

RONALD LUÍS CLARKSON EISNER

**UMA ESTRATÉGIA DE MIGRAÇÃO DE SISTEMAS DE TELEFONIA  
MÓVEL COM TECNOLOGIA AMPS PARA A TECNOLOGIA CDMA**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia.

São Paulo

1997

RONALD LUÍS CLARKSON EISNER

**UMA ESTRATÉGIA DE MIGRAÇÃO DE SISTEMAS DE TELEFONIA  
MÓVEL COM TECNOLOGIA AMPS PARA A TECNOLOGIA CDMA**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:  
Sistemas Eletrônicos

Orientador:  
Paul Jean Etienne Jeszensky

São Paulo  
1997

Eisner, Ronald Luís Clarkson

Uma Estratégia de Migração de Sistemas de Telefonia Móvel com Tecnologia AMPS para a Tecnologia CDMA.

São Paulo, 1997

225 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia Eletrônica - Área de Sistemas Eletrônicos.

1. Telefonia Móvel 2. AMPS 3. CDMA 4. Transição

Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Eletrônica  
- Área de Sistemas Eletrônicos.

Aos meus avós, Amos e Eleanor Clarkson,  
pelos 60 anos de união.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e professor Paul Jean Etienne Jeszensky, por sua disponibilidade, esforço e incentivo.

Ao colega Eng. Leandro Rocha Maciel, pela concessão de recursos e idéias criativas para planejamento de sistemas celulares.

À Lea Singer, pela ordenação dos capítulos, tabelas e expressões e, sobretudo, por sua compreensão.

# ÍNDICE

## LISTA DE ABREVIATURAS

## RESUMO

## ABSTRACT

NOTAÇÃO.....i

FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....vii

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1	MOTIVAÇÃO .....	1
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
<b>2</b>	<b>AMPS</b> .....	5
2.1	INTRODUÇÃO .....	5
2.1.1	Apresentação de sistemas de telefonia móvel celular.....	5
2.1.2	Introdução à tecnologia AMPS.....	8
2.1.3	Ordenação da localização das células .....	9
2.1.4	Planejamento do reuso de canais .....	13
2.1.5	Handoff em sistemas AMPS .....	16
2.1.6	Recepção com diversidade de espaço .....	18
2.2	MODELOS DE PROPAGAÇÃO .....	19
2.2.1	Modelo de propagação de perdas lineares .....	19
2.2.2	Elipsóides de Fresnel e perdas por obstrução .....	29
2.2.3	Modelo de propagação de dois raios.....	36
	2.2.3.1 Medidas de perdas de propagação realizadas em campo.....	36
	2.2.3.2 Um modelo de propagação coerente com as medidas realizadas em campo .....	41
2.3	GEOMETRIA CELULAR HEXAGONAL.....	48
2.3.1	Conceitos básicos.....	48
2.3.2	Cálculo da distância da origem ao centro de células de um anel de ordem $n$ .....	49
2.3.3	Determinação da distância de reuso.....	55
2.3.4	Determinação do número de células em cada cluster, em decorrência de $p$ e $q$ .....	56
2.4	INTERFERÊNCIA COCANAL EM SISTEMAS CELULARES AMPS.....	60
2.4.1	Canal reverso .....	60
2.4.2	Setorização.....	62

2.4.3	Cálculo da relação $C/(I + N_c)$ no canal direto via software.....	64
2.5	TABELAS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS AMPS .....	74
<b>3</b>	<b>CDMA</b> .....	<b>78</b>
3.1	ESPALHAMENTO ESPECTRAL .....	78
3.1.1	Introdução .....	78
3.1.2	Espalhamento tipo DS.....	79
3.1.3	Densidade espectral de potência de um sinal gerado por uma SMC .....	81
3.1.4	Fração da potência de $c(t)$ contida em uma banda restrita.....	86
3.1.5	Robustez de sistemas SS - DS contra sinais interferentes de banda estreita .....	87
3.2	DESCRIÇÃO DE SISTEMAS DE TELEFONIA CELULAR CDMA .....	90
3.2.1	Interferência tipo multiacesso e sua relação com a capacidade.....	91
3.2.2	Geração de canais no IS-95.....	91
3.2.3	Sinalização em sistemas com tecnologia CDMA padrão IS-95.....	96
3.2.3.1	Canais no sentido direto .....	96
3.2.3.2	Canais no sentido reverso.....	102
3.2.4	Recepção com diversidade de fase e <i>soft handoff</i> .....	104
3.2.5	Qualidade do sinal recebido.....	105
3.2.6	Controle dinâmico de potência em sistemas CDMA .....	106
3.2.6.1	Controle dinâmico de potência do canal reverso.....	106
3.2.6.2	Controle dinâmico de potência do canal direto .....	109
3.3	CAPACIDADE .....	110
3.3.1	Uma estimativa do número máximo de chamadas simultâneas por célula em sistemas CDMA.....	110
3.3.2	Listas de canais piloto em uma estação móvel .....	114
3.3.2.1	Parâmetro T_ADD.....	115
3.3.2.2	Parâmetros T_DROP e T_TDROP.....	117
3.3.3	Impacto do soft handoff sobre o número de canais de tráfego em uso.....	119
3.3.3.1	Cálculo da relação $E_c/I_0$ no canal piloto.....	119
3.3.3.2	Aumento do número de canais em uso devido a soft handoff .....	124
3.3.3.3	Cálculo do ganho de setorização.....	127
<b>4</b>	<b>TRANSIÇÃO</b> .....	<b>130</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	130
4.1.1	Evitando interferências .....	130
4.1.2	Três estratégias de migração.....	133
4.2	INTERFERÊNCIA DO TRANSMISSOR DE UMA ERB CDMA NO RECEPTOR DE UMA ESTAÇÃO MÓVEL AMPS .....	140
4.3	TABELAS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS AMPS COM CANAIS DE RÁDIO CDMA SUPERPOSTOS.....	145
4.4	ABORDAGEM DE K. I. KIM.....	156
4.4.1	Definição do fator de eficiência do reuso de frequências.....	158
4.4.2	Determinação da potência de interferência de uma célula CDMA no sentido reverso .....	159
4.4.3	Cálculo da potência de interferência no receptor de uma ERB CDMA, proveniente de estações móveis que estão em <u>outras</u> células .....	164
4.4.4	Cálculo do fator de eficiência do reuso de frequências .....	164
4.4.5	Cálculo da degradação da relação portadora/interferência no	

	receptor de uma ERB AMPS omnidirecional a uma distância conhecida em relação a uma célula CDMA interferente .....	166
4.4.6	Cálculo da degradação da relação portadora/interferência no receptor de uma ERB AMPS omnidirecional a uma distância conhecida em relação a um cluster de células CDMA interferentes .....	170
4.5	ANÁLISE DE INTERFERÊNCIAS DE ERBs CDMA EM ESTAÇÕES MÓVEIS AMPS .....	180
4.6	NÚMERO DE ASSINANTES EM CADA ETAPA DE MIGRAÇÃO.....	201
4.7	CONCLUSÕES .....	211
<b>ANEXO A</b> .....		213
<b>ANEXO B</b> .....		217
<b>ANEXO C</b> .....		219
<b>ANEXO D</b> .....		221
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....		223
<b>BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA</b> .....		225

## LISTA DE ABREVIATURAS

AMPS	<i>Advanced Mobile Phone Service</i>
bps	bits por segundo
CCC	Central de Comutação e Controle
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CE4	<i>Cellular Engineering-4</i>
DEP	Densidade Espectral de Potência
DS	<i>Direct Sequence</i>
DTMF	<i>Dual-Tone Multifrequency</i>
EIA	<i>Electronic Industry Association</i>
ERB	Estação Rádio Base
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
ERP	<i>Effective Radiated Power</i>
FCC	<i>Federal Commission of Communications</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FH	<i>Frequency Hopping</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HMM	Hora de Maior Movimento
IS	<i>Interim Standard</i>
MAHO	<i>Mobile Assisted Handoff</i>
PN	<i>Pseudo-Noise</i>
SMC	Seqüência de Máximo Comprimento
SSD	<i>Shared Secret Data</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TH	<i>Time Hopping</i>
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
UTC	Em Francês: <i>Universal Temps Coordiné</i> ; em Inglês: <i>Universal Coordinated Time</i>

## RESUMO

Esta dissertação estuda uma estratégia para a transição de um sistema de telefonia móvel com tecnologia FDMA para a tecnologia CDMA, no que se refere à interferência entre ambos os sistemas e aumento da capacidade de atendimento de assinantes.

## ABSTRACT

This dissertation studies a strategy for the transition of a mobile telephone system with FDMA technology to CDMA in terms of interference between both systems and increase of the subscriber capacity.

## NOTAÇÃO

### i.1 Funções discretas e funções contínuas

As funções discretas terão seus argumentos sempre entre colchetes. O argumento de uma função discreta é um número inteiro que pode ser positivo ou negativo. As funções contínuas podem ter o argumento entre parênteses, colchetes ou chaves (evidentemente, o argumento de uma função contínua pode ser inteiro ou não).

### i.2 Correlação entre funções contínuas

A correlação cruzada entre duas funções contínuas no tempo  $f(t)$  e  $g(t)$  será representada por:

$$R_{fg}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t)g(\tau + t) dt \right)$$

A autocorrelação de  $f(t)$  será representada por:

$$R_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t)f(\tau + t) dt \right)$$

Se  $f(t)$  e  $g(t)$  forem periódicas, de mesmo período  $T_0$ , a correlação cruzada entre estas funções pode ser escrita como:

$$R_{fg}(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{+T_0/2} f(t)g(\tau + t) dt = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f(t)g(\tau + t) dt$$

### i.3 Correlação entre funções discretas

A correlação cruzada entre duas funções discretas  $f[k]$  e  $g[k]$  será representada por:

$$R_{fg}[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m]g[m+k]$$

A autocorrelação de  $f[k]$  será representada por:

$$R_f[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m]f[m+k]$$

Se  $f[k]$  e  $g[k]$  forem periódicas, de mesmo período  $L$ , a correlação cruzada entre estas funções será escrita como:

$$R_{fg}[k] = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} f[m]g[m+k]$$

#### **i.4 Ganho em dBd $\times$ dBi**

O ganho de uma antena em relação a uma antena isotrópica é expresso em dBi; o ganho de uma antena em relação a um dipolo de meio comprimento de onda é expresso em dBd. A relação entre estes dois ganhos é dada por:  $0 \text{ dBd} \cong 2,15 \text{ dBi}$  (KRAUS, 1950).

#### **i.5 ERP $\times$ EIRP**

O termo "ERP" expressa a potência efetivamente irradiada por um elemento transmissor, i.e., potência em dBm mais ganho da antena transmissora em relação a um dipolo de meio comprimento de onda (em dBd).

O termo "EIRP" expressa a potência efetivamente irradiada por um elemento transmissor, i.e., potência em dBm mais ganho da antena transmissora em relação a uma antena isotrópica (em dBi).

Nas definições de ERP e EIRP estão sendo desprezadas as perdas em cabos, conectores, divisores, combinadores, filtros, etc. no circuito de transmissão.

## **i.6 Transformada de Fourier**

A Transformada de Fourier de uma função  $s(t)$  contínua no tempo será representada por

$TF\{s(t)\}$  :

$$TF\{s(t)\} = S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left( \int_{-T}^T s(t) e^{-j2\pi ft} dt \right)$$

## **i.7 "Delta de Dirac" ou "impulso unitário"**

Suas propriedades mais importantes são descritas por ORSINI, 1986:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta(t) = 0 \text{ para } t \neq 0 \\ \int_{-t_1}^{t_2} \delta(t) dt = 1 \text{ para } t_1, t_2 > 0 \end{array} \right.$$

**i.8 Função discreta "impulso unitário"  $\delta[k]$**

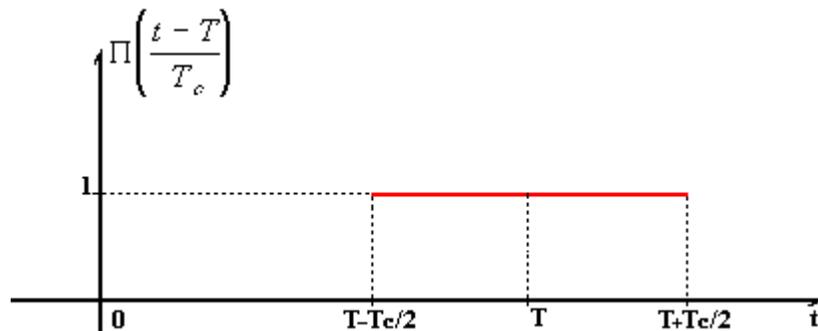
$$\begin{cases} \delta[k] = 0 & \text{para } k \neq 0 \\ \delta[0] = 1 \end{cases}$$

**i.9 Função "sinc"**

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

**i.10 Pulso retangular de amplitude unitária e área igual a  $T_c$ , centrado em  $t = T$**

Será representado por  $\Pi\left(\frac{t-T}{T_c}\right)$ , e é ilustrado na Fig. i.1:



**Figura i.1 Pulso retangular de amplitude unitária e área igual a  $T_c$ , centrado no instante de tempo  $T$ .**

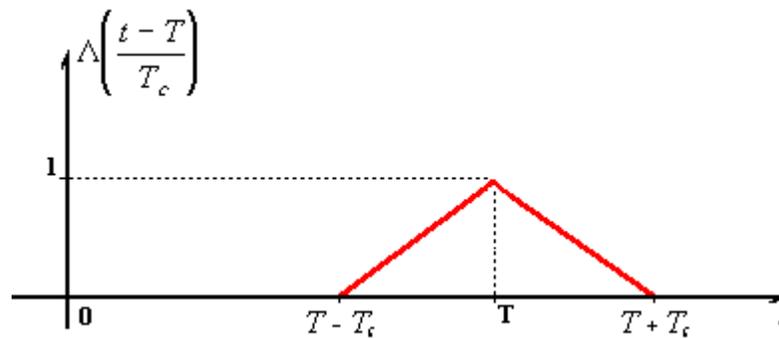
A Transformada de Fourier de um pulso retangular de largura  $T_c$  é:

$$TF \left\{ \Pi \left( \frac{t}{T_c} \right) \right\} = T_c \operatorname{sinc}(fT_c) \quad (\text{i.1})$$

**i.11 Pulso triangular de amplitude unitária centrado em  $t = T$ , de área igual a  $T_c$**

É ilustrado na Fig. i.2 e pode ser definido como:

$$\Lambda \left( \frac{t-T}{T_c} \right) = \begin{cases} 1 - \frac{|t-T|}{T_c} & \text{para } |t-T| \leq T_c \\ 0 & \text{c. c.} \end{cases} \quad (\text{i.2})$$



**Figura i.2 Pulso triangular de amplitude unitária centrado em  $T$ , de área igual a  $T_c$ .**

$$TF \left\{ \Lambda \left( \frac{t}{T_c} \right) \right\} = T_c \operatorname{sinc}^2(fT_c) \quad (\text{i.3})$$

**i.12 Relação entre pulso retangular e pulso triangular**

A função de autocorrelação de um pulso retangular é expressa por:

$$R_{\pi}(\tau) = \lim(T \rightarrow \infty) \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} \Pi\left(\frac{t}{T_c}\right) \Pi\left(\frac{\tau+t}{T_c}\right) dt$$

$$R_{\pi}(\tau) = T_c \times \Lambda\left(\frac{\tau}{T_c}\right) \quad (i.4)$$

### i.13 Potência de ruído térmico em um receptor (LEE, 1995)

A densidade espectral potência de ruído térmico em uma temperatura  $\mathbb{T}$  (dada em graus Kelvin) é calculada por:

$$n_t = \mathbb{K}\mathbb{T}$$

Onde  $\mathbb{K}$  = Constante de Boltzmann =  $1,37 \times 10^{-23}$  Joules/grau Kelvin e a temperatura  $\mathbb{T}$  é dada na escala Kelvin.

Adotando  $\mathbb{T} = 290$  Kelvin, vem:

$$n_t = \mathbb{K}\mathbb{T} \approx 4 \times 10^{-18} \text{ mW/Hz} \text{ ou } -174 \text{ dBm/Hz}$$

Seja  $\mathbb{F}$  a figura de ruído total de um receptor em uma banda de largura  $\mathbb{B}$ . Então, a potência total do ruído térmico (ou "ruído de fundo") deste receptor é calculada por:

$$N_t = \mathbb{K}\mathbb{T}\mathbb{B}\mathbb{F}$$

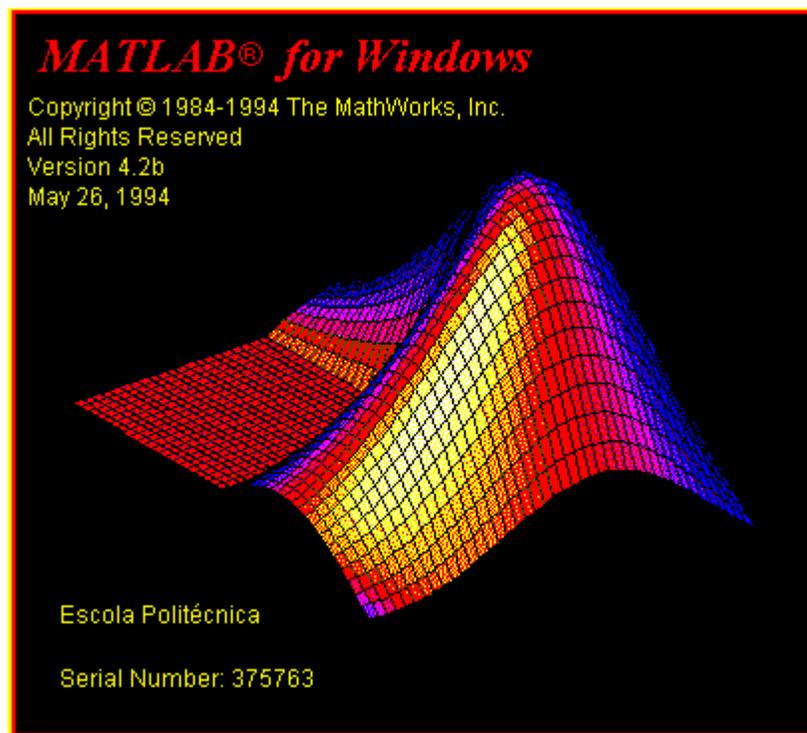
Adotando  $\mathbb{F} = 8$  dB, obtêm-se:

$$\mathbb{B} = 30 \text{ kHz} \Rightarrow N_t = 7,56 \times 10^{-13} \text{ mW ou } -121,2 \text{ dBm}$$

$$\mathbb{B} = 1,23 \text{ MHz} \Rightarrow N_t = 3,10 \times 10^{-11} \text{ mW ou } -105,1 \text{ dBm}$$

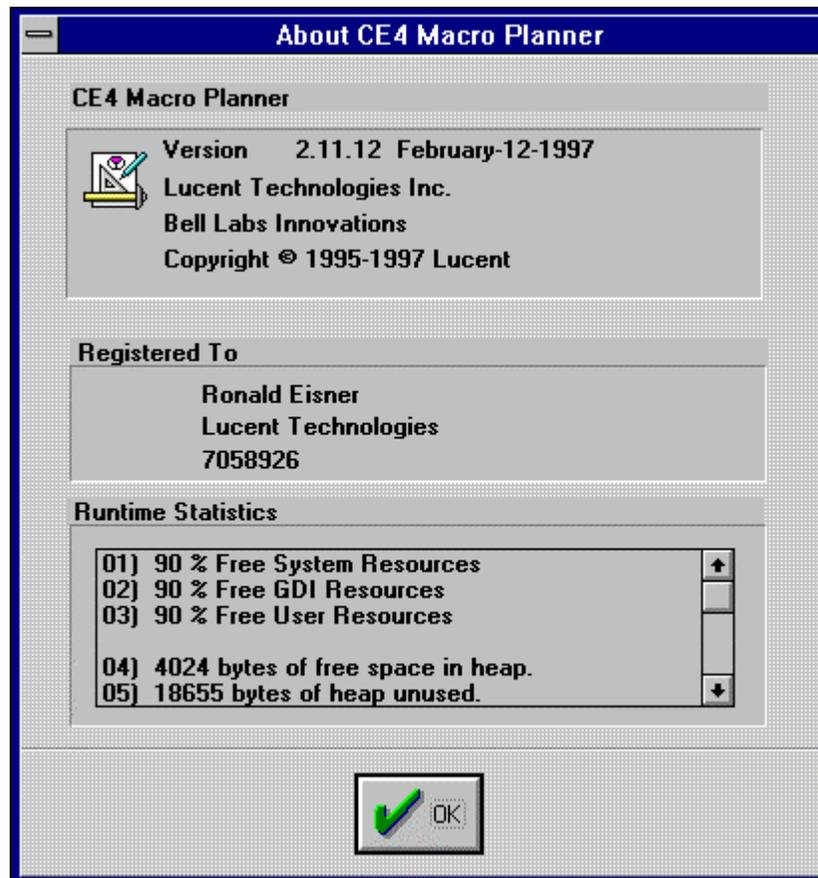
## FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Para a geração de gráficos e realização de cálculos, foi utilizado o software *Matlab for Windows*.



**Figura i.3** Software *Matlab for Windows*.

Para a predição de áreas de cobertura em sistemas celulares AMPS e CDMA, foi utilizado o software CE4, cuja licença de uso foi concedida pelo *Bell Laboratories* para a realização deste trabalho.



**Figura i.4** Software CE4, utilizado para a predição de áreas de cobertura em sistemas celulares.

# INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O jornal FINANCIAL TIMES MOBILE COMMUNICATIONS publicou na edição de 14 de novembro de 1996 um levantamento do número de assinantes de telefonia celular. Em julho de 1995, havia 67,8 milhões de assinantes no mundo, afora os países da Europa. Em abril de 1996, eram 100 milhões e em julho de 1996 esse número chegou a 108,8 milhões.

Segundo o mesmo jornal, o número de assinantes no Brasil em julho/95 era 791,2 mil e passou para 1,95 milhões em julho/96, apresentando a maior taxa de crescimento do mundo naquele período (146,57 %), estando o Japão em segundo lugar (135,83 %) e a China em terceiro (111,2 %).

O ESTADO DE SÃO PAULO informou na edição de 13 de abril de 1997 uma estimativa do número de assinantes de telefonia móvel das companhias telefônicas do Sistema Telebrás de 2,3 milhões na data de publicação. Segundo estudos sobre o mercado brasileiro feitos pelo

instituto norte-americano de pesquisa Pyramid Research, o Brasil terá 13 milhões de usuários de telefones celulares no ano 2000 e 16,1 milhões no ano 2001.

Sistemas de telefonia celular em grande parte do mundo, inclusive no Brasil, empregam a tecnologia AMPS. Os sistemas celulares AMPS utilizam tecnologia de acesso FDMA analógica.

Considerando a necessidade de sistemas celulares com capacidade de atender um número cada vez maior de assinantes na mesma faixa disponível, o objetivo deste trabalho é estudar a introdução de tecnologia CDMA, que é digital e permite o acesso de um número maior de estações móveis que o sistema AMPS, em uma mesma banda.

## **1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre sistemas de telefonia móvel e seus elementos: telefones celulares, células, ERBs e CCCs. São apresentados conceitos fundamentais sobre sistemas celulares que utilizam a tecnologia AMPS. Alguns dos conceitos apresentados são: canal direto e reverso, diversidade de recepção, transferência de chamadas (*handoff*), reutilização dos mesmos canais em todo o sistema, interferências cocanal, setorização, relação de potências entre portadora e interferência cocanal, cujo valor mínimo é uma condição de projeto de sistemas celulares. O Capítulo 2 descreve ainda o modelo de propagação de perdas lineares (LEE, 1993, 1995), que é utilizado pela ferramenta de predição CE4, utilizada neste trabalho para calcular níveis de potência de sinal em vários pontos de uma área de atendimento. Há ainda uma descrição do modelo de propagação de dois raios (XIA et al., 1993), que apesar de não ser aplicado diretamente no cálculo de níveis de potência em outros capítulos, é

importante para o planejamento de sistemas celulares, onde uma preocupação muito importante é administrar interferências entre canais em reuso. Outros modelos de propagação, tais como Okumura e Hata, não serão utilizados neste trabalho. Uma descrição dos modelos de Okumura e Hata pode ser encontrada na referência YACOUB (1993). Desenvolve-se também um estudo sobre geometria hexagonal, que é muito utilizada no planejamento da implantação e crescimento ordenado de sistemas celulares.

