sendo usados na célula menor (grupo A de canais). Assim, não havendo canais em comum entre as células originais e as células menores, será evitada a interferência co-canal,

aumentando o isolamento entre as células co-canais originais (maiores) e as novas células (menores).

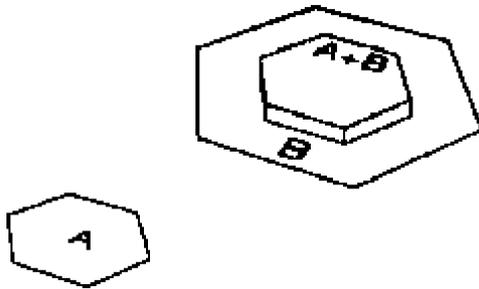


Figura 8.1.17:  
Divisão celular – solução para a diminuição da interferência co-canal, através da técnica *overlay*.

Um outro problema enfrentado quando se utiliza a técnica de divisão celular é o aumento do número de operações de *handoff*, responsável por um conseqüente aumento da sobrecarga de controle para o CCC (*overhead*). Ainda, tratando-se de células de diferentes tamanhos, os aspectos de *handoff* devem ser cuidados, de tal forma que tráfegos de alta e baixa velocidade possam ser simultaneamente acomodados (a abordagem célula guarda-chuva, estudada anteriormente, é uma abordagem comumente utilizada).

Quando há dois tamanhos de células na mesma região, a Equação (8.1.42) mostra que simplesmente não se pode utilizar a potência original de transmissão para todas as novas células ou a nova potência de transmissão para todas as células originais. Se a maior potência de transmissão é usada para todas as células, alguns canais usados pelas células menores poderão não estar suficientemente separados de suas células co-canais. Por outro lado, se a menor potência de transmissão é usada para todas as células, pode haver partes das células maiores que não serão cobertas. Por esta razão, os canais utilizados nas células antigas devem ser quebrados em dois grupos de canais, um que corresponda aos requerimentos de reuso das células menores, e outro que corresponda aos requerimentos de reuso das células maiores. As células maiores são usualmente dedicadas a tráfegos de alta velocidade, de forma que operações de *handoff* sejam menos freqüentes.

Os tamanhos dos dois grupos de canais dependem do estágio do processo de divisão de células. No início do processo haverá menos canais nos grupos de menor potência. Entretanto, à medida que a demanda cresce, mais canais serão requeridos e os grupos de menor potência irão requerer mais canais. Este processo de divisão de células ocorrerá até que todos os canais em uma área sejam usados no grupo de menor potência, ponto no qual o processo de divisão

de células estará completo na região e o sistema inteiro estará reescalado para ter um menor diâmetro por célula.

Para limitar a cobertura de rádio das novas microcélulas formadas, freqüentemente é utilizada a técnica que foca a energia radiada a partir da antena da estação base em direção à terra, denominada *antenna downtilting*. Por meio de tal processo, o padrão de irradiação de uma antena pode ser inclinado para baixo um número específico de graus.

### **Exemplo 8.1.7**

Considere a Figura 8.1.18.1. Assuma que cada estação base utilize 60 canais, independente do tamanho das células.

Se cada célula original tem um raio de 1 km e cada microcélula tem um raio de 0.5 km, encontre o número de canais contidos em uma região de  $(3 \times 3)$  km<sup>2</sup> centrada ao redor do ponto A, de acordo com as seguintes condições:

- a) sem o uso de microcélulas,
- b) quando as microcélulas legendadas são utilizadas (de acordo com Fig. 8.1.18)
- e
- c) se todas as estações base originais são substituídas por microcélulas.

Assuma células na borda do quadrado como sendo contidas dentro do quadrado.