O Capítulo 3 apresenta conceitos sobre comunicação por espalhamento espectral, que utiliza banda mais larga que a mínima necessária para a transmissão de um sinal, explicando a forma como o espectro de um sinal de banda originalmente mais estreita é codificado e espalhado, sua forma de recuperação, sua função densidade espectral de potência e sua robustez a interferências de sinais alheios. Em seguida, no Capítulo 3 mostra-se como a tecnologia de comunicação em banda larga se aplica a sistemas de telefonia móvel, introduzindo a tecnologia CDMA. Alguns dos tópicos apresentados são: sinalização entre ERB e estação móvel, recepção com diversidade de fase e compromisso entre o número de assinantes e níveis de interferência. Muitos dos conceitos descritos para sistemas celulares AMPS são também aplicáveis a sistemas CDMA. Por exemplo, os modelos de propagação apresentados e o planejamento com base em uma grade hexagonal. No Capítulo 3 há uma descrição dos principais fatores que influem na capacidade de sistemas CDMA, entre os quais a setorização com suas imperfeições, ganho de processamento, atividade vocal, eficiência do reuso e as imperfeições do controle dinâmico de potência. Explica-se também a diferença entre o número de canais de tráfego e o número de chamadas simultâneas. Em função das imperfeições do sistema, o número de chamadas simultâneas por setor adotado no decorrer do Capítulo 4 será um número utilizado em alguns sistemas reais.

O Capítulo 4 trata da migração de um sistema AMPS para CDMA. Após a introdução dos termos "banda de guarda" e "região de guarda" como recursos para evitar interferências entre os sistemas, são descritas três alternativas de transição entre tecnologias, apresenta-se uma expressão para o cálculo do nível de interferência do transmissor de uma ERB CDMA no receptor de uma estação móvel AMPS; na abordagem de KIM (1993), define-se o "fator de eficiência de reuso" para sistemas celulares e apresenta-se uma expressão para o cálculo da interferência de estações móveis CDMA em ERBs AMPS com base em diversas hipóteses simplificadoras. Em seguida, apresenta-se um cenário um pouco mais realista de convívio entre células AMPS e CDMA, com níveis de sinal e de interferência calculados pelo software de predição em todos os pontos do sistema. Calcula-se então o número de assinantes atendidos antes e depois da introdução da tecnologia CDMA e durante várias etapas de transição.

# AMPS

## 2.1 INTRODUÇÃO

### 2.1.1 Apresentação de sistemas de telefonia móvel celular

Um sistema celular oferece acesso móvel aos assinantes cadastrados dentro de uma determinada área de atendimento. Neste trabalho, serão estudados sistemas de telefonia móvel operando na faixa de 824 a 849 MHz e 869 a 894 MHz. Cada telefone móvel de assinante é também denominado "estação móvel" ou "terminal de assinante".

O espectro disponível para operação do serviço móvel celular é dividido em faixas correspondentes a canais. Ao invés de transmitir todos os canais disponíveis a partir de um ponto, com potência e altura suficientes para abranger toda a área de atendimento, a operadora que oferece o serviço de telefonia móvel pode dividir a área de atendimento em regiões menores, denominadas "células", transmitindo um conjunto de canais em cada célula. Assim, um mesmo conjunto de canais pode ser reutilizado em diversas células de modo a aumentar a capacidade do sistema, fazendo melhor proveito da faixa de frequência disponível.

Células distintas que utilizam os mesmos canais são denominadas "células cocanais" ou "cocélulas". Estas devem estar geograficamente separadas de modo a controlar o nível de interferência entre conexões que utilizem o mesmo canal. Este tipo de interferência é denominado "interferência cocanal".

Cada estação que transmite o conjunto de canais de uma célula é denominada ERB. Uma ERB pode servir chamadas de vários telefones móveis. Quando um terminal de assinante se move de uma célula (A) para outra (B) durante uma conexão, sua chamada é transferida da ERB (A) para (B), passando a utilizar um canal da ERB (B). Este processo de transferência sem interromper a conexão é denominado *handoff* e deveria, idealmente, ser imperceptível para o usuário.

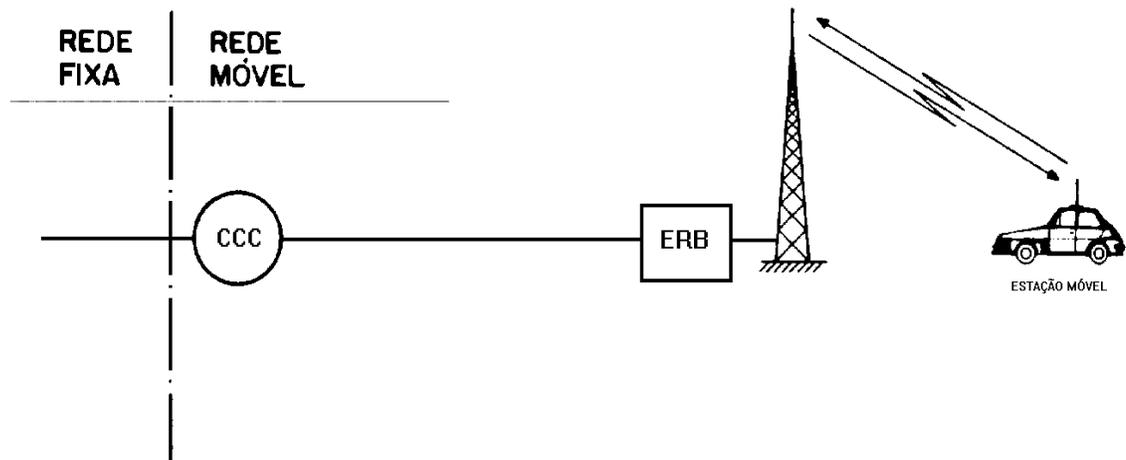
Devido à heterogeneidade das condições de propagação e outras características inerentes a sistemas celulares, não é possível definir precisamente os limites de cada célula de forma que, por um lado, as estações móveis situadas fora destes limites nunca possam ser conectadas à ERB, e por outro, as estações móveis dentro destes limites sempre possam ser conectadas à mesma. Assim, pode-se afirmar que a ERB que transmite o conjunto de canais de uma célula é aquela que tem maior probabilidade de atender as chamadas das estações móveis que estão dentro daquela célula e é denominada "melhor servidora" daquela região.

Uma ERB pode transmitir um conjunto de canais através de uma única antena omnidirecional. Neste caso, ela é denominada "omnidirecional". Alternativamente, os canais transmitidos por uma ERB podem ser divididos em subconjuntos, sendo cada um deles transmitido através de uma antena diretiva. Neste caso, cada antena tem uma orientação diferente, de modo que a célula fica dividida em setores. ERBs deste tipo são denominadas "setorizadas".

As células também são denominadas omnidirecionais ou setorizadas. O processo de transferência da chamada de uma estação móvel de um setor para outro dentro de uma célula setorizada também é denominado handoff.

Todas as ERBs de um sistema celular são interligadas a uma unidade central, denominada CCC. As principais funções da CCC são comutação de chamadas, interface com a rede de telefonia fixa e tarifação de assinantes.

Uma estação móvel pode comunicar-se com um telefone fixo através de uma ERB, passando pela CCC e pela rede fixa, como ilustrado na Fig. 2.1. Uma conexão entre dois telefones móveis em uma mesma área de serviço celular utiliza a CCC sem passar pela rede fixa. Uma área de serviço pode ser atendida também por duas ou mais CCCs interligadas.



**Figura 2.1** Visão geral de um sistema de telefonia móvel. Fonte: FERRARI, A. M., "Telecomunicações: Evolução & Revolução", Ed. Érica, 1991.

Na maioria dos sistemas celulares atuais, os assinantes cadastrados para serem atendidos na área de uma operadora podem ser registrados em áreas de atendimento de outras operadoras, sendo neste caso denominados "assinantes visitantes".

### 2.1.2 Introdução à tecnologia AMPS

AMPS é uma tecnologia para sistemas celulares que utiliza modulação tipo FM. O acesso a canal é dividido por faixas de frequências (FDMA), ou seja, cada canal de usuário corresponde a uma faixa de frequências. Os canais do sistema AMPS são bidirecionais e a separação entre canais consecutivos é 30 kHz. As faixas utilizadas em sistemas AMPS são de 824 a 849 e de 869 a 894 MHz. Os canais são numerados de 1 a 1023, como mostra a Tabela 2.1, não existindo os canais numerados de 800 a 990. Cada canal é composto por duas bandas separadas por 45 MHz:

- Uma para transmissão de sinais no sentido da ERB para a estação móvel, denominada "**sentido direto do canal**" ou simplesmente "canal direto";
- Outra para transmissão de sinais no sentido da estação móvel para a ERB, denominada "**sentido reverso do canal**" ou simplesmente "canal reverso".

A FCC - órgão federal regulamentador de telecomunicações nos Estados Unidos - separou os canais do serviço móvel celular padrão AMPS em dois blocos: A e B, para promover a competição entre duas operadoras distintas em cada área de serviço. Esta mesma decisão foi também adotada no Brasil.

O "bloco A expandido" resulta de uma extensão do bloco A original, acrescentando-se as faixas A' e A". Da mesma forma, o "bloco B expandido" resulta de uma extensão do bloco B original, acrescentando-se a faixa B'. **Neste trabalho, serão utilizados os blocos expandidos.**

Na Tabela 2.1, encontram-se as expressões que relacionam o número de canal com sua frequência central no sentido direto e reverso. São listadas também as frequências centrais de canais que estão nas extremidades das faixas A'', A, B, A' e B'. A notação utilizada é:

$c$ : número do canal, de 1 a 1023.

$f_r(c)$ : frequência central do canal  $c$  no sentido reverso, em kHz.

$f_d(c)$ : frequência central do canal  $c$  no sentido direto, em kHz.  $f_d(c) = f_r(c) + 45.000\text{kHz}$

**Tabela 2.1** Frequência central de canais AMPS nas extremidades das faixas A'', A, B, A' e B'. Expressão para  $f_r(c)$  em cada faixa. Não existem os canais numerados de 800 a 990.

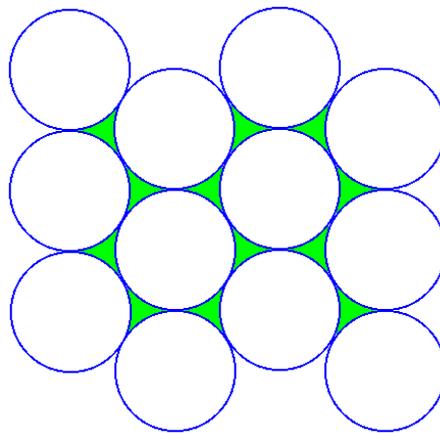
Faixa	Expressão para $f_r(c)$ (kHz)	$c$	$f_r(c)$ (kHz)	$f_d(c)$ (kHz)
A''	$f_r(c) = 825.000 - 30(1023 - c)$	991	824.040	869.040
		1023	825.000	870.000
A	$f_r(n) = 825.000 + 30c$	1	825.030	870.030
		333	834.990	879.990
B	$f_r(n) = 825.000 + 30c$	334	835.020	880.020
		666	844.980	889.980
A'	$f_r(n) = 825.000 + 30c$	667	845.010	890.010
		716	846.480	891.480
B'	$f_r(n) = 825.000 + 30c$	717	846.510	891.510
		799	848.970	893.970

Cada bloco expandido, A e B, é composto de 395 canais de voz e 21 canais de controle. Estes são numerados de 313 a 333 no bloco A e de 334 a 354 no bloco B. Os canais de controle são utilizados para estabelecimento de chamadas, tanto no acesso de uma estação móvel ao sistema como para busca de uma estação móvel que está recebendo uma ligação. Os canais de controle nunca são utilizados para a transmissão de voz.

### 2.1.3 Ordenação da localização das células (MACDONALD, 1979)

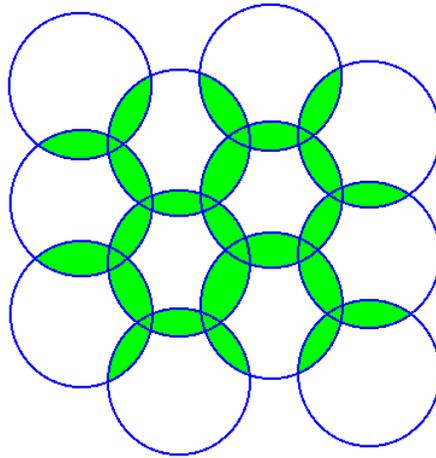
A representação de todas as células com o mesmo formato em um plano facilita a visualização e elaboração do *layout* inicial de um sistema celular. A localização ordenada das células de um sistema móvel celular facilita o planejamento da introdução de novas ERBs em expansões futuras.

Na Fig. 2.2, as células de um sistema estão ordenadas em um plano e representadas por circunferências, todas de mesmo raio. As áreas que estão fora das circunferências estão hachuradas. Estas não podem ser definidas como pertencentes a uma célula ou outra.



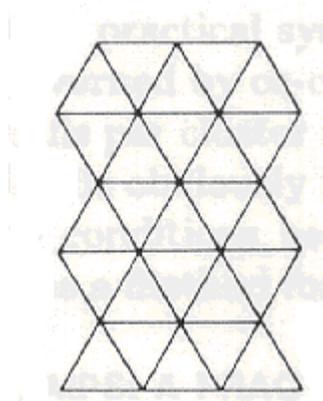
**Figura 2.2** Representação de um sistema celular em um plano. Cada circunferência representa uma célula. As áreas que estão fora das circunferências estão hachuradas.

A Fig. 2.3 mostra uma tentativa de eliminar as áreas que não podem ser definidas como integrantes de uma célula ou outra, aproximando os centros das circunferências. Conseqüentemente, surgiram áreas de intersecção entre células, que também não podem ser definidas como pertencentes a uma célula ou outra, e que estão hachuradas.

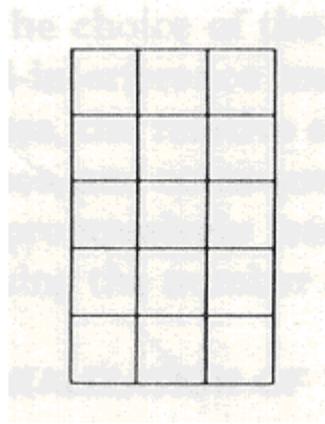


**Figura 2.3** Representação de um sistema celular em um plano. Cada circunferência representa uma célula. As áreas de intersecção entre circunferências adjacentes estão hachuradas.

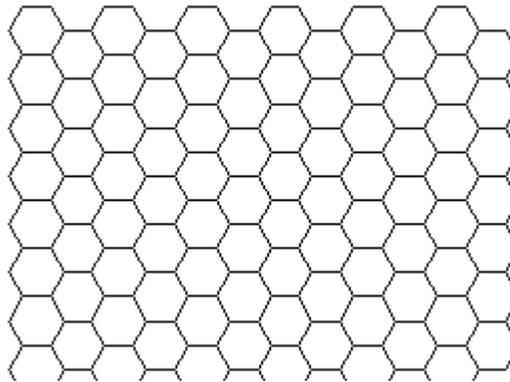
Para resolver esta ambigüidade, as células podem ser representadas por polígonos que se encaixam perfeitamente, formando "grades". Triângulos, quadriláteros e hexágonos regulares são polígonos que se encaixam perfeitamente, como ilustrado nas Figs. 2.4, 2.5 e 2.6.



**Figura 2.4** Grade formada por triângulos equiláteros congruentes entre si.



**Figura 2.5** Grade formada por quadrados congruentes entre si.



**Figura 2.6** Grade formada por hexágonos regulares congruentes entre si.

Pode-se planejar a localização de cada ERB no centro ou no vértice de um polígono. Neste trabalho, será adotado como localização o centro deste, e por enquanto não serão consideradas obstruções de visada entre a ERB e as estações móveis devidas a irregularidades do terreno, construções, curvatura terrestre ou outros. Como os pontos mais distantes do centro de um polígono regular são seus vértices, estes representam o pior caso para a propagação de sinais entre as estações móveis e a ERB, que está no centro. Para assegurar boas condições de propagação de sinais entre ERB e estação móvel, é necessário restringir a distância do centro ao vértice das células.

Comparando-se então um triângulo, um quadrado e um hexágono de mesma distância do centro ao vértice (considerada satisfatória), o polígono de maior área é o hexágono. Portanto, uma grade hexagonal permite dar cobertura a uma área de serviço utilizando o menor número de células em relação às grades formadas por triângulos ou quadrados. O uso de um número menor de células reduz o valor do investimento em equipamentos e infra-estrutura.

Em um sistema celular real, as posições das ERBs implantadas não seguem exatamente a estrutura hexagonal planejada, em virtude de indisponibilidade de terrenos ou outras razões práticas. Em função de imperfeições de sistemas celulares, existem regiões sem cobertura, denominadas "áreas de sombra", que são normalmente indesejáveis. Os handoffs ocorrem nas regiões de superposição entre células adjacentes. Por isso, um sistema celular deve ser planejado de modo a assegurar que haja esta superposição.

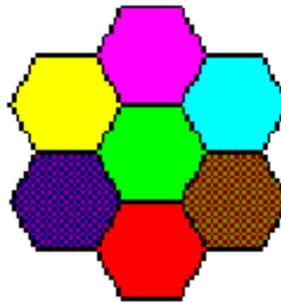
#### **2.1.4 Planejamento do reuso de canais**

O planejamento do reuso de canais (ou "planejamento de frequências") tem como objetivo controlar as interferências cocanais e também entre canais adjacentes, uma vez que a tecnologia celular tem como princípio reutilizar os mesmos canais em toda a área de atendimento.

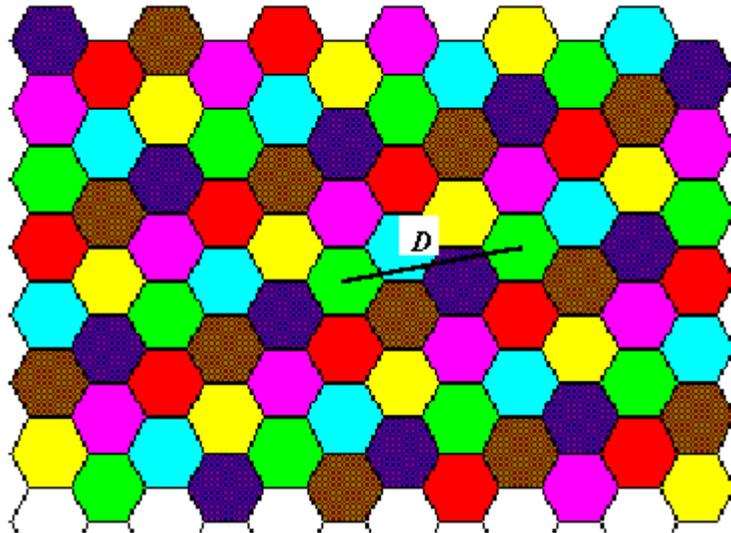
Este planejamento consiste na partição da área de serviço em aglomerados com o mesmo formato e o mesmo número de células. Estes aglomerados são denominados *clusters*. O número máximo de canais de um cluster é o número de canais disponíveis (em sistemas AMPS, há 395 canais de voz em cada bloco, A e B expandido). Seja  $K$  o número de células em cada cluster. Para cada célula é alocada uma fração  $1/K$  do número de canais de um cluster. Um conjunto de canais alocado para uma célula é denominado em Inglês *channel set*.

O cluster é a estrutura básica de um sistema celular, que se repete em toda a rede. A alocação de canais para cada célula de um cluster também se repete em toda a rede, de modo a ordenar a reutilização dos canais disponíveis, como ilustrado nas Figs. 2.7 e 2.8. O fator  $K$  é denominado "**padrão de reuso de canais**".

As células cocanais de uma rede celular são equidistantes. A distância entre duas células cocanais, como ilustrado na Fig. 2.8, é denominada "distância de reuso". Quanto maior for o número de células em cada cluster ( $K$ ), maior será a distância de reuso.



**Figura 2.7** Um cluster formado por 7 células.



**Figura 2.8** Rede celular formada por repetição do padrão ilustrado na Fig. 2.7. Cada cluster possui 7 células. Portanto, o padrão de reuso é  $K = 7$ . Neste caso, cada conjunto de canais possui 56 ou 57 canais, pois  $395 \div 7 = 56,4$ . A distância de reuso é representada por  $D$ .

O aumento da distância de reuso reduz o nível de interferência cocanal. Em contrapartida, a divisão dos 395 canais disponíveis entre um número maior de células reduz a eficiência de entroncamento do sistema<sup>1</sup>.

Para o canal direto, definem-se:

$C$ : intensidade da portadora desejada no receptor de uma estação móvel.

$I$ : nível de interferência no receptor da mesma estação móvel, proveniente de outras ERBs cocanais.

As mesmas definições valem, analogamente, para o canal reverso.

<sup>1</sup> O conceito de eficiência de entroncamento pode ser encontrado nas referências YACOUB (1993) e RAPPAPORT (1996).

Um parâmetro indicador da performance de um sistema celular é a relação  $C/I$ . Uma meta operacional tipicamente adotada em sistemas celulares é  $C/I \geq 18$  dB (LEE, 1995). No Item 2.4, será mostrada uma relação entre a distância de reuso e o nível de interferência cocanal.

### **2.1.5 Handoff em sistemas AMPS**

Handoff é o nome que se dá ao processo de transferência da chamada de uma estação móvel de uma célula para outra, ou de um setor para outro dentro da mesma célula. Considerando-se um sistema com ERBs omnidirecionais, seja  $C_i$  a potência recebida por uma ERB em um canal no sentido reverso, da estação móvel  $i$ . Uma das funções das ERBs em um sistema celular é medir periodicamente o valor de  $C_i$  para cada conexão.

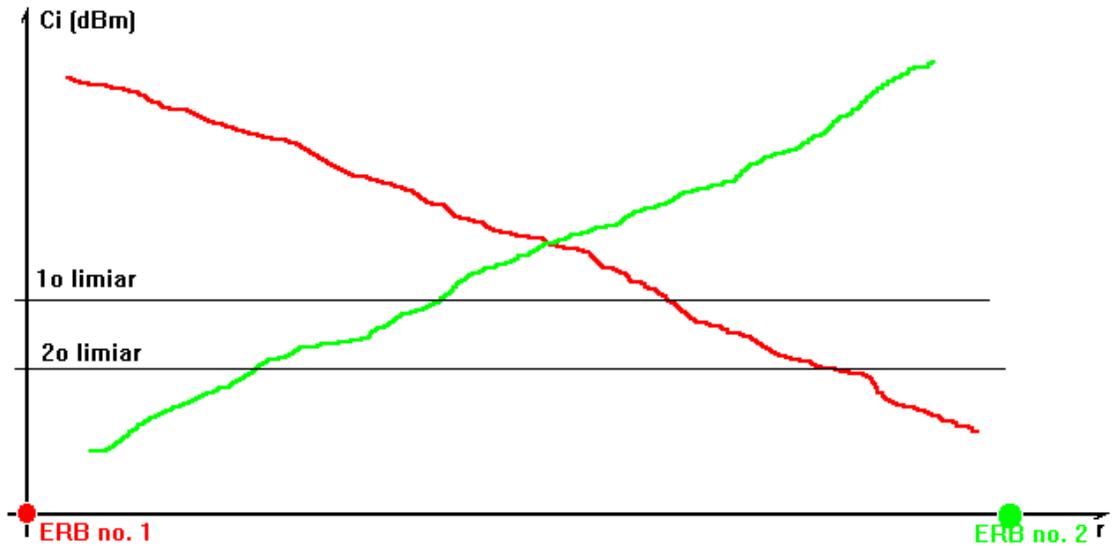
#### **1° limiar de handoff**

A Fig. 2.9 ilustra um processo de handoff. Este se inicia quando  $C_i$  está abaixo de um limiar preestabelecido, denominado "1° limiar de handoff". Outras células próximas à estação móvel realizarão medidas no mesmo canal e aquela que constatar o nível mais alto poderá receber a transferência da chamada, caso o valor medido seja aceitável.

#### **2° limiar de handoff**

Caso  $C_i$  esteja abaixo do "2° limiar de handoff", e nenhuma ERB possa receber a chamada transferida, o sistema corta a ligação para que o assinante não continue a ser tarifado. Para simplificar o entendimento da Fig. 2.9, o primeiro e o segundo limiares de handoff da célula  $n^\circ$

1 foram representados com valores iguais aos limiares de handoff da célula n° 2, o que nem sempre acontece.



**Figura 2.9** Ilustração de um handoff. No gráfico,  $r$  representa a distância de uma estação móvel em relação à ERB n° 1. A célula n° 2 é adjacente à célula n° 1.

Na maioria dos casos, os limiares de handoff 1° e 2° de cada célula são ajustados de modo que haja superposição entre células adjacentes, para que haja histerese como ilustrado na Fig. 2.9.

Em termos de desempenho, uma transferência de chamada pode ser processada de duas formas:

- O canal direto que está servindo a chamada da célula n° 1 é desligado. Em seguida, o canal direto que irá servir a chamada na célula n° 2 é ligado.
- O canal direto que irá servir a chamada na célula n° 2 é ligado. Em seguida, o canal direto que está servindo a chamada da célula n° 1 é desligado.

### **2.1.6 Recepção com diversidade de espaço**

A recepção com diversidade de espaço consiste de um receptor com duas antenas afastadas. O receptor seleciona o sinal considerado melhor ou combina ambos, conforme o critério estabelecido.

A diversidade de espaço é uma técnica muito utilizada em sistemas celulares, nos receptores das ERBs, para evitar a degradação da qualidade do sinal por desvanecimento tipo Rayleigh. Este se deve aos múltiplos trajetos de propagação do sinal, que chega ao destino em várias "versões" com atrasos diferentes, resultando em dispersão e degradação do sinal recebido. O desvanecimento de Rayleigh depende da topografia e também da velocidade de deslocamento da estação móvel.

## 2.2 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Para se calcularem os níveis de sinal em diversos pontos de um sistema móvel celular, seria necessário considerar os seguintes dados:

- Para cada antena do sistema: diagrama de radiação, orientação e localização (altitude, latitude e longitude);
- Para cada ERB: potência transmitida e sensibilidade<sup>2</sup>;
- Para cada estação móvel: potência transmitida e sensibilidade;
- Planta detalhada da região de propagação de interesse, com os dados de índices de reflexão e de refração de todas as superfícies que a compõem.

Tendo em vista a dificuldade de obtenção e processamento destes dados, são utilizados modelos de propagação que procuram aproximar o comportamento dos sinais de rádio frequência. Neste item, apresentam-se alguns destes modelos.

### 2.2.1 Modelo de propagação de perdas lineares (LEE, 1993, 1995)

O software de predição utilizado neste trabalho calcula níveis de sinal em diversos pontos de um sistema celular utilizando o modelo de propagação de perdas lineares.

Neste modelo, atribuem-se índices de rugosidade específicos que dependem das condições de propagação em cada região. O nível de sinal recebido pela estação móvel ( $P_r$ ) pode ser calculado em dBm por:

$$P_r = P_0 - 10 \log \left( \frac{r}{r_0} \right)^\gamma \quad (2.2.1)$$

Onde:

$P_0$ : potência (em dBm) do sinal recebido por uma estação móvel, proveniente da ERB à qual está conectada, medida à distância  $r_0$  em relação à ERB. Este valor é usado como referência para o cálculo dos demais valores de potência recebida em estações móveis.

$r_0$ : distância de referência. Pode-se utilizar por exemplo  $r_0 = 1$  km. Neste caso,  $P_0$  seria a potência medida a 1 km de distância em relação ao transmissor.

$\gamma$ : expoente de perdas de propagação

Os parâmetros  $P_0$  e  $\gamma$  podem ser determinados através de medidas de sinal realizadas em campo.

São apresentados a seguir alguns exemplos de valores de  $P_0$  e  $\gamma$  obtidos através de medidas feitas em algumas localidades, nas seguintes condições:

Frequência da portadora = 900 MHz

Elevação<sup>3</sup> da antena da ERB = 100 pés = 30,48 m

Potência transmitida pela ERB = 40 dBm

Ganho da antena da ERB = 6 dBd (Portanto,  $ERP = 46$  dBm)

Elevação da antena da estação móvel = 10 pés  $\approx$  3 m.

Ganho da antena da estação móvel = 0 dBd

$P_0$  foi medido em  $r_0 = 1$  milha. Porém, serão fornecidos os valores de  $P_0$  equivalentes (convertidos<sup>4</sup>) para  $r_0 = 1$  km.

---

<sup>2</sup> Uma definição de sensibilidade encontra-se no padrão TIA/EIA/IS-97 (1994).

<sup>3</sup> 1 pé = 0,3048 m

<sup>4</sup> 1 milha = 1,6097 km.

Filadélfia:

$$\gamma = 3,68$$

Potência medida a 1 milha = -70 dBm. Logo,

$$P_0(r_0 = 1 \text{ km}) = -70 + 36,8 \log\left(\frac{1,6097}{1}\right) = -70 + 7,6 = -62,4 \text{ dBm}$$

Tóquio:

$$P_0 = -77,7 \text{ dBm}$$

$$\gamma = 3,05$$

Newark:

$$P_0 = -55,1 \text{ dBm}$$

$$\gamma = 4,31$$

Nova York:

$$P_0 = -67,1 \text{ dBm}$$

$$\gamma = 4,80$$

No espaço livre,  $\gamma = 2$ .

Existem também valores que são adotados quando há interesse de evitar custos com medidas em campo. Por exemplo,  $\gamma = 3,84$  em algumas regiões suburbanas dos EUA.

Os valores medidos de  $P_r$  em **dBm** tendem a seguir uma distribuição **normal** com média igual ao valor calculado de  $P_r$  e desvio padrão igual a 8 dB. (Ou seja, os valores medidos de  $P_r$  em **mW** tendem a seguir uma distribuição **log-normal**).

A expressão (2.2.1) não considera desvanecimento causado por multipercurso, tipo Rayleigh.

Deve-se completar a expressão (2.2.1) com fatores de correção da potência recebida  $P_r$  em função da variação de algumas condições:

$$P_r = P_0 - 10 \log \left( \frac{r}{r_0} \right)^\gamma - 10 \log \left( \frac{f}{f_0} \right)^\delta + 10 \log \left( \frac{H_{antERB}}{H0_{antERB}} \right)^\varepsilon + 10 \log \left( \frac{h_{antMovel}}{h0_{antMovel}} \right)^\phi + ERP_1 - ERP_0 \quad (2.2.2)$$

Notação utilizada para as condições iniciais em que  $P_0$  foi medido:

$f_0$ : frequência central da portadora

$H0_{antERB}$ : elevação da antena da ERB

$h0_{antMovel}$ : elevação da antena da estação móvel

$ERP_0$ : potência efetivamente radiada pela ERB, em dBm

Notação utilizada para as condições consideradas para  $P_r$  calculado:

$f$ : frequência central da portadora

$\delta$ : expoente utilizado para correção de  $P_r$  em função de variação da frequência. Geralmente, assume valores entre 2 e 3.

$H_{antERB}$ : elevação da antena da ERB.

$\varepsilon$ : expoente utilizado para correção de  $P_r$  em função de variação da elevação da antena da ERB.

$h_{antMovel}$ : elevação da antena da estação móvel.

$\phi$ : expoente utilizado para correção de  $P_r$  em função de variação da elevação da antena da estação móvel.

$ERP_1$ : potência efetivamente radiada pela ERB, em dBm.

Assim como  $P_0$  e  $\gamma$ , os parâmetros  $\delta$ ,  $\varepsilon$  e  $\phi$  podem ser encontrados através de medidas de sinal realizadas em campo. A expressão (2.2.2) pode ser aprimorada com um número maior de medidas, tornando os resultados mais próximos da realidade<sup>5</sup>.

As perdas de propagação no canal direto podem ser expressas por:

$$L_p(r, f) = P_t - P_r \quad (2.2.3)$$

onde  $P_t$  é a potência transmitida pela ERB. Desprezando-se as perdas em cabos, conectores, divisores, combinadores, filtros, etc. no circuito de transmissão da ERB, vem:

$$P_t = ERP_1 - G_{antERB}$$

onde  $G_{antERB}$  é o ganho da antena da ERB, que será considerado igual nos dois sentidos, direto e reverso.

Desprezando-se o ganho da antena da estação móvel, a expressão (2.2.3) pode ser reescrita como:

$$L_p(r, f) = ERP_1 - G_{antERB} - P_r$$

$$L_p(r, f) = ERP_0 - G_{antERB} - P_0 + 10\log\left(\frac{r}{r_0}\right)^\gamma + 10\log\left(\frac{f}{f_0}\right)^\delta +$$

$$-10\log\left(\frac{H_{antERB}}{H0_{antERB}}\right)^\varepsilon - 10\log\left(\frac{h_{antMovel}}{h0_{antMovel}}\right)^\phi \quad (2.2.4)$$

---

<sup>5</sup> Poderia ser considerada ainda a perda por reflexão. Vide explicação sobre altura efetiva da antena em LEE (1995), Item 4.2, a partir da página 106.

Devido à reversibilidade dos raios, as perdas de propagação no canal reverso também podem ser calculadas pela expressão (2.2.4), substituindo na parcela  $10\log\left(\frac{f}{f_0}\right)^\delta$  a frequência central do canal reverso, que em sistemas AMPS é 45 MHz menor que a frequência central do canal direto.

O desvanecimento de sinal devido a multipercursos em cada instante depende de sua frequência de transmissão (LEE, 1993). Devido à separação de frequências entre o canal direto e o reverso, pode haver diferenças de atenuação por desvanecimento tipo Rayleigh entre ambos os sentidos de transmissão, mas de qualquer forma este tipo de desvanecimento não é considerado no modelo de propagação de perdas lineares.

### **Exemplo de aplicação do modelo de propagação de perdas lineares**

O exemplo refere-se à Fig. 2.10 e os parâmetros considerados são:

Condições iniciais em que  $P_0$  foi medido. Foram adotados os valores *default* do software:

$$P_0 (r_0 = 1 \text{ km}) = -51 \text{ dBm}$$

$$f_0 = 850 \text{ MHz}$$

$$H_{0_{antERB}} = 150 \text{ pés} = 150 \times 0,3048 = 45,72 \text{ m}$$

$$h_{0_{antMóvel}} = \text{Elevação da antena da estação móvel} = 6 \text{ pés} = 1,83 \text{ m.}$$

$$ERP_0 = 50 \text{ dBm}$$

Condições consideradas para  $P_r$  calculado:

$$f = 880,65 \text{ MHz (a ERB comunica-se com a estação móvel no canal 355)}$$

O desnível devido ao terreno entre a ERB e a estação móvel é de  $399 - 378 = 21$  m, como mostra a Fig. 2.10. A altura da torre da ERB é 50 m. Portanto, a elevação de antena a ser considerada na expressão (2.2.2) é:

$$H_{antERB} = 50 + 21 = 71 \text{ m}$$

$$h_{antMóvel} = 6 \text{ pés} = 1,83 \text{ m}$$

$$ERP_1 = 50 \text{ dBm}$$

$$r = 8,25 \text{ km}$$

Fatores de correção: foram adotados os valores "default" do software de predição:

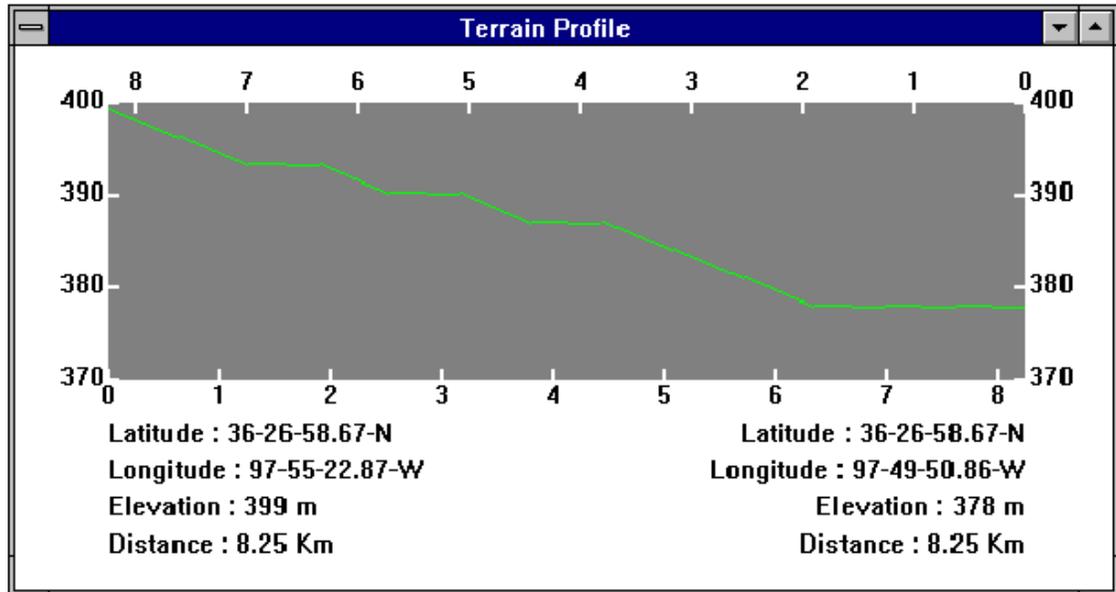
$$\gamma = 3,86$$

$$\delta = 3$$

$$\varepsilon = 2$$

$$\phi = 1$$

Observação: os valores  $\varepsilon = 2$  e  $\phi = 1$  podem ser encontrados na expressão (2.3.27) da referência LEE (1993).



**Figura 2.10** Perfil de terreno entre ERB e estação móvel. As coordenadas geográficas à esquerda representam a localização da ERB. As coordenadas à direita representam a localização da estação móvel. A torre da ERB tem 50 m de altura. A estação móvel tem elevação de 1,8 m.

A potência recebida por uma estação móvel é calculada por (2.2.2):

$$P_r = -51 - 38,6 \log\left(\frac{8,25}{1}\right) + 20 \log\left(\frac{71}{45,72}\right) - 30 \log\left(\frac{880,65 \text{ MHz}}{850 \text{ MHz}}\right) = -83 \text{ dBm}$$

O resultado fornecido pelo software foi uma faixa de -84 a -83 dBm para uma estação móvel nas condições consideradas neste exemplo. Utilizou-se o mesmo software para calcular níveis de potência em vários pontos em torno da ERB em questão, que estão representados na Fig. 2.11.

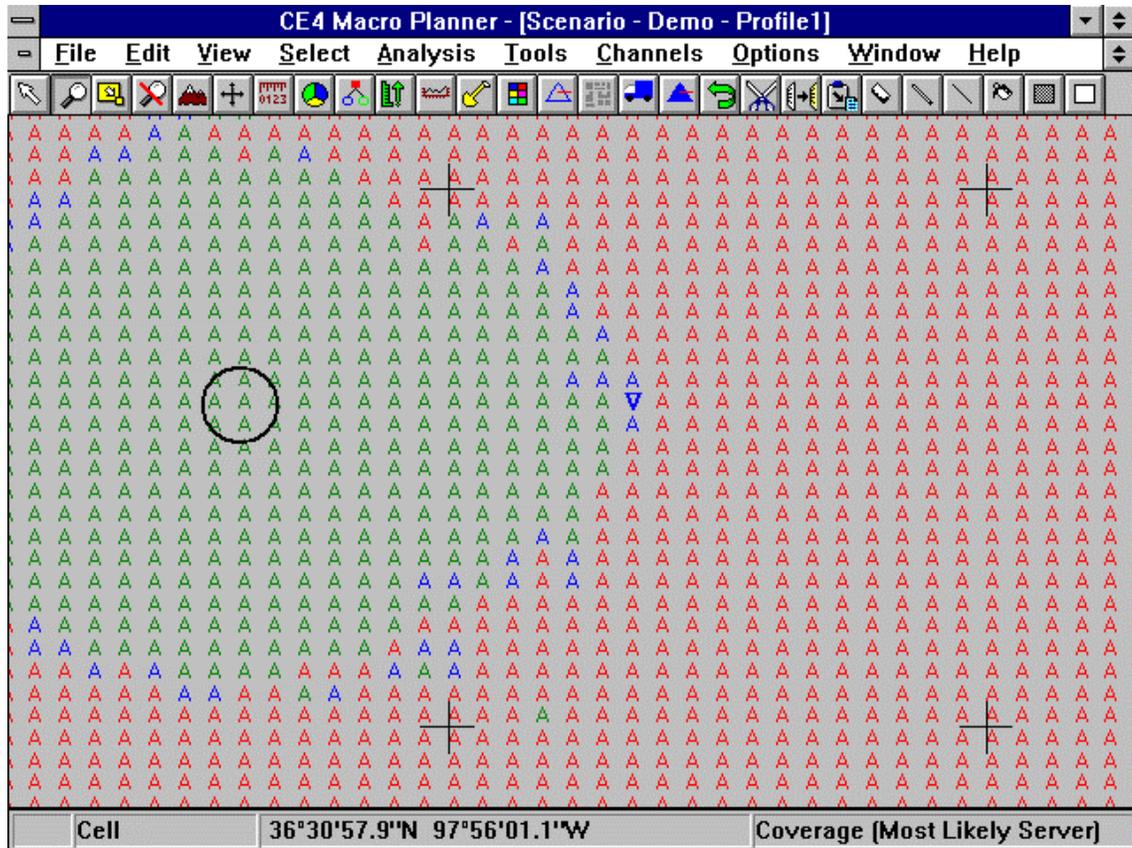


Figura 2.11 Representação de níveis de sinal recebido por uma estação móvel, utilizando software de predição. Está destacado com o símbolo ▽ o local da estação móvel cujo nível foi calculado neste item. O leitor deverá desconsiderar as coordenadas apresentadas na base da tela<sup>6</sup>. As legendas correspondentes às faixas de níveis de sinal são:

<sup>6</sup> O software de predição utilizado apresenta na base da tela as coordenadas do ponto correspondente à posição na tela do cursor controlado pelo *mouse*. Assim, o leitor deverá desconsiderar as coordenadas apresentadas na base das telas geradas pela ferramenta de predição e apresentadas em figuras.

**Coverage [Most Likely Server]**

Plot Bands (Units are dBm)

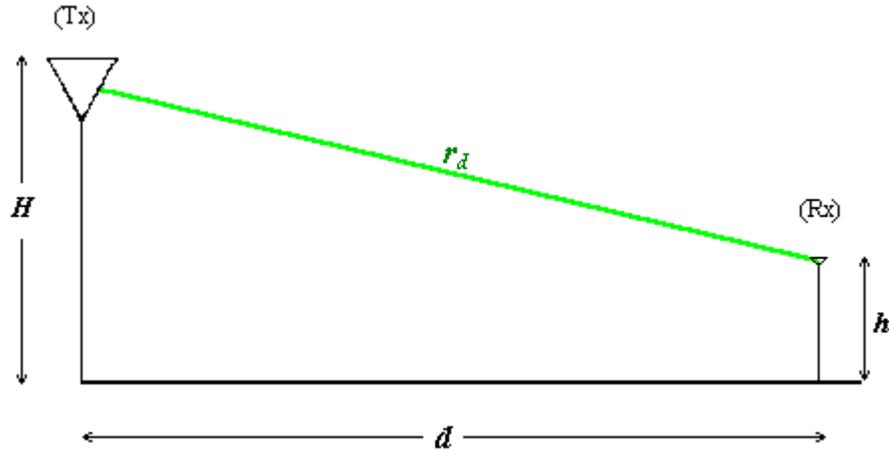
	From	To	Color	Symbol
1	0	-83	DkGreen	A
2	-83	-84	Blue	A
3	-84	-115	Red	A
4	-115			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Use of Colors/Symbols

- Color shows level and Symbol shows id
- Color shows id and Symbol shows level

## 2.2.2 Elipsóides de Fresnel e perdas por obstrução

Considerem-se o transmissor e o receptor da Fig. 2.12. A distância entre ambos será denotada por  $r_d$  (esta abreviação corresponde a "caminho direto", para distinguir do "caminho refletido" que será explicado no Item 2.2.3).



**Figura 2.12** Transmissor e receptor separados por uma distância  $r_d$ . A distância entre suas bases é representada por  $d$ . A altura do transmissor é  $H$ . A altura do receptor é  $h$ .

O n-ésimo Elipsóide de Fresnel é definido como o lugar geométrico dos pontos cuja distância à antena transmissora mais a distância à antena receptora é igual a:

$$r_d + n \frac{\lambda}{2} \quad (2.2.5)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda.

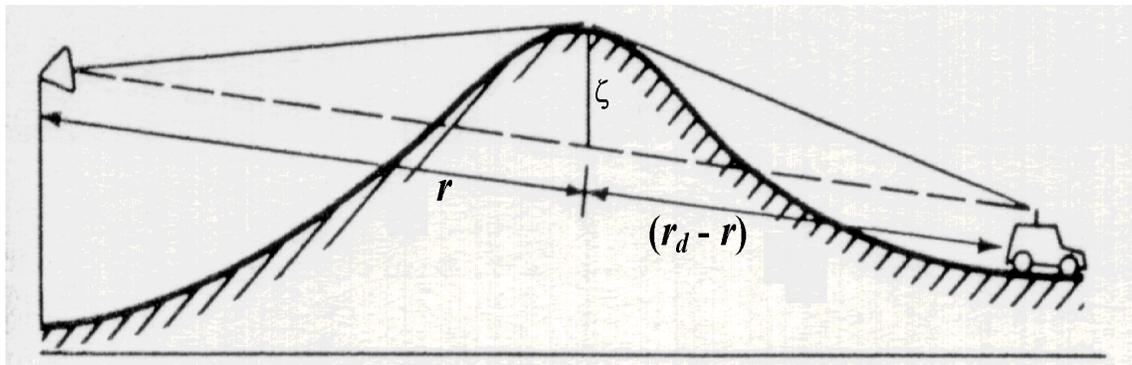
A intersecção entre o n-ésimo Elipsóide de Fresnel e o plano vertical onde se encontram as antenas, é uma elipse denominada "Zona de Fresnel". Uma elipse é definida pelo lugar geométrico dos pontos cuja soma das distâncias aos focos é uma constante, como explicado no ANEXO A. Assim, as antenas do enlace são os focos da n-ésima Zona de Fresnel.

O raio  $\mathfrak{R}$  do  $n$ -ésimo elipsóide de Fresnel em um ponto à distância  $r$  em relação ao transmissor pode ser calculado por:

$$\mathfrak{R}(r) = \sqrt{\frac{n\lambda r(r_d - r)}{r_d}} \quad (2.2.6)$$

A expressão (2.2.6) é equivalente à expressão (A-8) deduzida no ANEXO A. A maior parte da potência transmitida concentra-se no primeiro elipsóide de Fresnel ( $n = 1$ ).

Considere-se então uma obstrução entre o transmissor e o receptor. Esta obstrução pode ser um edifício, uma montanha, etc., como ilustrado na Fig. 2.13, e é chamada de "gume de faca" de altura  $\zeta$  em relação à linha de visada e à distância  $r$  em relação ao transmissor.



**Figura 2.13** Obstrução por um "gume de faca" de altura  $\zeta$  em relação à linha de visada direta entre transmissor e receptor. Fonte: LEE, W. C. Y., "Mobile Cellular Telecommunications - Analog and Digital Systems", McGraw-Hill, Segunda Edição, 1995.

A atenuação de sinal em dB devida ao gume de faca é dada por (YACOUB, 1993):

$$F = 20 \log \left( \frac{S(x) + 0,5}{\sqrt{2} \sin(\Delta\varphi + \pi/4)} \right) \quad (2.2.7)$$

onde:

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{S(x) + 0,5}{C(x) + 0,5}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (2.2.8)$$

$S(x)$  é a integral-seno de Fresnel, dada por:

$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2}u^2\right)du \quad (2.2.9)$$

$C(x)$  é a integral-cosseno de Fresnel, dada por:

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2}u^2\right)du \quad (2.2.10)$$

$$x = -\frac{\zeta\sqrt{2}}{\Re(r)} \quad (2.2.11)$$

A expressão (2.2.7) pode ser aproximada pelas expressões (LEE, 1995):

$$\text{Para } x < -2,4 \quad F = 20\log\left(-\frac{0,225}{x}\right)$$

$$\text{Para } -2,4 \leq x < -1 \quad F = 20\log\left(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,1x + 0,38)^2}\right)$$

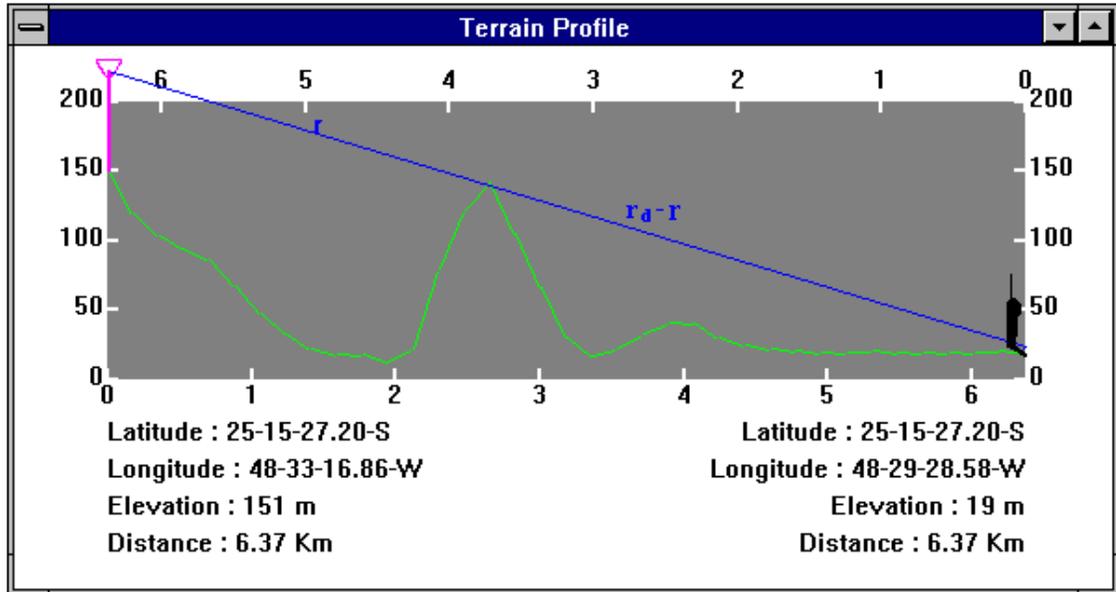
$$\text{Para } -1 \leq x < 0 \quad F = 20\log(0,5e^{0,95x})$$

$$\text{Para } 0 \leq x < 1 \quad F = 20\log(0,5 + 0,62x)$$

$$\text{Para } x \geq 1 \quad F = 0 \text{ dB}$$

Existem vários métodos para calcular a atenuação por múltiplos gumes de faca consecutivos (YACOUB, 1993; RAPPAPORT, 1996). O método recomendado por W. C. Y. LEE (1995) para o caso de dois gumes de faca consecutivos é somar, em dB, as atenuações de cada um.