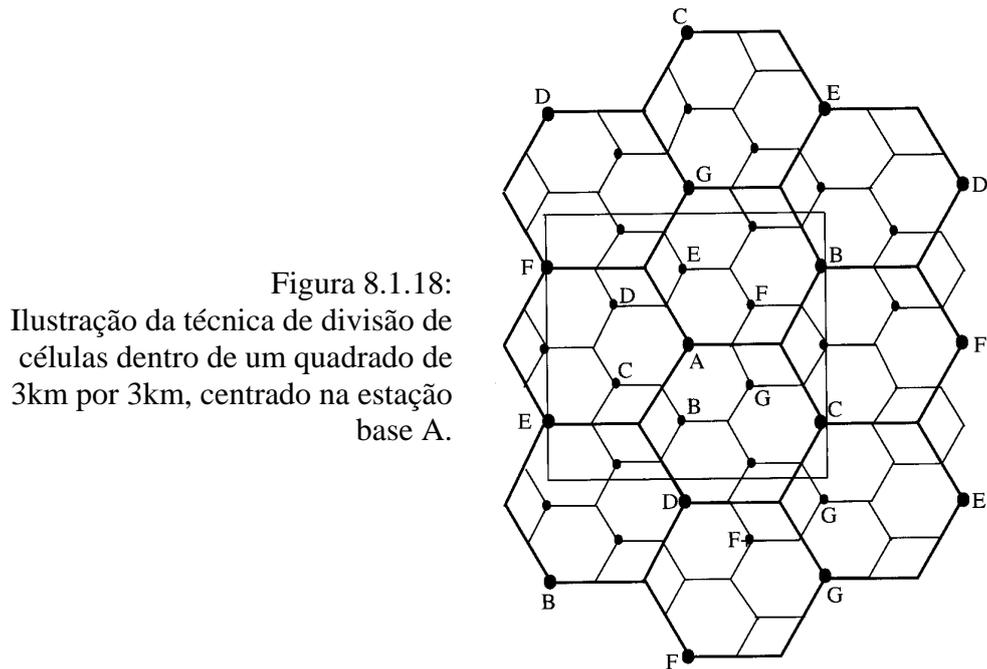


Figura 8.1.18:  
Ilustração da técnica de divisão de células dentro de um quadrado de 3km por 3km, centrado na estação base A.

### **Solução:**

#### **a) Sem o uso de microcélulas:**

Um raio de célula de 1 km implica que os lados dos maiores hexágonos são também de 1 km. Para cobrir o quadrado de 3km  $\times$  3km, centrado na estação base A, precisamos cobrir 1.5km ( $1.5 \times$  o raio do hexágono) à direita, à esquerda, acima e abaixo da estação base A (conforme mostrado na Fig. 8.1.18).

A partir da Figura 8.1.18 vemos também que esta área contém 5 estações base. Desde que cada estação base tem 60 canais, o número total de canais (sem considerar divisão de células) é igual a  $(5 \times 60) = 300$  canais.

#### **b) Com o uso de microcélulas, conforme mostrado na Figura 8.1.18:**

Na Figura 8.1.18, a estação base A é rodeada por 6 microcélulas. Portanto, o nº total de estações base na área quadrada em estudo é igual a  $(5 + 6) = 11$ .

Desde que cada estação base tem 60 canais, o número total de canais será igual a  $(11 \times 60) = 660$  canais.

Resultando em um aumento de 2.2 vezes a capacidade, quando comparado ao caso estudado em (a).

**c) Se todas as estações base são substituídas por microcélulas:**

A partir da Figura 8.1.18, vemos que há um total de  $(5 + 12) = 17$  estações base na região quadrada em estudo.

Desde que cada estação base tem 60 canais, o número total de canais será igual a  $(17 \times 60) = 1020$  canais.

Resultando em um aumento de 8.1.4 vezes a capacidade, se comparado ao caso estudado em (a).

### 8.1.6.2 Setorização (*Sectoring*)

A técnica de divisão de células possibilita uma melhora na capacidade do sistema através de uma mudança de escala no tamanho das células. A introdução de novas células de menor tamanho resulta no aumento do número de canais para uma mesma área de cobertura, através da diminuição do raio da célula ( $R$ ) e da manutenção da razão de reuso co-canal ( $D/R$ ).