Um exemplo de obstrução por gume de faca está ilustrado na Fig. 2.14.



**Figura 2.14** Perfil de terreno. As coordenadas à esquerda são da ERB. As coordenadas à direita são da estação móvel. A altitude do gume de faca é 143,3 m. Sua distância à antena da ERB é  $r = 2,66$  km. A distância entre a ERB e a estação móvel é  $r_d = 6,37$  km. A altura da torre da ERB é 78 m. A estação móvel está a 1,5 m de altura.

A partir da expressão (2.2.6), obtém-se o raio do primeiro elipsóide de Fresnel à distância de 2,66 km em relação à ERB (distância em que se encontra o gume de faca):

$$\mathfrak{R}(r = 2.660m) = \sqrt{\frac{\lambda r(r_d - r)}{r_d}} = \sqrt{\frac{0,34 \times 2660 \times 3710}{6370}} = 22,95 \text{ m} \cong 23 \text{ m}$$

A altitude do local onde está a estação móvel é 19 m. Este nível será utilizado como referencial (zero) para as demais elevações. Será calculada a atenuação por obstrução do canal direto.

Elevação do gume de faca =  $143,3 - 19 = 124,3$  m

Elevação da antena da ERB =  $151 + 78 - 19 = 210$  m

Elevação da antena do telefone móvel = 1,5 m

Por semelhança de triângulos, obtém-se:

$$\text{Elevação da linha de visada} = \frac{(210-1,5)}{6,37} \times 3,71 + 1,5 = 122,9 \text{ m}$$

$$h = \text{elevação do gume de faca} - \text{elevação da linha de visada} = 124,3 - 122,9 = 1,4 \text{ m}$$

$$x = -\frac{h\sqrt{2}}{\mathfrak{R}} = -\frac{1,4\sqrt{2}}{23} = -0,08608$$

Logo, a atenuação do gume de faca representado na Fig. 2.14 é:

$$F = 20 \log\left(0,5e^{0,95 \times (-0,08608)}\right) = -6,7 \text{ dB}$$

Calcula-se a seguir a potência recebida pela estação móvel a partir da expressão (2.2.2), adicionando a atenuação causada pela obstrução. Os parâmetros considerados são:

Condições iniciais em que  $P_0$  foi medido. Foram adotados os valores default do software:

$$P_0 (r_0 = 1 \text{ km}) = -51 \text{ dBm}$$

$$f_0 = 850 \text{ MHz}$$

$$H_{\text{antERB}} = 150 \text{ pés} = 150 \times 0,3048 = 45,72 \text{ m}$$

$$h_{\text{antMóvel}} = 1,8 \text{ m}$$

$$ERP_0 = 50 \text{ dBm}$$

Condições consideradas para  $P_r$  calculado:

$$f = 880,65 \text{ MHz (a ERB comunica-se com a estação móvel através do canal 355)}$$

$$H_{\text{antERB}} = 210 \text{ m}$$

$$h_{\text{antMóvel}} = 1,5 \text{ m}$$

$$ERP_1 = 50 \text{ dBm}$$

$$r = 6,37 \text{ km}$$

Fatores de correção: foram adotados os valores default do software:

$$\gamma = 3,86$$

$$\delta = 3$$

$$\varepsilon = 2$$

$$\phi = 1$$

A expressão (2.2.2) acrescida de  $F$  fica:

$$\begin{aligned} P_r = P_0 - 10\log\left(\frac{r}{r_0}\right)^\gamma - 10\log\left(\frac{f}{f_0}\right)^\delta + 10\log\left(\frac{H_{antERB}}{H0_{antERB}}\right)^\varepsilon + \\ + 10\log\left(\frac{h_{antMovel}}{h0_{antMovel}}\right)^\phi + ERP_1 - ERP_0 + F \end{aligned} \quad (2.2.12)$$

$$\begin{aligned} P_r = -51 - 10\log\left(\frac{6,37}{1}\right)^{3,86} - 10\log\left(\frac{880,65}{850}\right)^3 + 10\log\left(\frac{210}{45,72}\right)^2 + \\ + 10\log\left(\frac{1,5}{1,8}\right)^1 - 6,7 \cong -76,7 \text{ dBm} \end{aligned}$$

O software de predição calculou o nível de sinal recebido pela estação móvel entre -79 e -78 dBm.

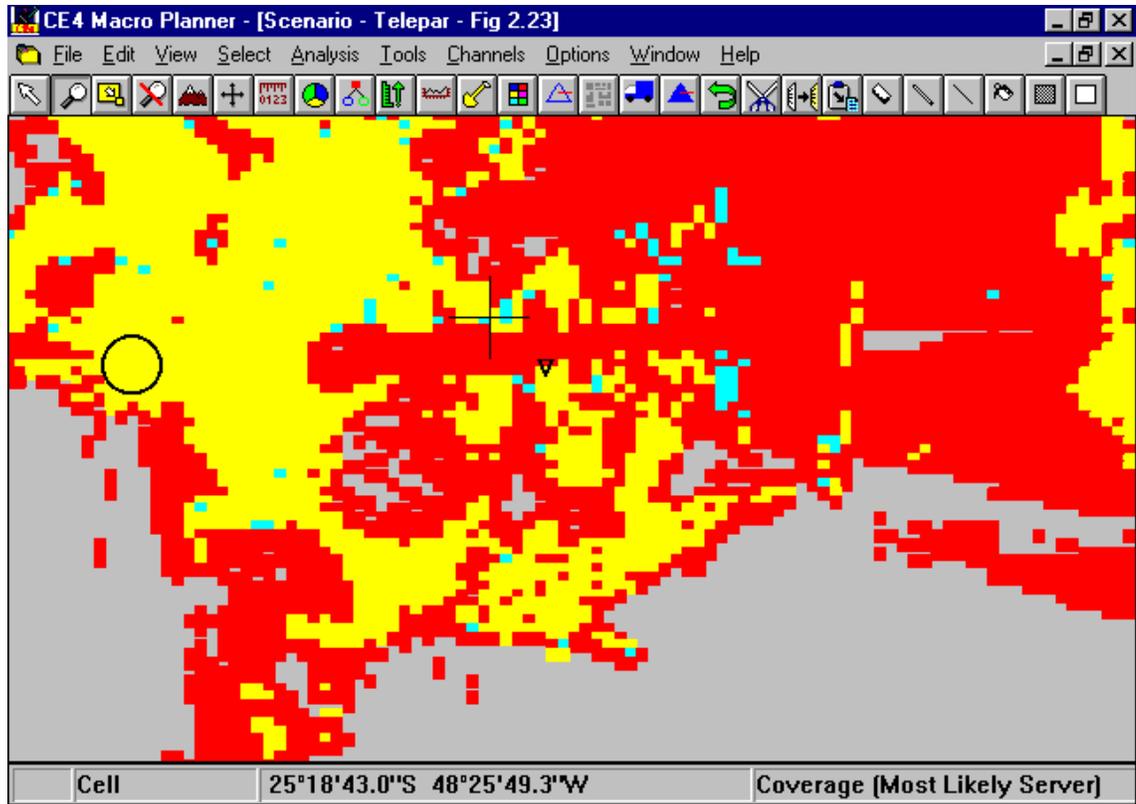


Figura 2.15 Cálculo dos níveis de sinal recebidos por estações móveis em diversos pontos em uma planta. A localização da estação móvel da Fig. 2.14 está destacada com o símbolo  $\nabla$ . O valor de  $P_r$  calculado pelo software está na faixa de -79 a -78 dBm. As legendas são:

Coverage (Most Likely Server) [X]

Plot Bands (Units are dBm)

	From	To	Color	Symbol
1	0	-78	Yellow	A
2	-78	-79	Cyan	A
3	-79	-115	Red	A
4	-115			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Insert Band      Delete Band

Use of Colors/Symbols

- ◆ Color shows level and Symbol shows id
- ◇ Color shows id and Symbol shows level

Load Defaults      Save As Defaults

OK      Cancel      Help

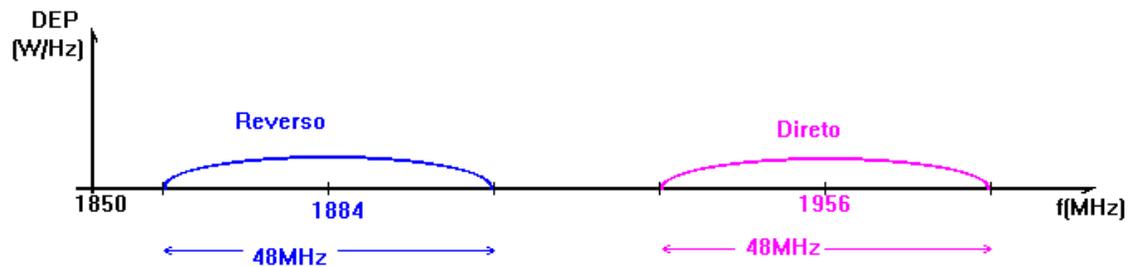
### 2.2.3 Modelo de propagação de dois raios

No Item 2.2.1 deste capítulo, foi apresentado um modelo de propagação muito simples (LEE, 1993, 1995). A seguir, será deduzido um modelo de propagação que também é linear e que considera visada direta entre ERB e estação móvel.

#### 2.2.3.1 Medidas de perdas de propagação realizadas em campo (MILSTEIN et al., 1992)

Para realizar as medidas de propagação apresentadas a seguir, foram utilizados dois veículos equipados com terminais de assinante e um veículo equipado com um mastro e um simulador de ERB. As principais características dos sinais utilizados nas medidas são:

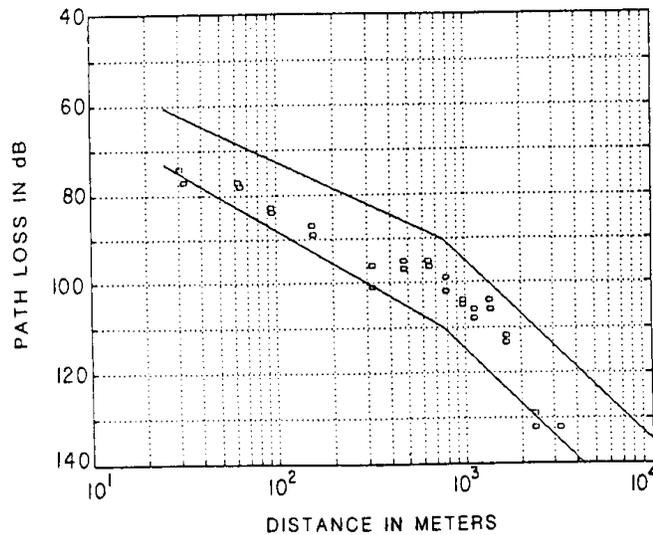
- Faixa disponível para o teste: 140 MHz, de 1.850 a 1.990 MHz.
- Bandas dos canais direto e reverso com largura de 48 MHz, separadas de 24 MHz, como ilustrado na Fig. 2.16.



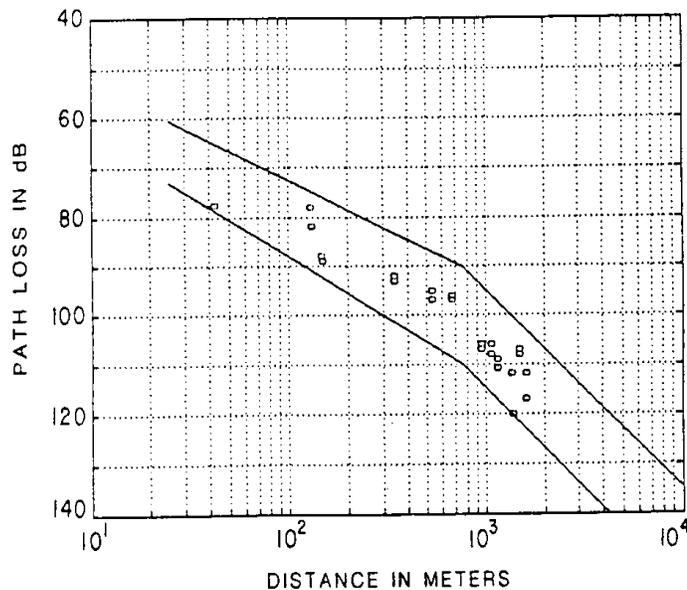
**Figura 2.16** DEP dos sinais transmitidos nos canais direto e reverso utilizados nas medidas em campo (MILSTEIN et al., 1992).

As perdas de propagação do canal direto foram medidas nos terminais de assinante e estão representadas (em dB) em função da distância entre ERB e terminal de assinante nos gráficos das Figs. 2.17 a 2.23 a seguir (fonte: MILSTEIN, L. B.; SCHILLING, D. L.; PICKHOLTZ, R. L.; ERCEG, V.; KULLBACK, M.; KANTERAKIS, E. G.; FISHMAN, D. S.; BIEDERMAN,

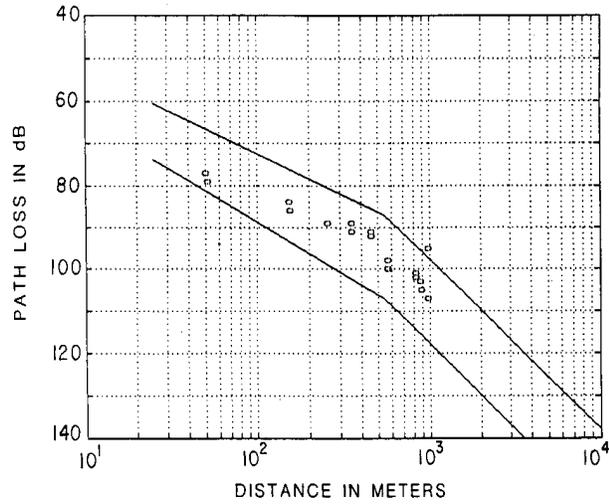
W. H.; SALERNO, D. C.; "On the Feasibility of a CDMA Overlay for Personal Communications Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 10, no. 4, May 1992, pp. 655 - 668). Os pontos medidos foram delimitados por segmentos de reta superior e inferior.



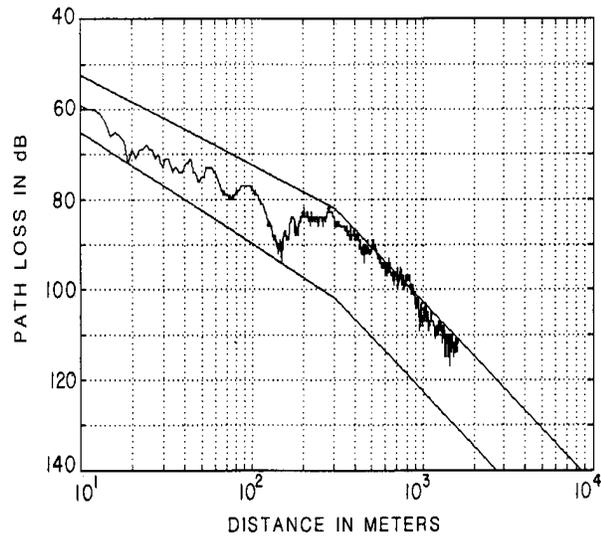
**Figura 2.17** Houston, em região tipicamente suburbana. Altura da antena da ERB = 13,1 m. Altura da antena do terminal de assinante = 2,2 m.



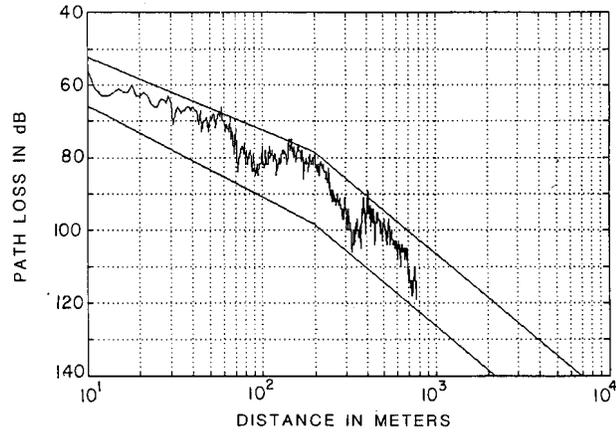
**Figura 2.18** Houston, em região tipicamente urbana com pequenos prédios. Altura da antena da ERB = 13,1 m. Altura da antena do terminal de assinante = 2,2 m.



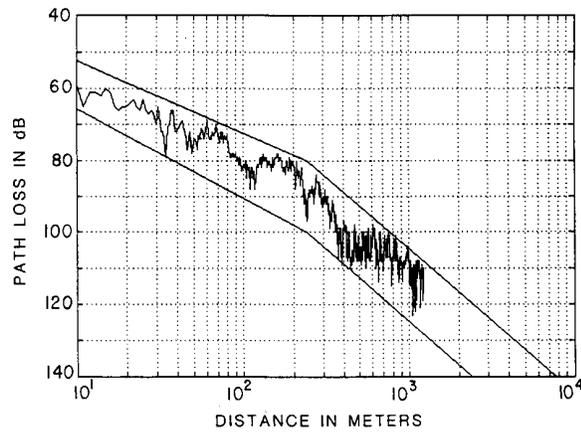
**Figura 2.19** Houston, em região tipicamente urbana com prédios grandes. Altura da antena da ERB = 9,15 m. Altura da antena do terminal de assinante = 2,2 m.



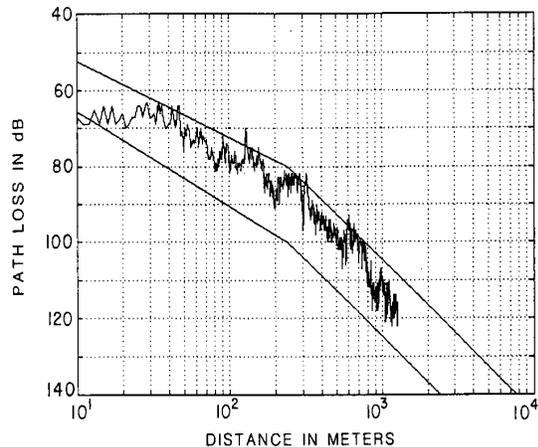
**Figura 2.20** Nova York, em região tipicamente rural. Altura da antena da ERB = 7,6 m. Altura da antena do terminal de assinante = 1,5 m.



**Figura 2.21** Nova York, em região tipicamente suburbana. Altura da antena da ERB = 5,0 m. Altura da antena do terminal de assinante = 1,5 m.



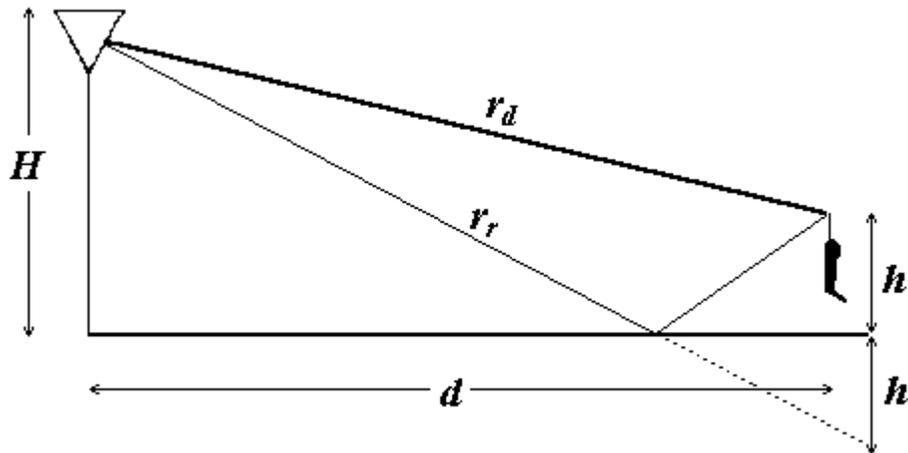
**Figura 2.22** Nova York, em região tipicamente suburbana. Altura da antena da ERB = 7,1 m. Altura da antena do terminal de assinante = 1,5 m.



**Figura 2.23 Nova York, em região tipicamente urbana. Altura da antena da ERB = 7,1 m. Altura da antena do terminal de assinante = 1,5 m.**

**2.2.3.2 Um modelo de propagação coerente com as medidas realizadas em campo (XIA et al., 1993)**

Uma característica que as Figs. 2.17 a 2.23 têm em comum é que o diagrama de perdas de propagação pode ser aproximado por dois segmentos com perdas lineares separados por um ponto denominado *break point* ou "ponto de quebra". O primeiro trecho, que vai da ERB ao ponto de quebra, tem inclinação menor que o segundo trecho, do ponto de quebra à estação móvel. Explica-se a seguir um modelo possível de propagação que corresponde à aproximação por dois segmentos lineares. O diagrama da Fig. 2.24 ilustra os caminhos direto e refletido de propagação de um sinal de uma ERB até uma estação móvel.



**Figura 2.24** Caminhos direto e refletido de propagação de um sinal entre ERB e estação móvel. A distância correspondente ao percurso direto (com traço mais espesso) é indicada por  $r_d$ ; a distância correspondente ao percurso refletido (com traço mais fino) é indicada por  $r_r$ .

A partir da Fig. 2.24, considerando linha de visada direta entre a antena da ERB e estação móvel, considere-se a seguinte notação:

$H$ : Altura da antena da ERB

$h$ : Altura da antena da estação móvel

$d$ : Distância entre as bases da ERB e da estação móvel

$r_d$ : Distância correspondente ao percurso direto (com traço mais espesso)

$r_r$ : Distância correspondente ao percurso refletido (com traço mais fino)

$P_r$ : Potência recebida pela estação móvel, em mW

$P_t$ : Potência transmitida pela ERB, em mW

$\lambda$ : comprimento de onda

$a_v$ : coeficiente de reflexão no solo

$\Delta\phi$ : diferença de fase entre o caminho direto e o refletido

Para simplificar o desenvolvimento do modelo de dois raios, consideram-se antenas isotrópicas no transmissor e no receptor. A potência recebida pela estação móvel pode ser expressa por (LEE, 1995):

$$P_r = P_t \left( \frac{1}{4\pi d / \lambda} \right)^2 |1 + a_v e^{j\Delta\varphi}|^2 \quad (2.2.13)$$

Considerando  $a_v = -1$ :

$$P_r = P_t \left( \frac{1}{4\pi d / \lambda} \right)^2 |1 - \cos(\Delta\varphi) - j \sin(\Delta\varphi)|^2 = P_t \frac{2}{(4\pi d / \lambda)^2} [1 - \cos(\Delta\varphi)]$$

$$P_r = P_t \left[ \frac{\sin(\Delta\varphi / 2)}{2\pi d / \lambda} \right]^2$$

Portanto, as perdas de propagação em dB são expressas por:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{P_r}{P_t} \right) = 10 \log \left[ \frac{\sin(\Delta\varphi / 2)}{2\pi d / \lambda} \right]^2 = 20 \log \left| \frac{\sin(\Delta\varphi / 2)}{2\pi d / \lambda} \right| \quad (2.2.14)$$

onde:

$$\Delta\varphi = \beta \times \Delta r$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\Delta r = r_r - r_d$$

$$r_d = \sqrt{(H - h)^2 + d^2}$$

$$r_r = \sqrt{(H + h)^2 + d^2}$$

$$\begin{aligned} \Delta r &= r_r - r_d = \sqrt{(H + h)^2 + d^2} - \sqrt{(H - h)^2 + d^2} = \\ &= d \times \left[ \sqrt{\left( \frac{H + h}{d} \right)^2 + 1} - \sqrt{\left( \frac{H - h}{d} \right)^2 + 1} \right] \end{aligned}$$

Considerando que  $h \ll d$  e  $H \ll d$ , pode-se utilizar a aproximação:

Para  $|x| \ll 1$ ,  $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}$ . Portanto:

$$\Delta r \cong \frac{2Hh}{d} \text{ e} \quad (2.2.15)$$

$$\Delta\varphi \cong \frac{2\pi}{\lambda} \times \frac{2Hh}{d} \quad (2.2.16)$$

Substituindo (2.2.16) em (2.2.14), obtém-se:

$$L_p(d) = 10\log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) = 10\log\left[\frac{\lambda}{2\pi d} \sin\left(\frac{2\pi Hh}{\lambda d}\right)\right]^2 \quad (2.2.17)$$

Na Fig. 2.25, encontra-se um gráfico que ilustra o decaimento do nível de um sinal conforme a expressão da atenuação (2.2.17).

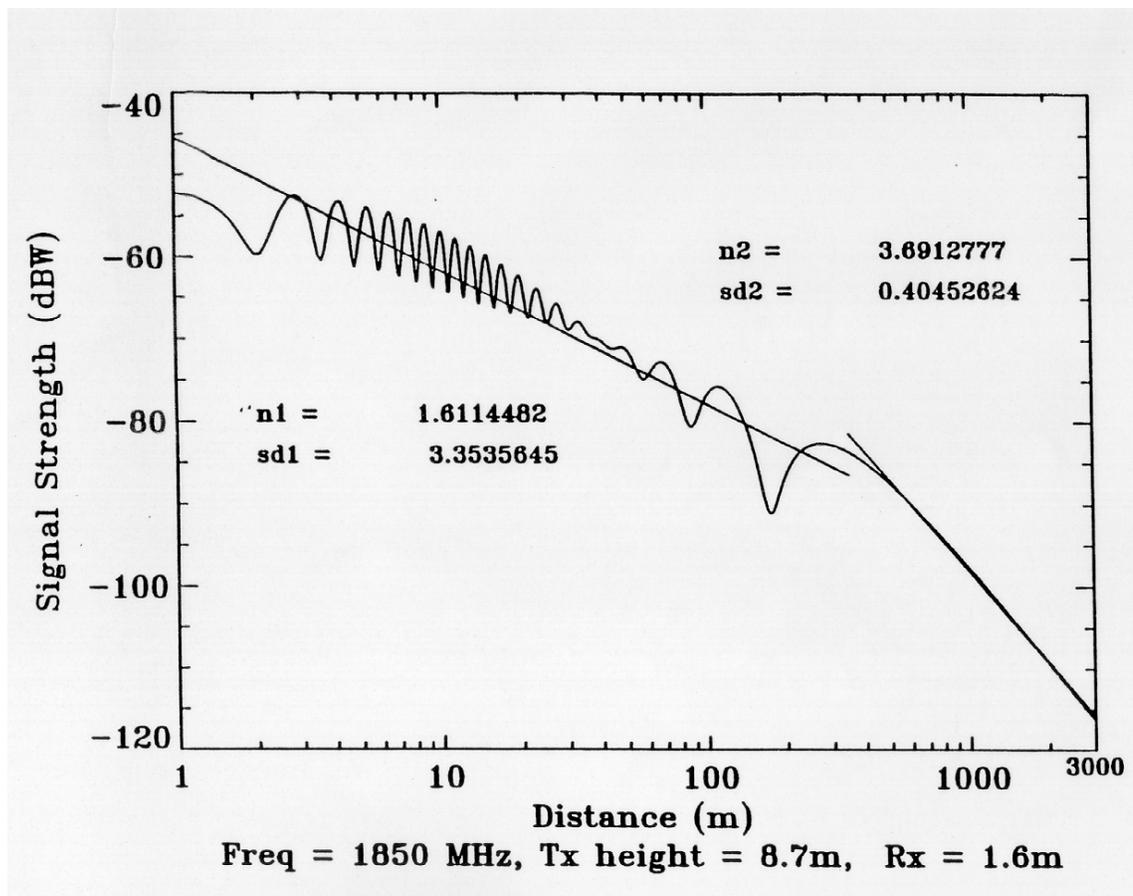


Figura 2.25 Decaimento do nível de um sinal conforme a expressão da atenuação (2.2.17), com  $H = 8,7\text{m}$ ,  $h = 1,6\text{m}$  e  $f = 1.850\text{ MHz}$ . Valores em dBW. Fonte: XIA, H. H.;

**BERTONI, H. L.; MACIEL, L. R.; LINDSAY-STEWART, A.; ROWE, R., "Radio Propagation Characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 41, no. 10, Oct. 1993, pp. 1439 - 1447.**

XIA et al. (1993) apresentam os seguintes resultados da aproximação do diagrama da Fig. 2.25 por dois segmentos lineares:

- Para o primeiro ( $d \leq R_b$ ) a inclinação é 1,6 com desvio padrão 3,35.
- Para o segundo ( $d > R_b$ ) a inclinação é 3,7 com desvio padrão 0,40.

O desvio padrão do primeiro segmento é maior porque antes do ponto de quebra, o sinal de rádio oscila fortemente devido a combinações construtivas e destrutivas entre o sinal direto e o refletido. Após o ponto de quebra, o sinal decai mais intensamente em função da distância, tendo portanto maior inclinação.

Tanto no resultado calculado da Fig. 2.25, como nos resultados medidos em campo das Figs. (2.17) a (2.23) em Nova York e Houston, observa-se que o ponto de quebra corresponde à maior distância  $d$  em que existe um máximo de perdas, ou seja, quando o argumento do seno na expressão (2.2.14) é:

$$\frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{\pi}{2}$$

Seja  $R_b$  a distância  $d$  correspondente ao ponto de quebra. Utilizando a expressão (2.2.16):

$$\frac{2\pi}{\lambda} \times \frac{2Hh}{R_b} = \pi \Rightarrow R_b = \frac{4Hh}{\lambda} \quad (2.2.18)$$

Na expressão (2.2.17), fazendo  $d = R_b = \frac{4Hh}{\lambda}$ , obtêm-se as perdas de propagação no ponto de

quebra:

$$L_p(R_b) = 10 \log \left[ \frac{\lambda}{2\pi R_b} \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) \right]^2 = 20 \log \left( \frac{\lambda^2}{8\pi Hh} \right) \quad (2.2.19)$$

### Obstrução do primeiro Elipsóide de Fresnel pelo chão

A aproximação do diagrama de perdas de propagação por dois segmentos com inclinações diferentes pode ser associada à obstrução do primeiro elipsóide de Fresnel pelo próprio chão. Seja  $d = d_{\#}$  a distância entre ERB e estação móvel tal que o primeiro elipsóide de Fresnel apenas encosta no chão. Demonstra-se a seguir que  $d_{\#}$  é dada pelo mesmo  $R_b$  calculado pela expressão (2.2.18). Considerem-se as identidades (2.2.20a) e (2.2.20b) a seguir:

$$r_d = \sqrt{(H-h)^2 + d^2} \quad (2.2.20a)$$

$$r_r = \sqrt{(H+h)^2 + d^2} \quad (2.2.20b)$$

Quando  $d = d_{\#}$ , o ponto em que o primeiro Elipsóide encontra o chão é o mesmo ponto onde o percurso refletido (Fig. 2.24) intercepta o chão, portanto  $r_r = r_d + \frac{\lambda}{2}$ . Obtém-se então:

$$\sqrt{(H+h)^2 + d_{\#}^2} = \sqrt{(H-h)^2 + d_{\#}^2} + \frac{\lambda}{2} \quad (2.2.21)$$

O ANEXO B mostra como isolar  $d_{\#}$  na equação (2.2.21), simplificando para  $H \ll \lambda$  e  $h \ll \lambda$ .

O resultado é:

$$d_{\#} \approx \frac{4Hh}{\lambda} \quad (2.2.22)$$

que é a mesma expressão para  $R_b$  dada em (2.2.18). Portanto, o ponto de quebra ( $R_b$ ), que divide o trajeto de propagação em duas regiões com inclinações de perdas distintas, corresponde à

distância  $d_{\#}$  entre ERB e estação móvel em que o primeiro elipsóide de Fresnel intercepta o chão. Para  $d < R_b$ , o primeiro elipsóide de Fresnel fica inteiramente acima do chão e para  $d > R_b$  o elipsóide é obstruído pelo chão. Este modelo de propagação é bastante simplificado pois considera linha de visada direta e não considera acidentes geográficos ou edificações no trajeto entre ERB e estação móvel. A linha de visada direta é o melhor caso para propagação do sinal desejado, e o pior caso para interferências.

Para  $d < R_b$ , o primeiro elipsóide de Fresnel está livre de obstruções e são alcançadas condições de propagação semelhantes à do espaço livre, com expoente de perdas aproximadamente igual a 2. Nas Figs. 2.17 a 2.23, o expoente de perdas de propagação para  $d > R_b$  pode assumir valores de até 4.

O ponto de quebra descrito pelo modelo de dois raios pode ser utilizado em sistemas celulares, utilizando a distância conhecida  $R_b$  para definir o raio das células. Desta forma, o decaimento de sinal transmitido por uma ERB é menor no interior da célula, onde este sinal é desejado, e maior fora da célula, onde o sinal da mesma ERB é indesejado.

Verifica-se a seguir a expressão (2.2.18) para as medidas da Fig. 2.21, realizadas em Nova York, numa região tipicamente suburbana. Altura da antena da ERB = 5,0 m; altura da antena do terminal de assinante = 1,5 m. Considerando-se a frequência central da banda de transmissão, 1.956 MHz, o comprimento de onda é:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1956 \times 10^6} = 0,1534 \text{ m}$$

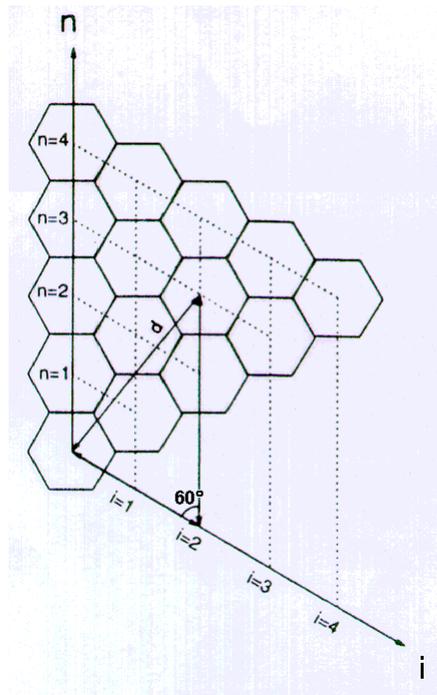
$$R_b = \frac{4Hh}{\lambda} = \frac{4 \times 5 \times 1,5}{0,1534} = 195,6 \text{ m. Na Fig. 2.21, verifica-se que o ponto de quebra está a}$$

cerca de 200 m do transmissor.

## 2.3 GEOMETRIA CELULAR HEXAGONAL

### 2.3.1 Conceitos básicos

Como visto no Item 2.1, as grades hexagonais são as mais utilizadas para planejar posições ordenadas de células em um sistema celular. Apresenta-se na Fig. 2.26 um sistema de coordenadas conveniente para o estudo de uma grade hexagonal. A localização do centro de cada célula (hexágono) dentro deste sistema fica definida por um par de coordenadas  $[n,i]$ . Todos os hexágonos são regulares e possuem raio igual a  $R$ . A célula cujo centro está na origem do sistema será denominada "célula central". Da mesma forma, a ERB que está na origem será denominada "ERB central".



**Figura 2.26** Um sistema de coordenadas conveniente para o estudo de geometria celular hexagonal. Fonte: KIM, K. I., "CDMA Cellular Engineering Issues", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, no. 3, Aug. 1993, pp. 345 - 350.

O lado de um hexágono regular tem medida igual ao raio  $R$ . Seja  $a$  o apótema deste hexágono.

Então,

$$\frac{a}{R} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.3.1)$$

Portanto, a distância entre os centros de dois hexágonos adjacentes tem medida  $R\sqrt{3}$ .

Seja  $d[n,i]$  a distância da origem até o centro de um hexágono cujas coordenadas são  $[n,i]$ .

Utilizando o Teorema dos Cossenos, obtém-se:

$$(d[n,i])^2 = (nR\sqrt{3})^2 + (iR\sqrt{3})^2 + 2(nR\sqrt{3}) \times (iR\sqrt{3}) \cos(120^\circ)$$

Portanto:

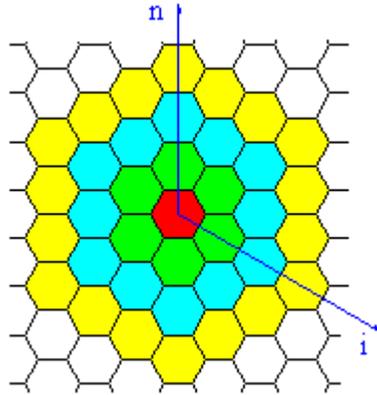
$$\frac{d[n,i]}{R} = \sqrt{3(n^2 + i^2 - ni)} \quad (2.3.2)$$

### 2.3.2 Cálculo da distância da origem ao centro de células de um anel de ordem $n$

As células adjacentes à célula central formam em torno da mesma o chamado "primeiro anel".

As células em torno deste primeiro anel formam um segundo anel e assim por diante, como

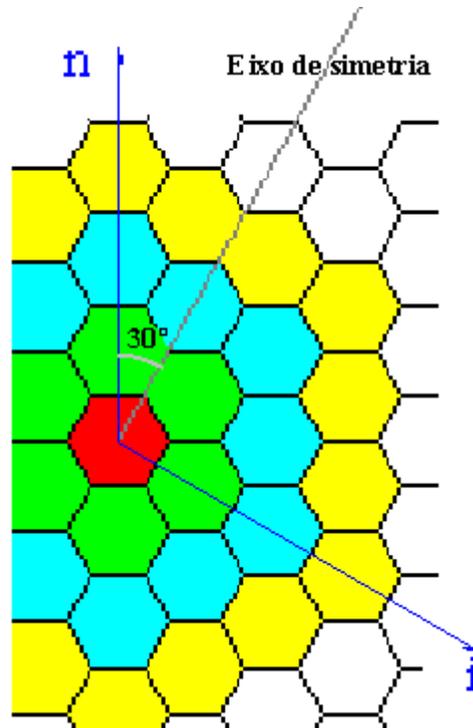
ilustrado na Fig. 2.27.



**Figura 2.27** Grade hexagonal, destacando o primeiro, segundo e o terceiro anel em torno da célula central.

Seja  $n$  a ordem de um anel. O número de células no anel de ordem  $n$  será  $6n$ , por se tratar de uma grade hexagonal. Assim, o 1º anel será formado por 6 células, o 2º por 12, o 3º por 18 e assim sucessivamente.

O cálculo das distâncias da origem ao centro das células de um anel de ordem  $n$  somente será necessário para o grupo de células consecutivas compreendidas entre o eixo " $n$ " e um "eixo de simetria" que forma um ângulo de  $30^\circ$  em relação ao mesmo. A Fig. 2.28 ilustra o eixo de simetria para cálculo de  $d[n, i]$ .



**Figura 2.28** Grade hexagonal, com os três primeiros anéis em torno da célula central, ilustrando o "eixo de simetria" para efeito do cálculo das distâncias da origem às células do anel de ordem  $n$ . O eixo de simetria forma um ângulo de  $30^\circ$  com o eixo  $n$ .

As distâncias da origem às demais células do anel de ordem  $n$  são repetições ordenadas das distâncias da origem às células que estão entre o eixo  $n$  e o eixo de simetria. Portanto:

Se  $n$  for par, haverá  $\frac{n}{2} + 1$  distâncias distintas da origem ao centro das células do anel de ordem

$n$ . Por exemplo:  $d[n,0], d[n,1], \dots, d\left[n, \frac{n}{2}\right]$ .

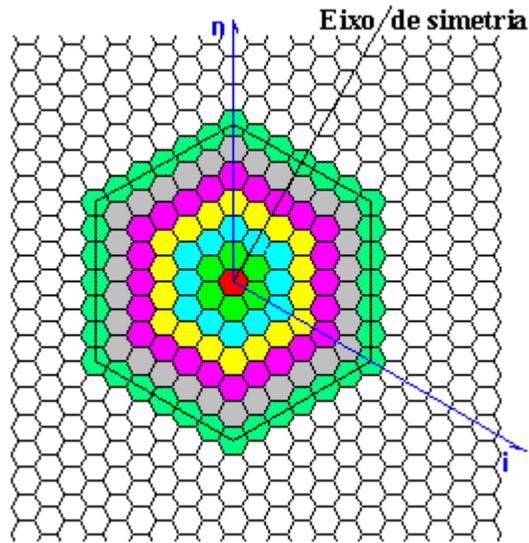
Se  $n$  for ímpar, haverá  $\left(\frac{n+1}{2}\right)$  distâncias distintas da origem às células do anel de ordem  $n$ .

Por exemplo:  $d[n,0], d[n,1], \dots, d\left[n, \left(\frac{n-1}{2}\right)\right]$ .

Em um anel de ordem  $n$ , com  $0 \leq i \leq (n - 1)$ , a maior distância à origem é a da célula que está no eixo  $n$ . Substituindo  $i = 0$  em (2.3.2) obtém-se:

$$\frac{d[n,0]}{R} = n\sqrt{3}$$

Este valor corresponde ao raio de um hexágono formado pelas células do  $n$ -ésimo anel. A Fig. 2.29 ilustra o hexágono formado pelas células do anel de ordem  $n = 6$ .



**Figura 2.29** Grade hexagonal, destacando o hexágono formado pelas células do anel de ordem  $n = 6$ .

Se  $n$  for par, a menor distância à origem é a da célula que está no eixo de simetria.

$$\frac{d\left[n, \frac{n}{2}\right]}{R} = \sqrt{3\left[n^2 + \left(\frac{n}{2}\right)^2 - n\left(\frac{n}{2}\right)\right]} = \frac{3}{2}n$$

Este valor corresponde ao apótema do hexágono formado pelas células do  $n$ -ésimo anel.

Se  $n$  for ímpar, a menor distância à origem é a da célula contígua ao eixo de simetria:

$$\frac{d\left[n, \left(\frac{n-1}{2}\right)\right]}{R} = \sqrt{3\left[n^2 + \left(\frac{n-1}{2}\right)^2 - n\left(\frac{n-1}{2}\right)\right]} = \sqrt{(3n^2 + 1)} \times \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Em resumo, os valores extremos são:

$$n \text{ par: } \frac{3}{2}n \leq \frac{d[n,i]}{R} \leq n\sqrt{3}$$

$$n \text{ ímpar: } \sqrt{(3n^2 + 1)} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \leq \frac{d[n,i]}{R} \leq n\sqrt{3}$$

Comparando as extremidades inferiores dos dois intervalos supra citados:

$$\frac{\left(\frac{3}{2}n\right)}{\sqrt{(3n^2 + 1)}} < 1 \quad \text{para } n \text{ inteiro, não nulo. Pode-se afirmar então que:}$$

$$\frac{3}{2}n \leq \frac{d[n,i]}{R} \leq n\sqrt{3} \quad \text{para } n \text{ par ou ímpar, ou seja, a relação } \frac{d[n,i]}{nR} \text{ está sempre compreendida}$$

entre 1,5 e 1,73.

A Tabela 2.2 apresenta os valores calculados da distância da origem ao centro de células de anéis de ordem  $n$ . Para simplificar o entendimento,  $d[n,i]$  foi calculado para  $i$  variando de 0 a  $(n - 1)$  em cada anel, havendo portanto valores repetidos.

Tabela 2.2 Distâncias da origem ao centro das células do anel de ordem  $n$ , com  $n$  variando de 1 a 5 e  $i$  variando de 0 a  $(n - 1)$ .

$n$	$i$	$\frac{d[n,i]}{R} = \sqrt{3(n^2 + i^2 - ni)}$	(Distância maior)/ $R = n\sqrt{3}$	$n$ par $\Rightarrow$ (Distância menor)/ $R = \frac{3}{2}n$ $n$ ímpar $\Rightarrow$ (Distância menor)/ $R = \frac{\sqrt{3}}{2}\sqrt{(3n^2 + 1)}$
1	0	$\sqrt{3} \cong 1,73$	$\sqrt{3} \cong 1,73$	$\sqrt{3} \cong 1,73$
	0	$2\sqrt{3} \cong 3,46$	$2\sqrt{3} \cong 3,46$	3
2	0	$3\sqrt{3} \cong 5,20$	$3\sqrt{3} \cong 5,20$	$\sqrt{21} \cong 4,58$
	1	$\sqrt{21} \cong 4,58$		
	2	$\sqrt{21} \cong 4,58$		
3	0	$4\sqrt{3} = 6,93$	$4\sqrt{3} = 6,93$	6
	1	$\sqrt{39} = 6,25$		
	2	6		
	3	$\sqrt{39} = 6,25$		
4	0	$5\sqrt{3} = 8,66$	$5\sqrt{3} = 8,66$	$\sqrt{57} = 7,55$
	1	$3\sqrt{7} = 7,94$		
	2	$\sqrt{57} = 7,55$		
	3	$\sqrt{57} = 7,55$		
	4	$3\sqrt{7} = 7,94$		

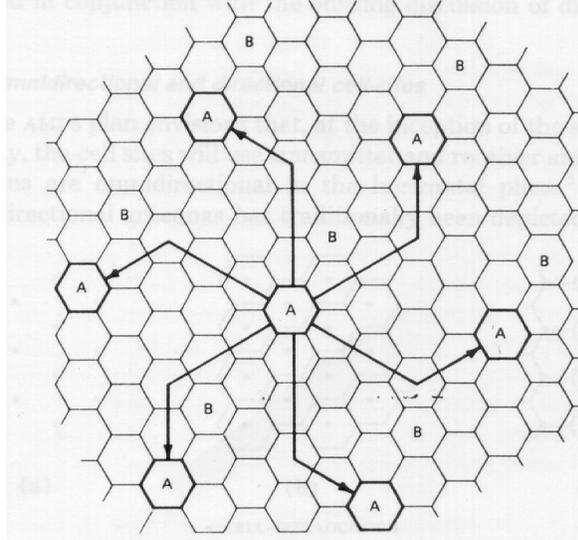
### 2.3.3 Determinação da distância de reuso

MACDONALD (1979) apresentou um procedimento para se determinarem as posições de células cocanais em uma grade hexagonal, de modo a garantir que todas elas sejam equidistantes. Utilizando este procedimento, é possível configurar o formato e número de células que constituirão a estrutura básica que se repete em toda a rede - o cluster.

A partir de um hexágono, é possível deslocar-se através de uma cadeia de células colineares em três direções diferentes (e em dois sentidos para cada direção). Partindo-se da célula central, a célula cocanal mais próxima pode ser definida por:

- Um deslocamento de  $p$  hexágonos em uma das três direções;
- Em seguida, outro deslocamento de  $q$  hexágonos em direção a  $60^\circ$  da primeira, no sentido anti-horário.

Uma vez estabelecidos os valores de  $p$ ,  $q$  e o sentido de rotação de  $q$  sobre  $p$ , existe para cada lado da célula central uma e uma só célula cocanal. Para encontrar células cocanais correspondentes aos outros 5 lados da célula central, repete-se o mesmo procedimento a partir da célula central, nas outras direções e sentidos. A Fig. 2.30 apresenta um exemplo deste procedimento, com  $p = 3$ ,  $q = 2$  e rotação no sentido anti-horário.



**Figura 2.30** Exemplo de definição das seis células cocanais mais próximas à célula central, com  $p = 3$ ,  $q = 2$  e rotação no sentido anti-horário. O conjunto de canais utilizado pela célula central é representado por A. O mesmo exercício foi feito com a letra B, que representa outro conjunto de canais. Fonte: MACDONALD, V. H., "Advanced Mobile Phone Service - The Cellular Concept", Bell System Technical Journal, January 1979, pp. 15 - 41.