Uma outra forma de aumentar a capacidade do sistema, no entanto, é manter o raio da célula inalterado e procurar métodos que possibilitem a diminuição da razão  $D/R$ .

O processo de setorização possibilita aumentar a relação Sinal/Interferência (SIR), de tal forma que o tamanho do *cluster* possa ser reduzido. Por meio da técnica de setorização, a SIR é aumentada através do uso de antenas direcionais e a melhora da capacidade do sistema é obtida através da redução do número de células no *cluster*, processo que permite o aumento do reuso de frequências.

Entretanto, para que esta operação obtenha sucesso, é necessário reduzir a interferência relativa sem diminuir a potência de transmissão.

A interferência co-canal em um sistema celular pode ser diminuída substituindo uma única antena omnidirecional na estação base por várias antenas direcionais, cada uma delas irradiando dentro de um setor específico.

A técnica utilizada para diminuir a interferência co-canal e, conseqüentemente, aumentar o desempenho do sistema através do uso de antenas direcionais é chamada setorização.

Diferentes fatores de setorização podem ser utilizados, resultando em diferentes reduções de interferência co-canal. Uma célula é normalmente particionada em 3 setores de  $120^\circ$  ou em 6 setores de  $60^\circ$ , conforme mostrado nas Figuras 8.1.19 (a) e 8.1.19 (b).

Quando é empregada a técnica de setorização, os canais usados em uma particular célula são "quebrados" em grupos setorizados e são usados somente dentro de um setor particular, conforme mostrado nas Figuras 8.1.19 (a) e 8.1.19 (b).

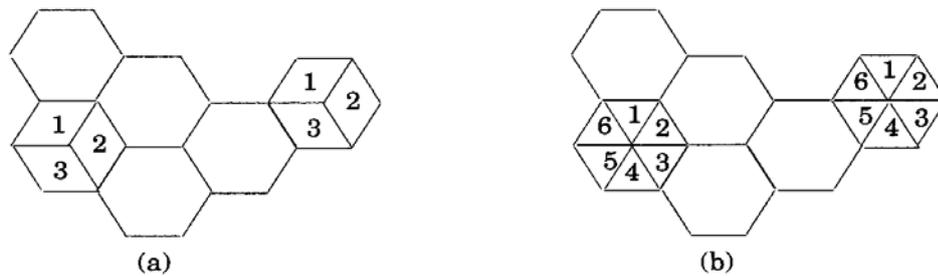


Figura 8.1.19: Ilustração da técnica de setorização para (a) setores de 120° e (b) setores de 60°.

Assumindo um reuso de 7 células, para o caso de setores de 120°, o número de canais interferentes na primeira camada é reduzido de 6 para 2. Isto é devido ao fato de que apenas 2 das 6 células co-canais poderão receber interferência do particular grupo de canais setorizados (considerando-se que a distribuição de canais seja idêntica entre os setores de todas as células, pela geometria criada pela setorização).

Considere a Figura 8.1.20:

- Observe a interferência sofrida por um usuário móvel localizado no setor mais à direita na célula central de número 5.
- Há 3 setores de células co-canais de número 5 à direita da célula central e 3 à esquerda da célula central.
- Destas 6 células co-canal, apenas duas têm antenas com padrões de irradiação que irradiam para dentro da célula central e, então, um usuário móvel na célula central irá sofrer interferência de apenas estes dois setores.