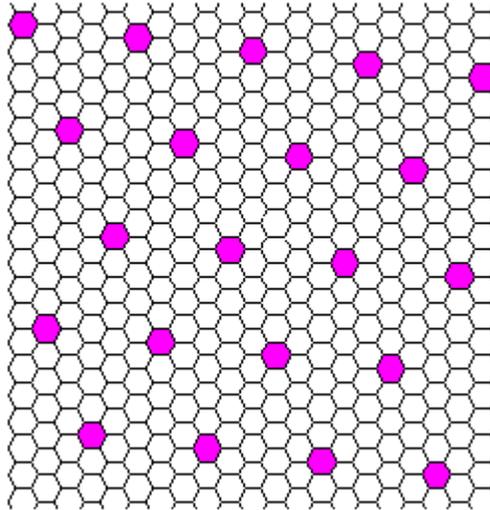
Evidentemente, o mesmo procedimento vale deslocando-se  $q$  células primeiro, e em seguida  $p$  células, ou adotando o sentido horário ao invés do anti-horário. A distância de reuso pode ser obtida pelo Teorema dos Cossenos. Sua expressão é semelhante à expressão (2.3.2):

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3(p^2 + q^2 + pq)} \quad (2.3.3)$$

#### 2.3.4 Determinação do número de células em cada cluster, em decorrência de $p$ e $q$

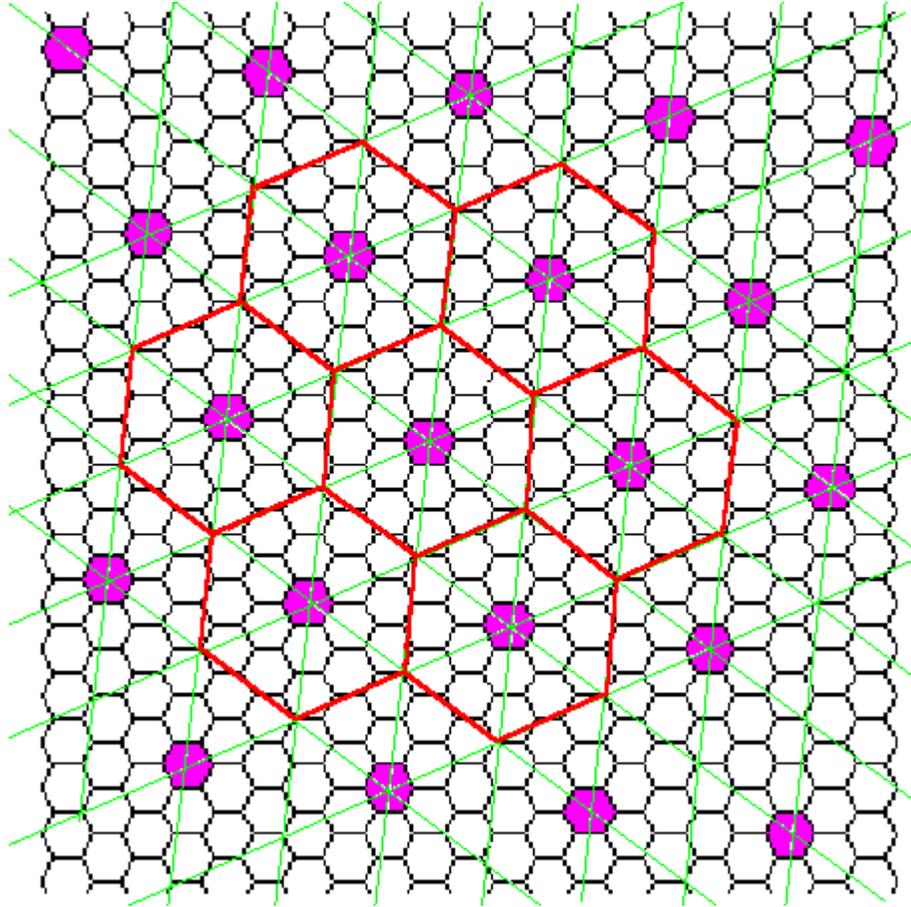
Todos os clusters possuem o mesmo número de células, portanto têm a mesma área. O número de células em cada cluster, em decorrência de  $p$  e  $q$ , será determinado em três passos (a, b, c):

- a. Destacar um conjunto de células cocanais em uma grade hexagonal, como ilustrado na Fig. 2.31, aproveitando o método apresentado por MACDONALD (1979).



**Figura 2.31** Grade hexagonal, destacando um conjunto de células cocanais.

- b. Dividir a grade hexagonal em "hexágonos maiores", todos de mesma área, como ilustrado na Fig. 2.32. Cada hexágono maior está centrado em uma célula cocanal. Portanto, a área de um hexágono maior é igual à área de um cluster.



**Figura 2.32** Grade da Fig. 2.31 ampliada, dividida em "hexágonos maiores", cujas arestas estão em vermelho. A área de um hexágono maior é igual à área de um cluster.

A distância entre os centros de dois "hexágonos maiores" adjacentes é a igual à distância de reuso. O apótema de um hexágono maior é igual a metade da distância de reuso.

c. Calcular a área do hexágono maior. O número de células em cada cluster é dado por:

$$K = \frac{A_{Maior}}{A_R} \tag{2.3.4}$$

Onde:

$A_{Maior}$ : Área do hexágono maior

$A_R$ : Área do hexágono de raio  $R$ .

$$A_R = \frac{3}{2} R^2 \sqrt{3} \quad (2.3.5)$$

A área do hexágono maior pode ser obtida em função da distância de reuso, que é função de  $p$  e  $q$ .

O apótema do hexágono maior é igual a  $D/2$ . Substituindo este valor na expressão (2.3.1)

obtem-se o raio do hexágono maior:

$$R_{Maior} = D \frac{\sqrt{3}}{3}$$

A partir da expressão (2.3.5), obtém-se a área do hexágono maior:

$$A_{Maior} = \frac{3}{2} (R_{Maior})^2 \sqrt{3} = \frac{3}{2} \left( \frac{D\sqrt{3}}{3} \right)^2 \sqrt{3} = D^2 \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Portanto, o número de células em cada cluster é:

$$K = \frac{A_{Maior}}{A_R} = \frac{D^2 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right)}{\left( \frac{3}{2} R^2 \sqrt{3} \right)} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (2.3.6)$$

Rearranjando, obtém-se:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3K} \quad (2.3.7)$$

Substituindo-se (2.3.3) em (2.3.6), vem:

$$K = p^2 + pq + q^2 \quad (2.3.8)$$

Os valores que  $K$  poderá assumir são restritos, pois  $p$  e  $q$  são inteiros positivos. Na Tabela 2.3, apresentam-se valores de  $K$  e  $D$  variando  $[p,q]$  de modo a obter os 12 primeiros valores de  $K$ .

**Tabela 2.3** Doze primeiros valores de  $K$  e as respectivas distâncias de reuso  $D$ , variando o par  $[p,q]$ .

$p$	$q$	$K = p^2 + pq + q^2$	$\frac{D}{R} = \sqrt{3K}$
1	0	1	1,73
	1	3	3
2	0	4	3,46
	1	7	4,58
	2	12	6
3	0	9	5,20
	1	13	6,24
	2	19	7,55
	3	27	9
4	0	16	6,93
	1	21	7,94
5	0	25	8,66

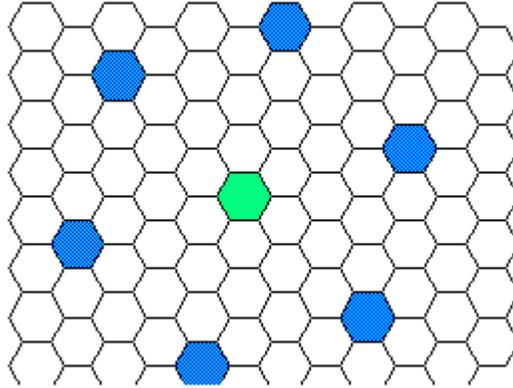
## 2.4 INTERFERÊNCIA COCANAL EM SISTEMAS CELULARES AMPS

### 2.4.1 Canal reverso

Há um compromisso entre a distância de reuso e a relação  $C/I$  do sinal recebido por uma ERB: quanto maior for a distância de reuso, maior será o número de células em cada cluster. A divisão do número total de canais disponíveis (395 em sistemas AMPS) entre um número maior de células reduz a eficiência de entroncamento. Por outro lado, uma redução da separação entre células cocanais aumentaria o nível de interferência recebida pelas ERBs, proveniente das estações móveis operando em células cocanais.

Portanto, é importante determinar a menor distância de reuso suficiente para manter a interferência cocanal em um nível aceitável. Para tanto, considere-se o cenário ilustrado na Fig.

2.33, em que as células são omnidirecionais, e onde são destacadas uma célula central e seis cocanais.



**Figura 2.33** Sistema móvel composto de células omnidirecionais, todas de mesmo raio. Destacam-se uma célula central e as 6 células cocanais mais próximas.

Será calculada a relação  $C/I$  do sinal recebido pela ERB central, proveniente de uma estação móvel localizada na extremidade da célula central. Para simplificar os cálculos, consideram-se perdas de propagação uniformes em toda a área, todas as células hexagonais e de mesmo raio. A parcela mais significativa do sinal interferente provém das 6 células cocanais mais próximas<sup>7</sup>. Nos cálculos a seguir, será desprezada a interferência de outras células cocanais.

O sinal desejado  $C$  é proporcional a  $R^{-\gamma}$ , onde  $R$  é o raio das células e  $\gamma$  é o expoente de perdas de propagação.

O sinal interferente  $I$  é proporcional a  $D^{-\gamma}$ , onde  $D$  é a distância de reuso. Logo,

$$\frac{C}{I} \approx \frac{R^{-\gamma}}{6 \times D^{-\gamma}} = \frac{1}{6} \left( \frac{D}{R} \right)^{\gamma} \quad (2.4.1)$$

Considerando-se a identidade  $\frac{D}{R} = \sqrt{3K}$ , onde  $K$  é o padrão de reuso, vem:

$$\frac{C}{I} \approx \frac{1}{6}(3K)^{\gamma/2} \quad (2.4.2)$$

A Tabela 2.4 contém os doze primeiros valores de  $K$ , variando o par  $[p,q]$ . São listadas as correspondentes relações  $D/R$  e a relação  $C/I$  adotando-se o valor típico  $\gamma = 4$  (LEE, 1993, 1995).

**Tabela 2.4** Doze primeiros valores de  $K$ , variando o par  $[p,q]$ ; respectivos valores da relação entre distância de reuso e o raio das células,  $D/R$ ; relação  $C/I$  para  $\gamma = 4$ .

$p$	$q$	$K = p^2 + pq + q^2$	$\frac{D}{R} = \sqrt{3K}$	$\frac{C}{I} \text{ (dB)} = 10 \log \left[ \frac{1}{6}(3K)^{\gamma/2} \right]$ (com $\gamma = 4$ )
1	0	1	1,73	1,8
	1	3	3	11,3
2	0	4	3,46	13,8
	1	7	4,58	18,7
	2	12	6	23,3
3	0	9	5,20	20,9
	1	13	6,24	24,0
	2	19	7,55	27,3
	3	27	9	30,4
4	0	16	6,93	25,8
	1	21	7,94	28,2
5	0	25	8,66	29,7

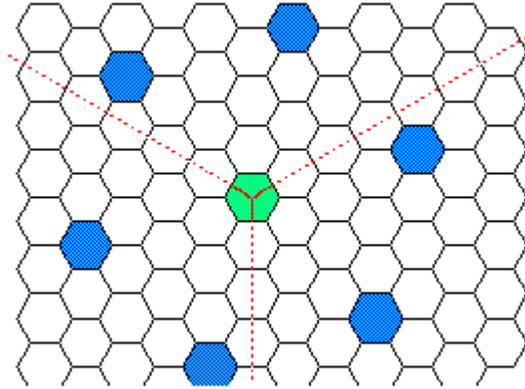
Na Tabela 2.4, observa-se que o menor padrão de reuso que atende o quesito  $\frac{C}{I} \geq 18 \text{ dB}$  é  $K=7$ .

### 2.4.2 Setorização

Uma técnica comumente utilizada para reduzir níveis de interferência cocanal é dividir cada célula em setores. Três e seis setores são configurações típicas (YACOUB, 1993). Cada setor opera com um conjunto de canais diferente e é iluminado por uma antena diretiva. A Fig. 2.34

<sup>7</sup> LEE (1995), exemplo 2.6.

apresenta o mesmo cenário da Fig. 2.33, trocando a célula central omnidirecional por uma célula dividida em 3 setores de 120°.



**Figura 2.34** Sistema móvel composto de células de mesmo raio. Destacam-se uma célula central e as 6 células cocanais mais próximas. A célula central é dividida em três setores de 120°.

Após a setorização da célula central, o número de células cocanais que interferem em cada setor é 2, e não 6. Portanto, a relação  $C/I$  em cada setor é:

$$\frac{C}{I} \approx \frac{R^{-\gamma}}{2 \times D^{-\gamma}} = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{R} \right)^{\gamma} \quad (2.4.3)$$

Substituindo  $\gamma = 4$  e  $D/R = 4,58$  (sistema com padrão de reuso 7), vem:

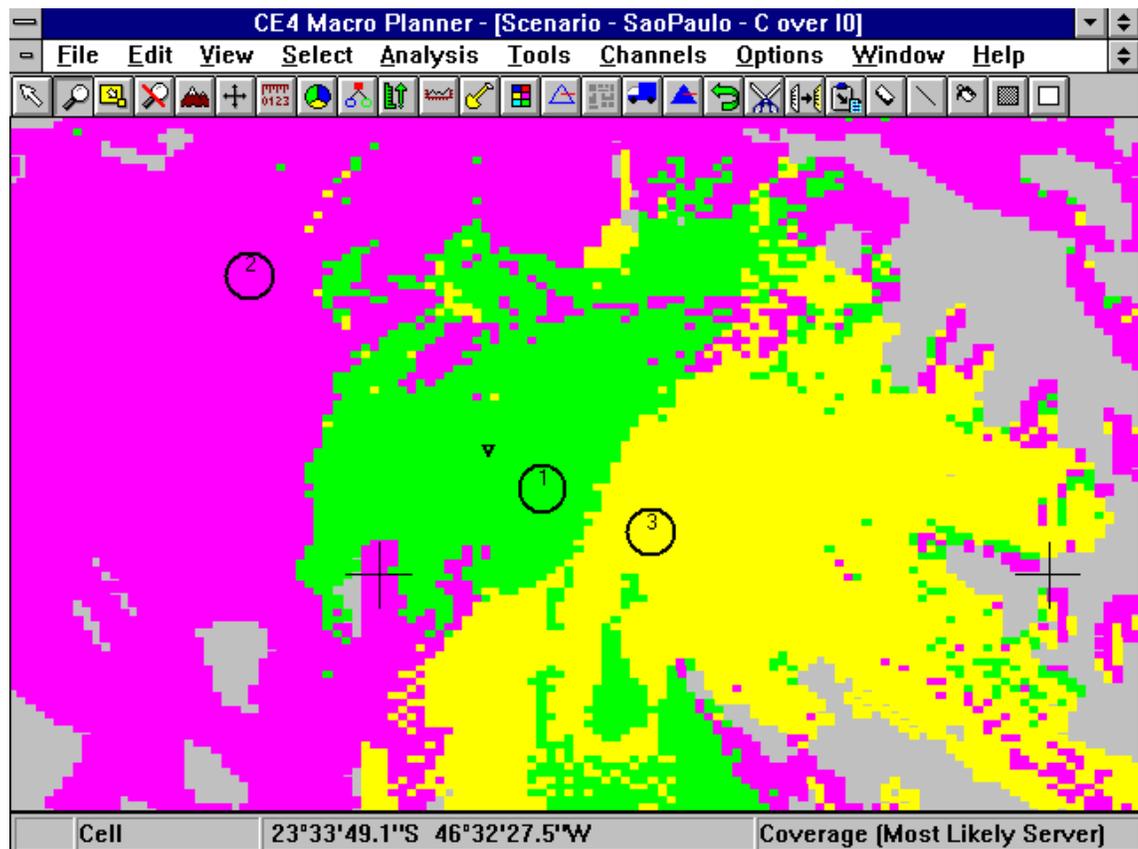
$$\frac{C}{I} (\text{dB}) \approx 10 \log \left[ \frac{1}{2} (4,58)^4 \right] = 23,4 \text{dB}$$

A desvantagem da setorização de células é que a divisão dos canais disponíveis entre os setores reduz a eficiência de entroncamento do sistema celular. O cálculo da expressão (2.4.3) não considera imperfeições do diagrama de radiação das antenas.

### 2.4.3 Cálculo da relação $C/(I + N_f)$ no canal direto

A Fig. 2.35 representa um sistema celular AMPS com ERBs numeradas de 1 a 3. Cada cor representa a região de cobertura de uma ERB. As regiões onde o nível de sinal está abaixo de -115 dBm estão representadas em cinza.

Procura-se calcular a relação  $C/(I + N_f)$  em um ponto escolhido deste cenário. Para simplificar os cálculos, foram atribuídos os mesmos canais às 3 ERBs deste cenário. O ponto escolhido para o cálculo de níveis de sinal está marcado com  $\nabla$ , e faz parte da célula n° 1.



**Figura 2.35** Sistema celular AMPS com ERBs cocanais numeradas de 1 a 3. Na análise apresentada, cada cor representa a região de cobertura de uma ERB. As regiões onde o nível de sinal está abaixo de -115 dBm estão representadas em cinza.

No ponto  $\nabla$ :

O nível de sinal recebido da célula n° 1 é  $C = -67,5$  dBm (sinal desejado).

O nível de sinal recebido da célula n° 2 é  $I_2 = -89,5$  dBm (interferência).

O nível de sinal recebido da célula n° 3 é  $I_3 = -89,5$  dBm (interferência).

O nível de interferência cocanal é calculado pela soma entre  $I_2$  e  $I_3$ :

$$I = 10 \log \left( 10^{I_2/10} + 10^{I_3/10} \right) \cong -86,5 \text{ dBm}$$

Foi visto na Notação que o nível de ruído térmico em um receptor com largura de banda de 30 kHz e figura de ruído 8 dB é  $N_t = -121,2$  dBm. Este valor pode ser desprezado em relação ao valor encontrado para  $I$  neste exemplo. O valor *default* adotado pelo software de predição para a figura de ruído de uma estação móvel é 8 dB. Assim,  $N_t + I \cong -86,5$  dBm. Portanto:

$$C/(I + N_t) = -67,5 - (-86,5) = 19 \text{ dB}$$

Na análise da Fig. 2.36, as cores representam faixas de níveis de  $C/(I + N_t)$  recebidos por uma estação móvel. No mesmo ponto marcado com  $\nabla$  este nível está entre 18 e 19 dB. O valor calculado foi 19 dB.

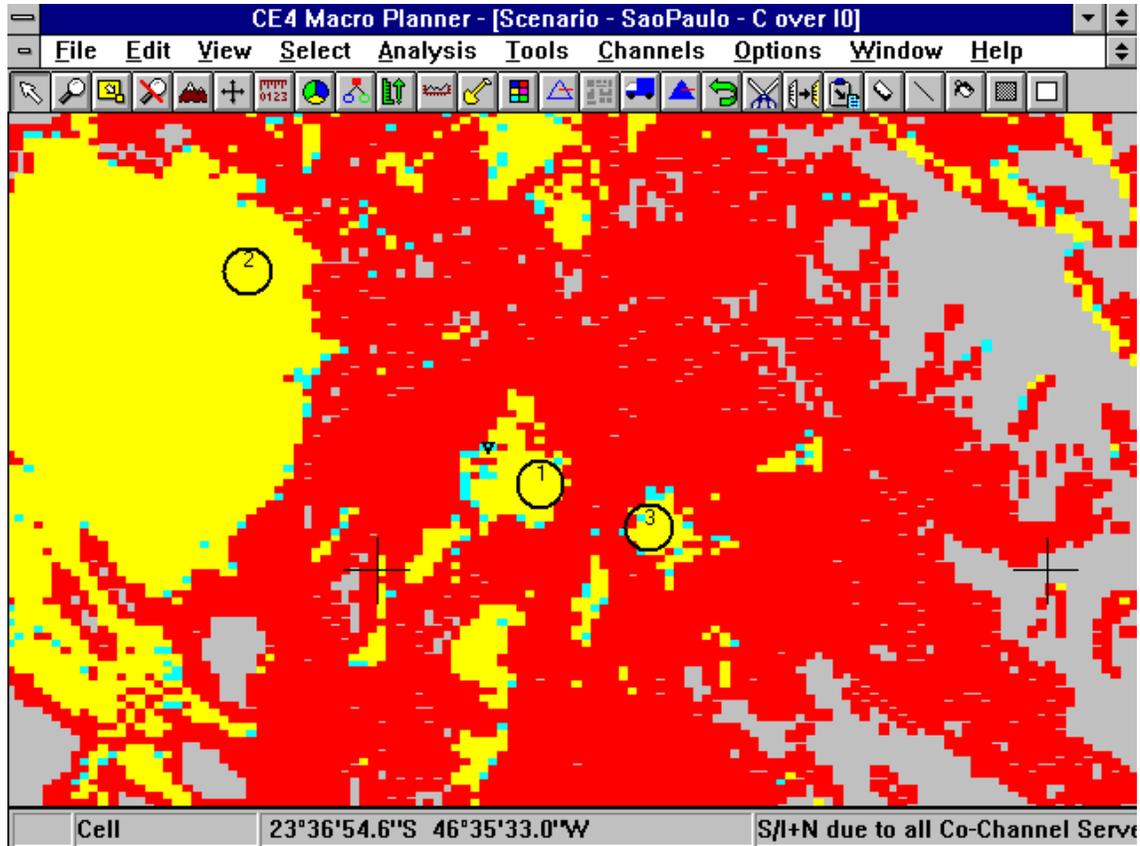
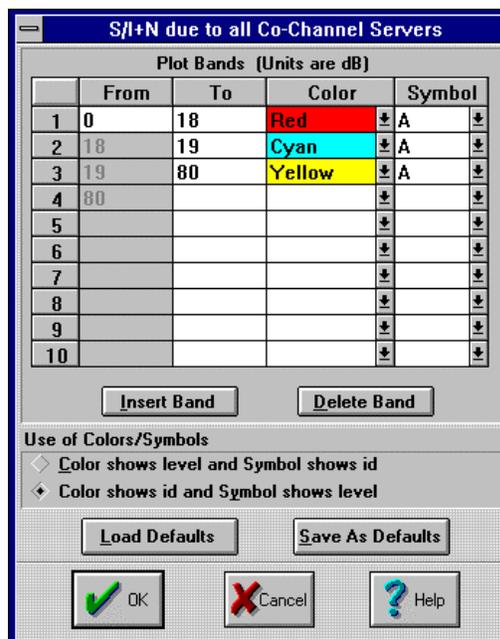
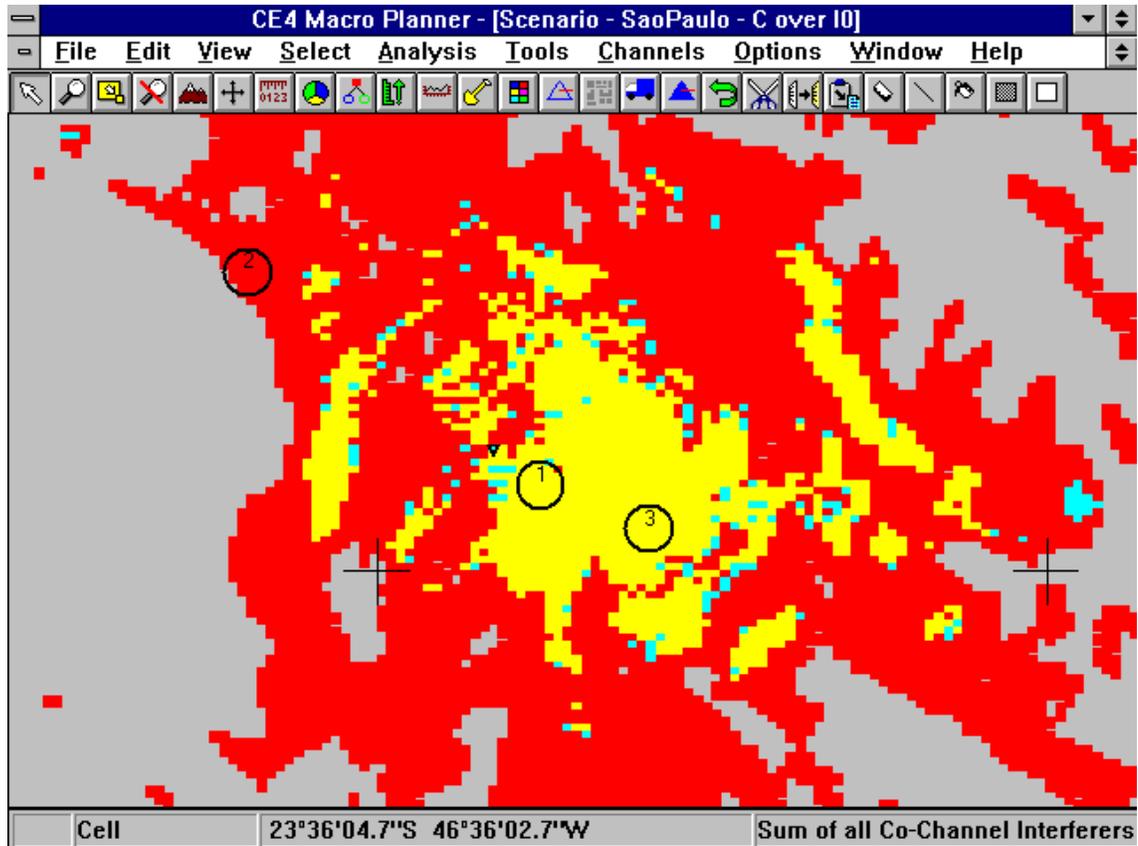


Figura 2.36 Cenário de um sistema celular AMPS com ERBs cocanais numeradas de 1 a 3, todas em operação. Nesta análise, as cores representam faixas de níveis de  $C/(I + N_t)$  recebido por uma estação móvel. As legendas são:



Na análise da Fig. 2.37, as cores representam faixas de níveis de interferência cocanal ( $I$ ) recebida por uma estação móvel. No mesmo ponto marcado com  $\nabla$  este nível está entre -86 e -87 dBm. O valor calculado de  $I$  foi -86,5 dBm.