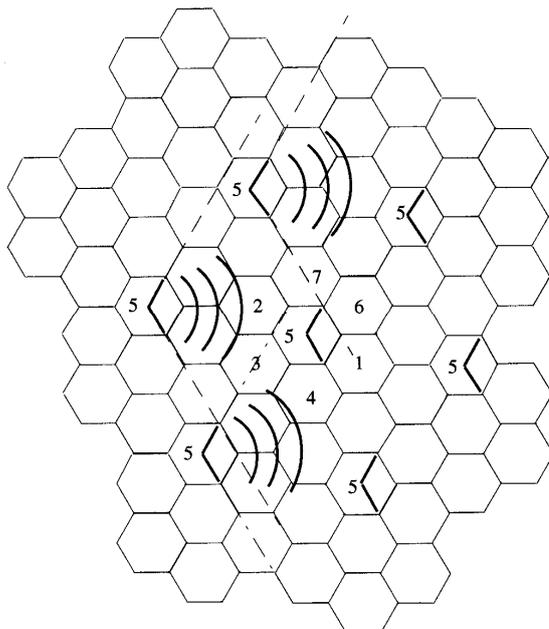


Figura 8.1.20:

Ilustração de como setores de 120° reduzem a interferência de células co-canais.

Observe que apenas duas das células co-canais mais próximas interferem com a célula central enquanto que, se fossem utilizadas antenas omnidirecionais nas estações-base, todas as 6 células co-canais presentes na primeira camada poderiam interferir com a célula central.

A relação sinal interferência resultante para este caso pode ser determinada por

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_0=2} \left(\frac{R}{D}\right)^n} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_0=2} \left(\frac{D}{R}\right)^{-n}} = \frac{1}{2Q^{-n}} = \frac{Q^n}{2} \quad (8.1.44)$$

representando um ganho de 3 em relação ao caso em que é utilizada uma única antena omnidirecional, ou seja, aproximadamente 4.8 dB de ganho na relação S/I.

Para o caso em que uma célula é particionada em 6 setores de 60°, conforme mostrado na Figura 8.1.19 (b), a relação sinal interferência será determinada por

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_0=1} \left(\frac{R}{D}\right)^n} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_0=1} \left(\frac{D}{R}\right)^{-n}} = \frac{1}{Q^{-n}} = Q^n \quad (8.1.45)$$

representando um ganho de 6 em relação ao caso em que é utilizada uma única antena omnidirecional, ou seja, aproximadamente 7.8 dB de ganho na relação S/I.

A melhora na relação sinal interferência permite diminuir o tamanho do *cluster N*, objetivando aumentar o reuso de frequências e, conseqüentemente, a capacidade de usuários do sistema.

A setorização pode ser usada também apenas para reduzir um nível de interferência que esteja acima do aceitável, sem que se altere o valor de *N* (ou seja, sem aumentar a capacidade do sistema).

A melhora na relação sinal interferência e a conseqüente melhora na capacidade do sistema, devidas à diminuição do tamanho do *cluster* levam, no entanto ao aumento no número de antenas em cada estação base e ao decréscimo na eficiência de *trunking*, devido à setorização de canais na estação base (repartição dos canais em setores).

O decréscimo na eficiência de *trunking*, devido à setorização de canais na estação base, pode ser ilustrado da seguinte maneira:

- Considere o sistema analógico AMPS, com 395 canais de voz em uma das bandas (A ou B).
- Usando-se um sistema com tamanho de cluster  $N=7$  e antenas omnidirecionais (sem setorização) teremos  $(395 \text{ canais de voz} / 7 \text{ células}) \cong 56 \text{ canais de voz por célula}$ .

- Através da expressão Erlang B, para um GOS = 2%, o tráfego suportado será de 45.9 Erlangs por célula.
- Se, por outro lado, parte-se para o uso de setorização em 120° (3 setores), teremos  $3 \times 7 = 21$  setores por *cluster*, equivalendo a  $(395 \text{ canais de voz} / 21 \text{ setores}) \cong 19$  canais de voz por setor.
- Através da expressão Erlang B, para um GOS = 2%, o tráfego por setor será de 11.5 Erlangs, equivalendo a 34.5 Erlangs por célula (3 setores por célula).
- Comparando os dois casos, a redução da capacidade de tráfego devida à setorização é de 45.9 Erlangs para 34.5 Erlangs.

Portanto, quando se pensa em setorização para o aumento de capacidade de um sistema, é preciso observar o aumento real de capacidade que será obtido pela redução de  $N$  já que, como discutido nos parágrafos anteriores, a setorização conduz à redução da eficiência de *trunking*, representando perda de capacidade embutida em seu processo.

Ainda, à medida que a setorização reduz a área de cobertura de um particular grupo de canais, o número de operações de *handoffs* requeridas aumenta. No entanto, muitas das estações base permitem que os usuários móveis sejam passados de setor a setor dentro da mesma célula sem a intervenção do CCC, de tal forma que o problema de sobrecarga do CCC, devido a *handoffs* frequentes não constitui uma grande preocupação.

Apesar dos problemas intrínsecos, a utilização de setorização foi o primeiro passo em direção ao aumento da eficiência espectral em sistemas *wireless*. O passo seguinte foi o desenvolvimento do conceito de antenas inteligentes (*smart antennas*).

A aplicação de antenas direcionais e setorização multiplica o uso de canais de rádio, no entanto não elimina os problemas de interferência co-canal. O objetivo de um sistema baseado em antenas inteligentes é aumentar o número de usuários que podem ser servidos por uma única célula, a um dado instante.

Antenas inteligentes são projetadas para lidar com níveis de tráfego variáveis e mudar o ganho visando expandir ou contrair a cobertura em áreas localizadas, sem a necessidade de subir em uma torre ou montar uma outra antena. Os provedores de sistemas *wireless* podem modelar a cobertura de uma célula para ajustar à distribuição particular de tráfego daquela região, ou de acordo com a hora do dia, ou o dia da semana, ou mesmo acomodar um

aumento temporário de tráfego devido, por exemplo, a um evento esportivo a ser realizado em uma determinada região.

De um forma geral, um sistema baseado em antenas inteligentes objetiva aumentar o ganho de acordo com a localização do usuário (formando um lobo em direção ao usuário individual) e rejeitar interferência ou ruído de fora daquele lobo principal.

A mais avançada tecnologia atualmente existente na área de antenas inteligentes é chamada "conjunto de antenas adaptativas" (ou *Adaptive Array Systems*). Tais sistemas utilizam uma variedade de algoritmos de processamento adaptativo para localizar e acompanhar os sinais como, por exemplo, o Algoritmo LMS, Redes Neurais Artificiais, Algoritmos Genéticos, entre outros, visando minimizar dinamicamente a interferência e maximizar a recepção dos sinais efetivamente desejados.

A tecnologia de antenas adaptativas permite atingir níveis superiores de supressão de interferência, tornando possível o reuso mais eficiente de frequências, comparativamente aos padrões de reuso hexagonais utilizados em sistema celulares convencionais. Em essência, a alocação de frequências em um sistema que conta com antenas adaptativas é continuamente adaptada de acordo com a localização da maior parte dos usuários.

Ainda, os sistemas baseados em conjuntos de antenas adaptativas permitem que diferentes setores sejam criados para diferentes usuários, conduzindo a uma alocação de frequências (e canais) em tempo real.

## Referências Bibliográficas

- [1] Rappaport, T. S., *Wireless Communications - Principles and Practice*, Second Edition, Prentice Hall, 2002.
- [2] Yacoub, M., *Celular Communication Systems*, Prentice Hall, 1992.
- [3] Waldman, H. e Yacoub, M. D., *Telecomunicações - Princípios e Tendências*, Editora Érica, 1997.
- [4] Brodsky, I., *Wireless – The Revolutions in Telecommunications*, Artech House, 1995.
- [5] Wong, P. & Britland, D., *Mobile Data Communication Systems*, Artech House, 1995.
- [6] Bedell, P., *Wireless Crash Course*, McGraw-Hill, 2001.
- [7] A. B. Carlson, *Communication Systems*, McGraw-Hill, 1965.
- [8] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2001.
- [9] H. Taub and D.L. Schilling, *Principles of Communications Systems*, McGraw-Hill, 1986.
- [10] Lee, W. C. Y., *Elements of Cellular Mobile Radio Systems*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 38, Número 2, Páginas 69 a 75, Maio de 1989.