**Figura 2.37** Cenário de um sistema celular AMPS com ERBs cocanais numeradas de 1 a 3. As três ERBs estão em operação. Nesta análise, as cores representam faixas de níveis de interferência cocanal recebida por uma estação móvel ( $I$ ). As legendas são:

**Sum of all Co-Channel Interferers**

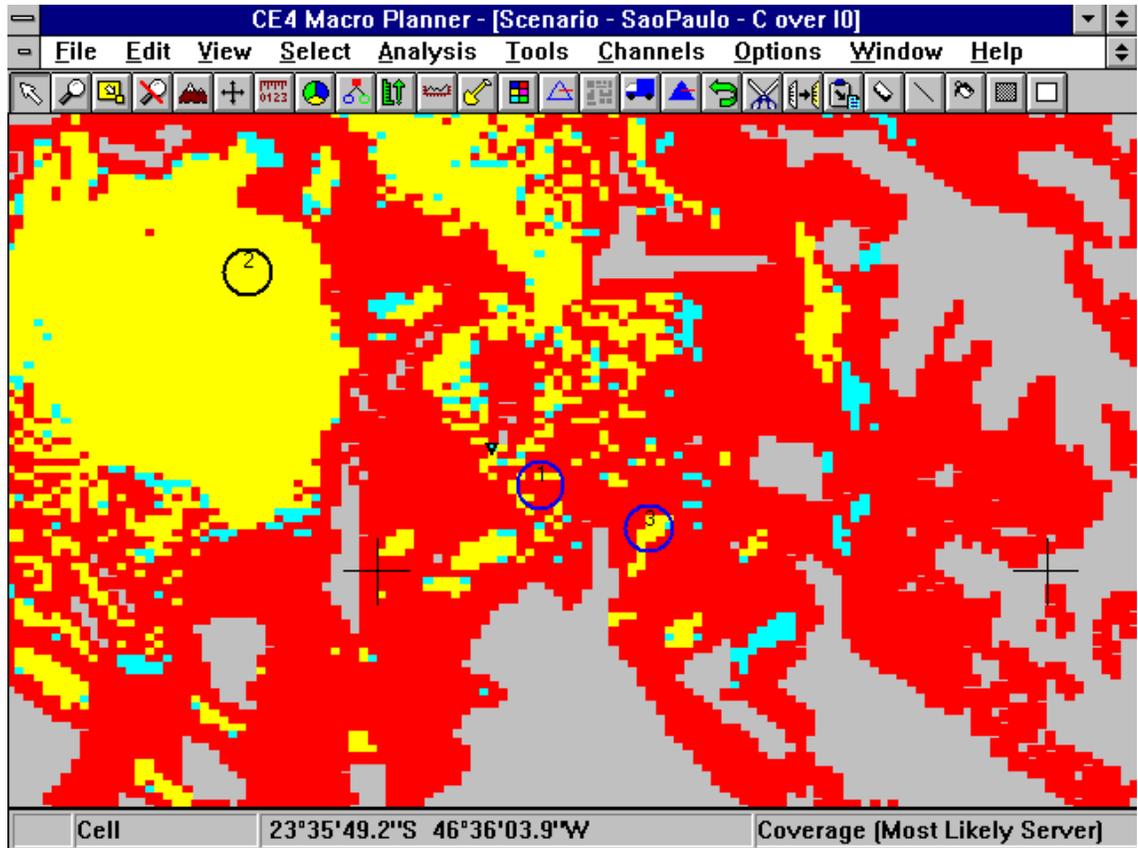
Plot Bands (Units are dBm)

	From	To	Color	Symbol
1	0	-86	Yellow	A
2	-86	-87	Cyan	A
3	-87	-115	Red	A
4	-115			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Use of Colors/Symbols

- Color shows level and Symbol shows id
- Color shows id and Symbol shows level

Na análise da Fig. 2.38, as cores representam faixas de níveis de sinal recebido por uma estação móvel, proveniente da célula n° 2. No ponto marcado com ∇ este nível está entre -89 e -90 dBm. Para o cálculo de  $C/(N_f + I)$ , foi adotado o valor médio desta faixa,  $I_2 = -89,5$  dBm.



**Figura 2.38** Cenário de um sistema celular AMPS com ERBs cocanais numeradas de 1 a 3. A célula n° 2 está ativa; as demais não estão em operação. Nesta análise, as cores representam faixas de níveis de sinal recebido por uma estação móvel, proveniente da célula n° 2. As legendas são:

**Coverage [Most Likely Server]**

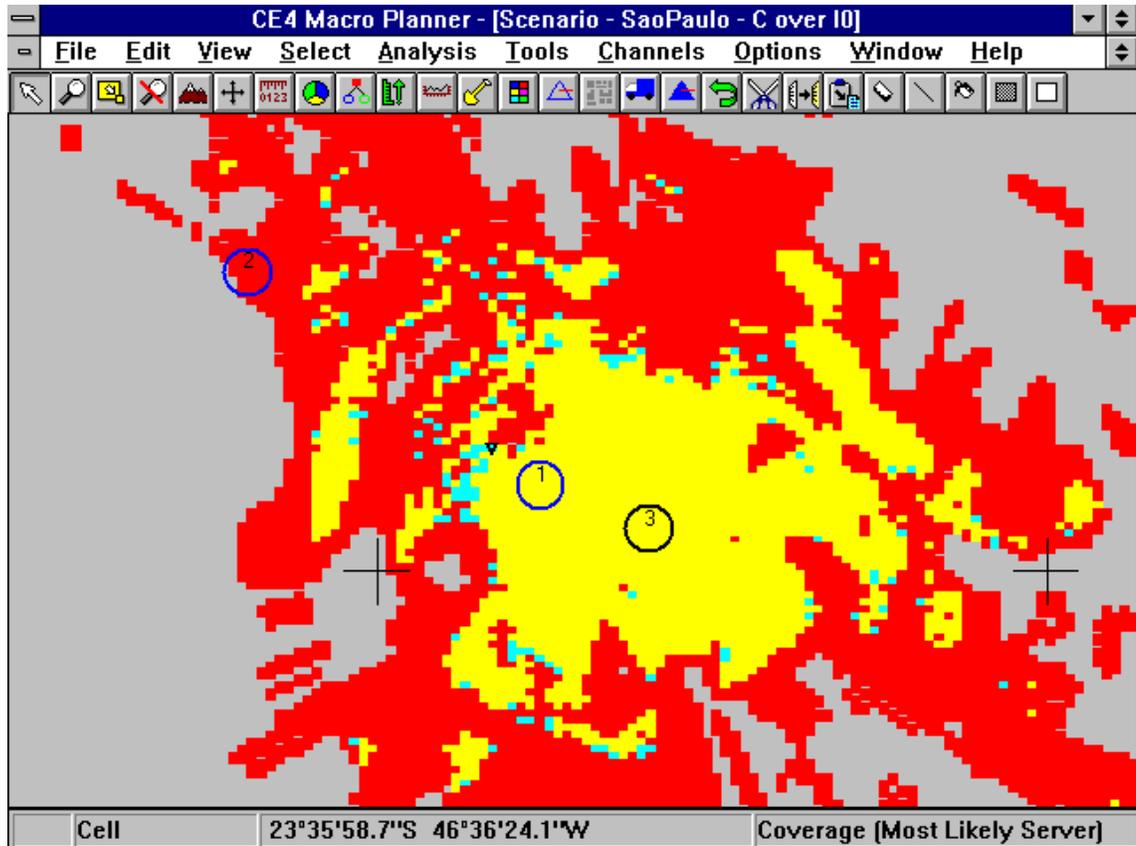
Plot Bands (Units are dBm)

	From	To	Color	Symbol
1	0	-89	Yellow	A
2	-89	-90	Cyan	A
3	-90	-115	Red	A
4	-115			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Use of Colors/Symbols

Color shows level and Symbol shows id  
 Color shows id and Symbol shows level

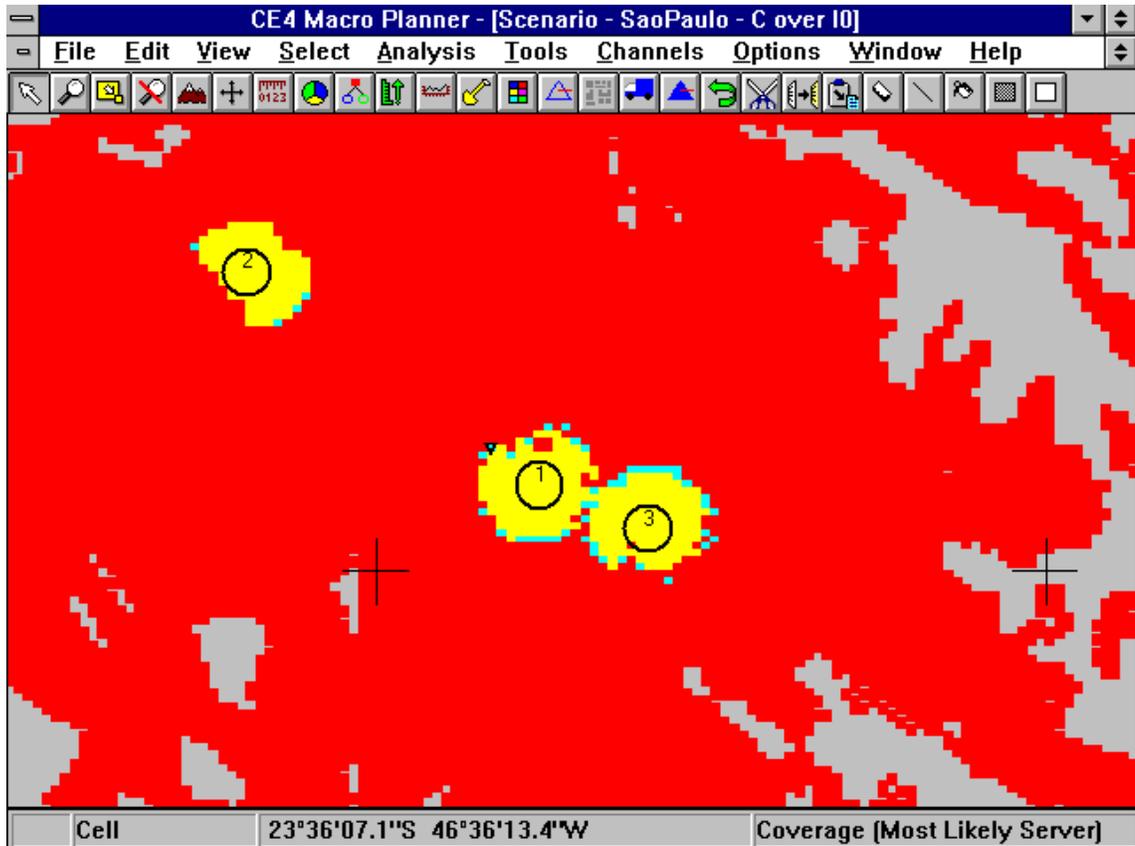
Na análise da Fig. 2.39, as cores representam faixas de níveis de sinal recebido por uma estação móvel, proveniente da célula n° 3. No mesmo ponto marcado com ∇ este nível está entre -89 e -90 dBm. Para o cálculo de  $C/(I + N_i)$ , foi adotado o valor médio desta faixa,  $I_3 = -89,5$  dBm.



**Figura 2.39** Cenário de um sistema celular AMPS com ERBs cocanais numeradas de 1 a 3. A célula n° 3 está ativa; as demais não estão em operação. Nesta análise, as cores representam faixas de níveis de sinal recebido por uma estação móvel, proveniente da célula n° 3. As legendas são as mesmas da Fig. 2.38 anterior.

Na análise da Fig. 2.40, as cores representam faixas de níveis de sinal desejado recebido por uma estação móvel,  $C$ . No mesmo ponto marcado com  $\nabla$  este nível está entre -67 e -68 dBm.

Para o cálculo de  $C/(I + N_f)$ , foi adotado o valor médio desta faixa,  $C = -67,5$  dBm.



**Figura 2.40** Cenário de um sistema celular AMPS com ERBs cocanais numeradas de 1 a 3. As três ERBs estão em operação. Nesta análise, as cores representam faixas de níveis de sinal desejado recebido por uma estação móvel. As legendas são:

**Coverage [Most Likely Server]**

Plot Bands (Units are dBm)

	From	To	Color	Symbol
1	0	-67	Yellow	A
2	-67	-68	Cyan	A
3	-68	-115	Red	A
4	-115			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Use of Colors/Symbols

- ◆ Color shows level and Symbol shows id
- ◆ Color shows id and Symbol shows level

## 2.5 TABELAS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS AMPS

Para facilitar a elaboração de planos de reuso de frequências em sistemas AMPS, os canais de cada bloco (A expandido e B expandido) podem ser divididos em grupos. Em Inglês, o termo utilizado para denominar estes grupos é o mesmo utilizado para denominar o conjunto de canais em uma célula, ou seja, *channel set*.

Em um sistema celular com padrão de reuso  $K = 7$  e células de 3 setores, existem 21 setores em cada cluster. Como visto no Item 2.1, existem 21 canais de controle em cada bloco (A e B expandidos). Desta forma, é conveniente dividir os 395 canais de cada bloco em 21 grupos, como mostram as Tabelas 2.5 e 2.6. A divisão dos canais em grupos possibilita a alocação de um grupo de canais para cada setor de um cluster.

Para designar os grupos, foram utilizadas as letras A, B, C, D, E, F, G e os números de 1 a 3. Nota-se que três grupos de canais designados com a mesma letra (por exemplo: E1, E2 e E3) são separados de 7 canais AMPS consecutivos (equivalente a 210 kHz).

Os 395 canais de um mesmo bloco não podem ser distribuídos igualmente entre os grupos, pois a divisão  $395 \div 21 = 18,8$  não é inteira:

- No bloco A, os grupos C1, E3, F3 e G3 têm 18 canais de voz. Os demais têm 19 canais de voz.
- No bloco B, os grupos E1, E3, F3 e G3 têm 18 canais de voz. Os demais têm 19 canais de voz.

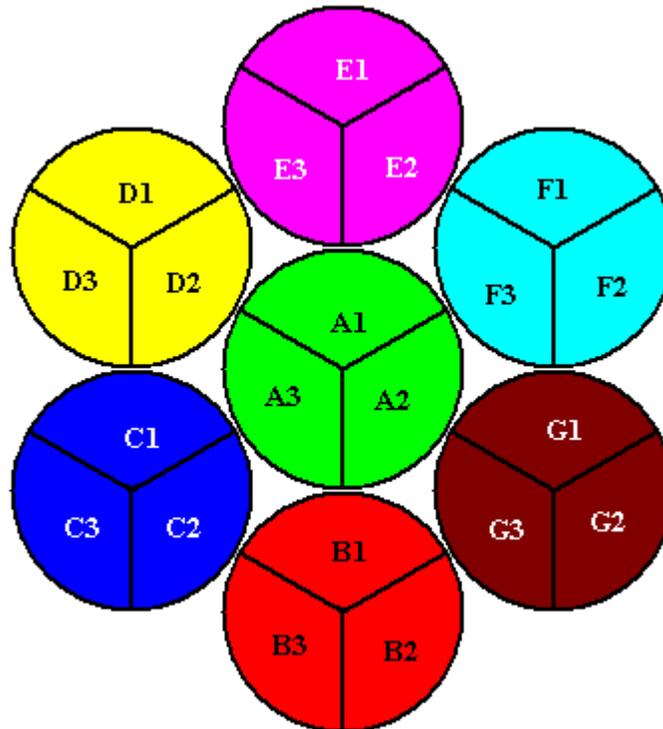
Tabela 2.5 Distribuição dos canais AMPS em grupos - bloco A expandido.

Tabela Geral de Alocação de Canais: Bloco A expandido																						
Sistema AMPS																						
Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	AI	BI	CI	DI	EI	FI	GI	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	
C a n a i s d e v o z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106
	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127
	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148
	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169
	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211
	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232
	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274
	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295
	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312				
		673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693
		694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714
		715	716																			
		1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023						
Canais de controle	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	313	314	315	

Tabela 2.6 Distribuição dos canais AMPS em grupos - bloco B expandido.

Tabela Geral de Alocação de Canais: Bloco B expandido																						
Sistema AMPS																						
Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	A1	BI	CI	DI	E1	F1	G1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	
Canais controle	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	
	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	
	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	
	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	
	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	
	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	
	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	
	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	
	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	
	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	
	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	
	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	
	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	
	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	
	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	
	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666				
						717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	
	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	
	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	
	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	
	796	797	798	799																		

Na Fig. 2.41, apresenta-se um exemplo de um cluster formado por 7 células, cada célula com 3 setores. A divisão dos 395 canais em 21 grupos possibilitou a alocação de um grupo de canais para cada setor. Procura-se separar ao máximo as frequências dos canais que estão dentro de uma mesma célula. Assim, cada célula tem 3 grupos de canais de mesma letra, ou seja: (A1, A2, A3); (B1, B2, B3), etc.



**Figura 2.41** Um exemplo distribuição de grupos de canais entre os setores de um cluster com 7 células de 3 setores.

---

# CDMA

## 3.1 ESPALHAMENTO ESPECTRAL

### 3.1.1 Introdução

A comunicação por espalhamento espectral (*spread spectrum*) é uma técnica de origem militar em que o sinal transmitido (que será denominado  $s(t)$ ) ocupa uma banda superior à mínima necessária para a informação que está sendo transmitida. O alargamento da banda é obtido por meio de um sinal codificador, que será denominado  $c(t)$ . Para demodular o sinal corretamente, a recepção precisa ser sincronizada com o mesmo  $c(t)$  para concentrar o sinal na banda originalmente ocupada. É possível transmitir vários sinais na mesma banda através do uso de seqüências de códigos distintos e com o mínimo de correlação possível.

O espalhamento da banda do sinal tem como função, entre outras, aumentar a privacidade das informações nele contidas e reduzir o efeito de interferências, sejam elas propositais ou não.

Dentre as técnicas utilizadas para o espalhamento espectral, destacam-se:

DS: o código causa transição de fase do sinal modulado. Esta é a técnica que foi adotada para aplicação em sistemas móveis celulares com tecnologia CDMA, que será tratada neste trabalho. Um padrão interino para compatibilidade entre ERBs e estações móveis em sistemas celulares com tecnologia de acesso CDMA é o TIA/EIA/IS-95 (1993), publicado pela entidade de padronização norte-americana *Telecommunications Industry Association*. Os sistemas CDMA considerados neste trabalho seguem este padrão interino.

TH: o tempo de transmissão é dividido em quadros, que são subdivididos em *time slots*. Em cada quadro, o sinal modulado encontra-se em um time slot diferente, segundo um código específico.

FH: a portadora muda de frequência em intervalos regulares de tempo, segundo um código específico também.

### 3.1.2 Espalhamento tipo DS

A forma mais simples de um sinal modulado DS pode ser escrita como (JESZENSKY, 1992; SIMON et al., 1994):

$$s(t) = (\sqrt{2P})d(t)c(t) \cos(\omega_0 + \theta) \quad (3.1.1)$$

onde:

$P$ : potência do sinal.

$d(t)$ : sinal que contém os bits da informação que se deseja transmitir. Para qualquer  $t$ ,  $d(t)$  só pode ter valor +1 ou -1.

$c(t)$ : sinal de código de espalhamento. Para qualquer  $t$ ,  $c(t)$  também só pode ter valor +1 ou -1.

$\omega_0$ : freqüência angular da portadora, em rad/s =  $2\pi \times$  freqüência da portadora, em Hz. Os sistemas CDMA tratados neste trabalho operam na mesma faixa alocada para sistemas AMPS, ou seja: de 824 a 849 e 869 a 894 MHz.

$\theta$ : fase da portadora.

Sejam ainda:

$T_b$ : duração de um bit de informação.

$R_b$ : taxa de transmissão de bits de informação  $R_b = \frac{1}{T_b}$

$T_c$ : duração de um *chip* da seqüência de espalhamento.

$R_c$ : taxa de transmissão de chips de código  $R_c = \frac{1}{T_c}$

Para se obter o espalhamento do sinal, é necessário que  $R_c > R_b$ . O sinal  $s(t)$  somente poderá ser decodificado por um receptor que possua a mesma seqüência  $c(t)$  sincronizada, por multiplicação, pois  $c^2(t) = 1$ . O sinal  $c(t)$  é originado por uma seqüência que pode ser representada por  $\{C\}$ . Seja  $C[k]$  um elemento genérico desta seqüência.  $C[k] \in \{0,1\}$  para qualquer  $k$  inteiro. Cada elemento da seqüência bipolarizada correspondente a  $C[k]$  é dado por  $(-1)^{C[k]}$ .

Define-se como "ganho de processamento":

$$G_p = \frac{R_c}{R_b} \quad (3.1.2)$$

Nos sistemas CDMA considerados neste trabalho:

$$R_b \leq 9.600 \text{ bps} \quad \text{e} \quad R_c = 1,2288 \times 10^6 \text{ chips/s}$$

O ganho de processamento pode ser calculado com  $R_b = 9.600$  bps:

$$G_p = \frac{1,2288 \times 10^6}{9.600} = 128$$

Os chips do código são sincronizados com os bits de informação de modo que cada bit corresponda a uma seqüência com número inteiro de chips (neste caso, 128 chips).

### 3.1.3 Densidade espectral de potência de um sinal gerado por uma SMC

Procura-se obter a DEP do sinal  $c(t)$ , admitindo-se que seu código seja gerado por uma SMC. Uma SMC é obtida por recursão linear a partir de um registrador de deslocamentos. Seja  $n$  o número de estágios deste registrador. Então, o período da SMC normalizado para  $T_c = 1$  é dado por:

$$L = 2^n - 1 \quad (3.1.3)$$

Informações detalhadas sobre geração de SMC e suas propriedades podem ser encontradas nas referências JESZENSKY (1991, 1994); SARWATE, PURSLEY (1980); PICKHOLZ, SCHILLING, MILSTEIN (1982).

Assim como  $\{C\}$ , a seqüência bipolarizada correspondente a ela é um sinal discreto e periódico de período fundamental  $L$ . Portanto, sua função de autocorrelação também é periódica de mesmo período fundamental e pode ser expressa por:

$$R[k] = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} (-1)^{C[m]} (-1)^{C[m+k]}$$

Calculam-se a seguir os valores de  $R[k]$  para apenas um período,  $0 \leq k \leq L - 1$ :

$$R[k = 0] = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} (-1)^{C[m]} (-1)^{C[m+0]} = \frac{1}{L} \times L = 1 \quad (3.1.4)$$

Para se obter  $R[k]$  com  $k \neq 0$ , devem ser consideradas as seguintes propriedades de SMC:

- A soma de uma SMC com uma fase própria da mesma resulta em outra fase da mesma SMC.

- Há um balanço aproximado entre "zeros" e "uns", ou seja, em um período existem  $2^{n-1}$  "uns" e  $2^{n-1} - 1$  "zeros".

Estas propriedades podem ser encontradas nas mesmas referências JESZENSKY (1991, 1994); SARWATE, PURSLEY (1980); PICKHOLZ, SCHILLING, MILSTEIN (1982). Portanto:

$$R[k] = -\frac{1}{L} \text{ para } k \neq 0 \text{ no intervalo estabelecido (de 0 a } L - 1). \quad (3.1.5)$$

As expressões (3.1.4) e (3.1.5) serão utilizadas para obter a função de autocorrelação de  $c(t)$ ,  $R(\tau)$ , por analogia.

$c(t)$  apresentado na expressão (3.1.1) é um sinal em banda base com potência unitária e pode ser expresso por um trem de pulsos retangulares de largura  $T_c$ :

$$c(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (-1)^{C[k]} \Pi\left(\frac{t - kT_c}{T_c}\right) \quad (3.1.6)$$

Assim,  $c(t) = \pm 1$  em qualquer intervalo  $kT_c \leq t < (k + 1)T_c$  com  $k$  inteiro.

Analogamente a (3.1.6),  $d(t)$  pode ser expresso como um trem de pulsos retangulares de largura  $T_b$ .

Partindo-se do princípio que  $c(t)$  é periódico de período fundamental  $LT_c$  conhecido, sua função de autocorrelação  $R(\tau)$  também é periódica, de mesmo período fundamental e pode ser expressa por:

$$R(\tau) = \frac{1}{LT_c} \int_0^{LT_c} c(t)c(\tau + t)dt$$

$R(\tau)$  pode ser calculada<sup>8</sup> em determinados valores de  $\tau$  para o intervalo  $0 \leq \tau < LT_c$

---

<sup>8</sup> JESZENSKY, P. J. E., anotações de aula do curso PEE-869: "Teoria Básica e Aplicações de Sequências de Códigos", 1996.

- Para  $\tau = 0$ , o resultado é análogo a (3.1.4):

$$R(0) = \frac{1}{LT_c} \int_0^{LT_c} c^2(t) dt = 1 \quad (3.1.7)$$

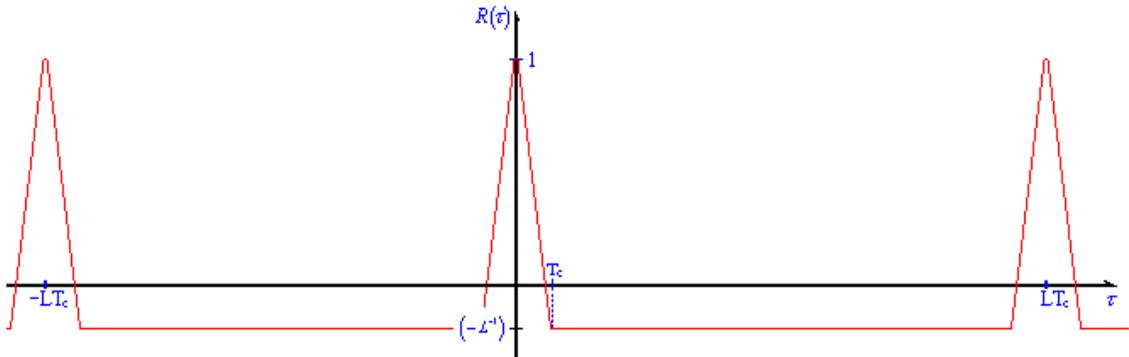
- Para  $\tau = kT_c$  com  $k \neq 0$ :

$$R(kT_c) = \frac{1}{LT_c} \int_0^{LT_c} c(t)c(kT_c + t) dt$$

Todos os pulsos dentro desta integral estão deslocados de um número inteiro de chips. Portanto, analogamente a (3.1.5):

$$R(kT_c) = -\frac{1}{L} \quad (3.1.8)$$

Para os demais valores de  $\tau$ , a autocorrelação  $R(\tau)$  pode ser obtida por interpolação linear a partir dos resultados apresentados em (3.1.7) e (3.1.8). Seu gráfico é ilustrado na Fig. 3.1.



**Figura 3.1** Função de autocorrelação de  $c(t)$ ,  $R(\tau)$ .

A expressão que corresponde ao gráfico de  $R(\tau)$  e que atende os resultados (3.1.7) e (3.1.8) é:

$$R(\tau) = -\frac{1}{L} + \frac{L+1}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Lambda\left(\frac{\tau - kLT_c}{T_c}\right) \quad (3.1.9)$$

A função DEP de  $c(t)$  é dada pela transformada de Fourier de sua autocorrelação, que será calculada por partes:

$$DEP_c(f) = TF\{R(\tau)\}$$

$$TF\left\{-\frac{1}{L}\right\} = -\frac{1}{L}\delta(f)$$

$$TF\left\{\Lambda\left(\frac{\tau - kLT_c}{T_c}\right)\right\} = T_c \operatorname{sinc}^2(fT_c) \exp(-j2\pi f k LT_c)$$

Considerando-se a identidade:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi f k LT_c) = \frac{1}{LT_c} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{k}{LT_c}\right) \quad (3.1.10)$$

Conclui-se que:

$$\begin{aligned} TF\left\{-\frac{1}{L} + \frac{L+1}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Lambda\left(\frac{\tau - kLT_c}{T_c}\right)\right\} &= \\ &= -\frac{1}{L}\delta(f) + \left(\frac{L+1}{L}\right) T_c \operatorname{sinc}^2(fT_c) \frac{1}{LT_c} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{k}{LT_c}\right) \end{aligned}$$

e portanto:

$$DEP_c(f) = \frac{\delta(f)}{L^2} + \frac{(L+1)}{L^2} \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{k}{L}\right) \delta\left(f - \frac{k}{LT_c}\right) \quad (3.1.11)$$

O gráfico correspondente ao resultado apresentado em (3.1.11) é representado nas Figs. 3.2 e

3.3 com  $L = 127$  e  $\frac{1}{T_c} = 1,2288 \text{ MHz}$ . Suas componentes espectrais ("raias") são afastadas de:

$$\Delta f = \frac{1}{LT_c} = \frac{1,2288 \times 10^6}{127} = 9.676 \text{ Hz}.$$

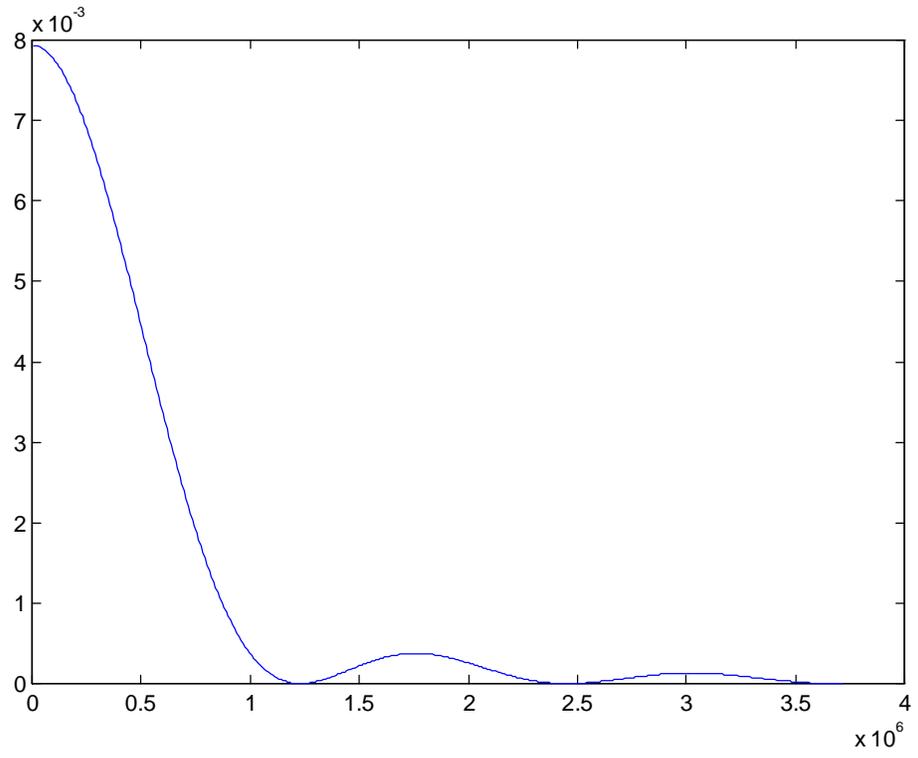
É possível visualizar as raias individualmente na Fig. 3.3.

Conforme a expressão (3.1.11), a potência associada a uma raia com  $k \neq 0$  é  $\frac{(L+1)}{L^2} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{k}{L}\right)$

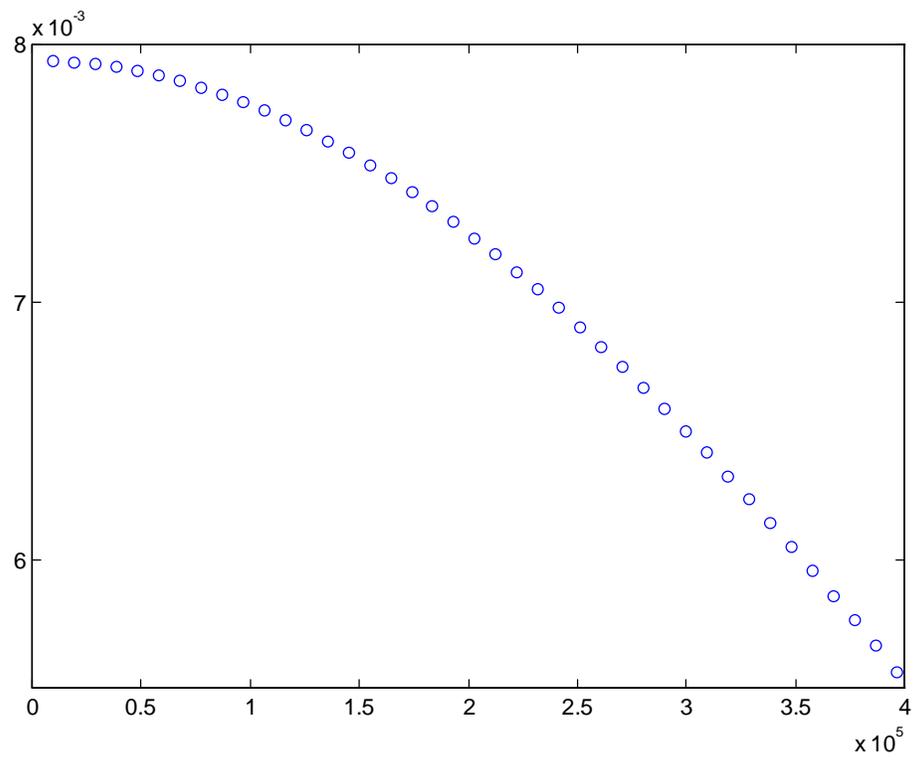
Note-se que a raia em  $k = 0$  tem valor  $\frac{1}{L^2} = \frac{1}{127^2} = 6,2 \times 10^{-5}$ .

A DEP se anula em frequências múltiplas de  $\frac{1}{T_c} = 1,2288 \text{ MHz}$ . O primeiro nulo ocorre na raia

$k = 127$ .



**Figura 3.2** DEP de  $c(t)$ . Software utilizado: Matlab for Windows.



**Figura 3.3** DEP de  $c(t)$ , para  $f$  entre 0 e 400 kHz, para possibilitar a visualização das raias. O espaçamento entre raias consecutivas é 9.676 Hz. Software utilizado: Matlab for Windows.

Em sistemas celulares que seguem o padrão IS-95, as seqüências utilizadas para espalhamento são SMC modificadas inserindo um "zero" adicional após  $n$  "zeros" consecutivos. Assim, a seqüência fica completamente balanceada e seu comprimento passa a ser  $L = 2^n$ .

### 3.1.4 Fração da potência de $c(t)$ contida em uma banda restrita

A potência do sinal  $c(t)$  é unitária. Conforme visto na expressão (3.1.7),  $R(0) = 1$ .

A potência de  $c(t)$  pode também ser calculada pela soma de todas as suas raias:

$$\begin{aligned}
 P_c &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{L^2} \delta(f) + \frac{(L+1)}{L^2} \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{k}{L}\right) \delta\left(f - \frac{k}{LT_c}\right) \right] df = \\
 &= \frac{1}{L^2} + \frac{(L+1)}{L^2} \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{k}{L}\right) \tag{3.1.12}
 \end{aligned}$$

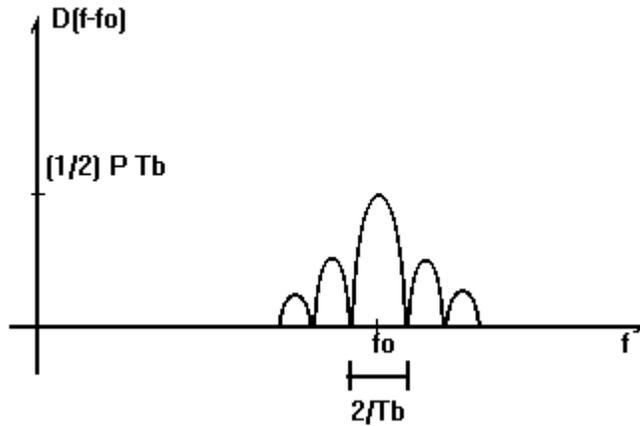
O software Matlab permite realizar a soma de um determinado número de raias através do comando "sum". Assim, verifica-se que a soma das raias de  $k = -10.000$  até  $10.000$  é igual a 0,9987.

A potência do sinal correspondente ao lóbulo principal de largura  $2/T_c$ , contida na faixa entre os nulos em -1,2288 e 1,2288 MHz, é dada pela soma das raias de  $k = -127$  até  $+127$ , que é igual a 0,9021. Portanto, a fração da potência de  $c(t)$  contida neste intervalo é 90,21 %.

A potência do sinal correspondente a uma banda de largura  $1/T_c$ , contida na faixa entre -619,2 e 619,2 kHz é dada pela soma das raias de  $k = -64$  até  $+64$ , que é igual a 0,7783. Portanto, a fração da potência de  $c(t)$  contida neste intervalo é 77,83 %.

### 3.1.5 Robustez de sistemas SS - DS contra sinais interferentes de banda estreita

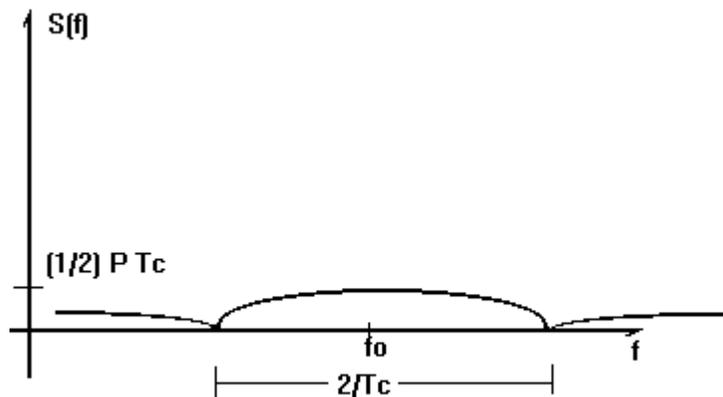
A Transformada de Fourier de  $d(t)$  será denotada por  $TF\{d(t)\} = D(f)$ . O sinal  $d(t)$  modulado, porém não espalhado, é expresso por  $(\sqrt{2P})d(t)\cos(\omega_0 t + \theta)$ . Sua DEP é representada na Fig. 3.4.



**Figura 3.4** DEP de um sinal antes do espalhamento por uma seqüência de código.

O sinal  $s(t)$  modulado e espalhado é expresso por (3.1.1):

$$s(t) = (\sqrt{2P})d(t)c(t) \cos(\omega_0 t + \theta). \text{ Sua DEP é representada na Fig. 3.5.}$$



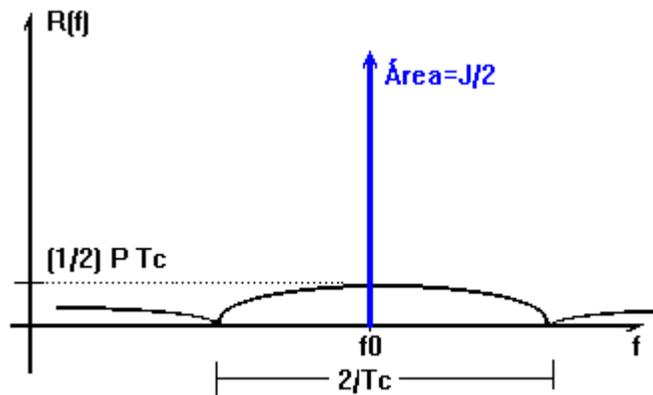
**Figura 3.5** DEP de um sinal após espalhamento por uma seqüência de código à taxa  $1/T_c$ .

Para verificar a robustez do espalhamento espectral em relação a interferências, considere-se o sinal espalhado  $s(t)$  na presença de um tom de interferência de potência  $J$ ,  $j(t)$ :

$$r(t) = s(t) + j(t)$$

$$\text{onde } j(t) = \sqrt{2J} \cos(\omega_0 t + \phi)$$

A DEP de  $r(t)$  é representada na Fig. 3.6.



**Figura 3.6** DEP de um sinal espalhado, na presença de um tom interferente de banda mais estreita e potência  $J$ , antes da decodificação no receptor.

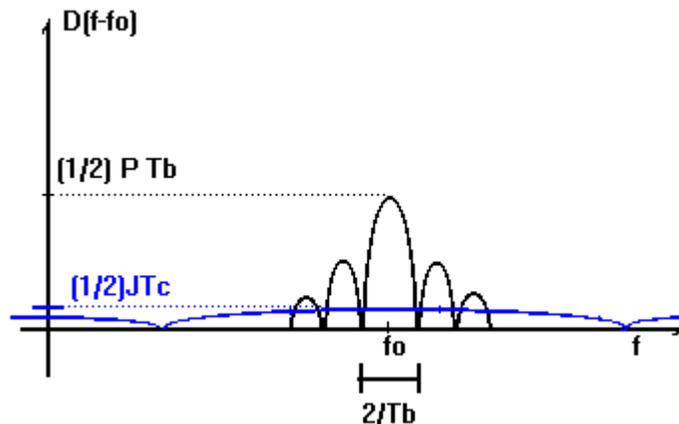
Após a multiplicação  $r(t)$  por  $c(t)$  no receptor, o sinal pode ser expresso por:

$$r(t)c(t) = s(t)c(t) + j(t)c(t) = \sqrt{2P}d(t) \cos(\omega_0 t + \theta) + \sqrt{2J}c(t) \cos(\omega_0 t + \phi)$$

Este resultado é ilustrado na Fig. 3.7 onde a DEP do sinal  $j(t)c(t)$  fica espalhada em uma

banda de largura  $(2/T_c)$  e amplitude máxima  $\frac{1}{2} J T_c$ , evidenciando que, na banda base, a

interferência foi reduzida por um fator de aproximadamente  $T_b/T_c$ .



**Figura 3.7** DEP de um sinal espalhado, na presença de um tom interferente de banda mais estreita e potência  $J$ , após a decodificação no receptor.

### 3.2 DESCRIÇÃO DE SISTEMAS DE TELEFONIA CELULAR CDMA

O funcionamento de sistemas celulares CDMA baseia-se em tecnologia de comunicação por espalhamento espectral. A faixa de operação considerada neste trabalho é a mesma utilizada para o serviço móvel celular AMPS (de 824 a 849 e 869 a 894 MHz). O espectro disponível é dividido em "canais de rádio CDMA". Cada um deles ocupa duas faixas de 1,23 MHz separadas por 45 MHz: uma para o sentido direto e outra para o reverso. Os números dos canais de rádio e suas frequências centrais em sistemas CDMA são as mesmas do sistema AMPS.

Um mesmo canal de rádio CDMA pode ser utilizado por diversos assinantes. Ele é composto por subcanais, que podem ser denominados "canais lógicos", sendo que cada um deles é identificado por uma seqüência de código distinta. Os canais lógicos são divididos em:

- Canais de tráfego: a função destes canais é a mesma dos canais de voz em sistemas AMPS.
- Canais de paging, acesso, sincronismo e piloto: utilizados para controle de chamadas e compatibilidade entre ERBs e estações móveis.

É possível reutilizar o mesmo canal de rádio em todas as células de um sistema CDMA. O padrão de reuso adotado é  $K = 1$ . As estações móveis que utilizam canais de rádio CDMA podem também acessar os canais do sistema AMPS, sendo por isso denominadas "duais".

### **3.2.1 Interferência tipo multiacesso e sua relação com a capacidade**

Idealmente, a correlação entre seqüências de usuários distintos em um mesmo canal de rádio CDMA deveria ser nula. Entretanto, para uma dada ligação, o fato de haver outros usuários ativos no sistema, e na mesma faixa de freqüências, provoca um "ruído" adicional no receptor da ERB. Este efeito é denominado "interferência tipo multiacesso". O mesmo vale no sentido direto, no receptor da estação móvel.

Quanto maior for o número de canais de tráfego em uso, menor será a relação sinal/(ruído+interferência) em cada canal de tráfego. Para um dado requisito mínimo de qualidade de voz, existe um compromisso entre o nível de interferência de multiacesso e a capacidade de um sistema CDMA.

Assim como nos sistemas celulares AMPS, em sistemas CDMA também é possível reduzir o número de estações móveis interferentes em um determinado sinal por divisão das células em setores. Por exemplo, em 3 setores de 120°. Em conseqüência, o nível de interferência entre usuários do sistema é reduzido por um fator que não chega a 3, devido à superposição entre lóbulos de antenas adjacentes, como será visto no Item 3.3.3.3.

### **3.2.2 Geração de canais no IS-95**

Os canais de tráfego em sistemas celulares CDMA utilizam um codificador de voz (*vocoder*) cuja taxa de transmissão varia de acordo com a atividade de voz do usuário. Esta taxa pode

assumir os valores 1.200, 2.400, 4.800 ou 9.600 bps<sup>9</sup>. Os sinais de voz são transmitidos em quadros de 20 ms.

Durante uma conversação em um canal de tráfego, a taxa de transmissão é reduzida durante as pausas entre palavras, sílabas e tempo de escuta. O efeito resultante é a redução dos níveis de interferência com canais de tráfego que estão sendo utilizados por outros usuários.

A redução dos níveis de interferência com outros canais de tráfego pode ser associada a um "fator de atividade vocal", que será representado por  $\alpha$ . Valores típicos de  $\alpha$  estão em torno de 3/8 (GILHOUSEN et al., 1991 apud BRADY, 1968). É importante observar que  $\alpha$  pode aumentar em casos de uso intenso dos canais de tráfego. Por exemplo, em algumas aplicações em que haja transmissão de dados.

Antes de serem transmitidos, os dígitos de informação passam por estágios para a introdução de bits que permitirão a correção de erros de dígitos, para encriptação e espalhamento<sup>10</sup>. Tanto no sentido direto como no reverso, os sinais são espalhados por SMC modificadas. Uma delas é um código denominado em Inglês *long code*. Ele é gerado pela recursão linear definida pelo seguinte polinômio primitivo característico<sup>11</sup>:

$$f(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$$

A SMC gerada tem período  $L = 2^{42} - 1$  (normalizado para  $T_c = 1$ ) e é modificada inserindo-se mais um "zero" após 41 "zeros" consecutivos, resultando em uma seqüência balanceada de período  $2^{42}$ .

---

<sup>9</sup> Em alguns sistemas celulares CDMA, a taxa do vocoder pode chegar a 14.400 bps, mas este valor não será utilizado neste trabalho.

<sup>10</sup> Podem ser encontradas descrições destes estágios nas referências: HALPERN et al, 1994; TIA/EIA/IS-95, 1993; CELTEC, 1996.

Cada chip do código longo é denominado *PN chip*. Cada PN chip deve ser gerado a partir do produto módulo-2 interno entre uma máscara de 42 bits e o vetor de 42 bits que representa o estado do gerador do código longo. A taxa de transmissão de PN chips é 1,2288 Mchips/s. A máscara utilizada na seqüência (*long code mask*, ou "máscara de código longo") contém informações sobre a identificação da estação móvel envolvida naquela conexão.

Após o espalhamento por multiplicação pelo código longo, o sinal é multiplicado pelas seqüências piloto I e Q em quadratura, como ilustrado na Fig. 3.8. Estas são geradas por fórmulas de recursão, respectivamente a partir dos polinômios característicos  $P_I(x)$  e  $P_Q(x)$  a seguir:

$$P_I(x) = x^{15} + x^{13} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + 1$$

$$P_Q(x) = x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$$

As SMC geradas a partir dos polinômios acima têm comprimento  $2^{15} - 1$ . Após 14 "zeros" consecutivos, insere-se mais um "zero" para se obterem as seqüências I e Q, que têm período igual a  $2^{15}$  e são balanceadas. Existe um alinhamento entre as seqüências I e Q, de modo a estabelecer uma referência de tempo, que é o primeiro "um" após 15 "zeros" consecutivos. Estas seqüências são alinhadas também com o código longo. A taxa de transmissão de chips das seqüências piloto I e Q é 1,2288 Mchips/s.

A DEP resultante do espalhamento espectral possui o formato de um  $\text{sinc}^2$ , sendo semelhante ao representado na Fig. 3.2. Ela se anula em freqüências múltiplas de  $\frac{1}{T_c} = 1,2288 \text{ MHz}$ . Os sinais

I e Q são filtrados, como mostrado na Fig. 3.8. A curva característica do filtro em banda base é apresentada na Fig. 3.9.

---

<sup>11</sup> Descrições das propriedades de polinômios primitivos podem ser encontradas nas referências JESZENSKY, 1991, 1994; SARWATE, PURSLEY, 1980; PICKHOLZ, SCHILLING, MILSTEIN, 1982.

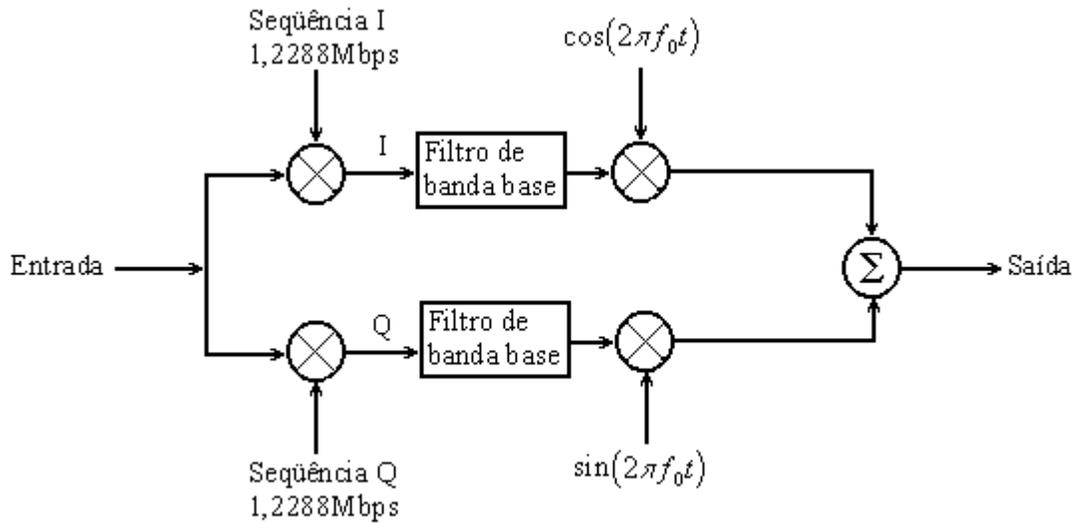


Figura 3.8 Modulação em quadratura, com filtragem. Fonte: TIA/EIA/IS-95, seção

7.1.  $f_0$  é a frequência da portadora.

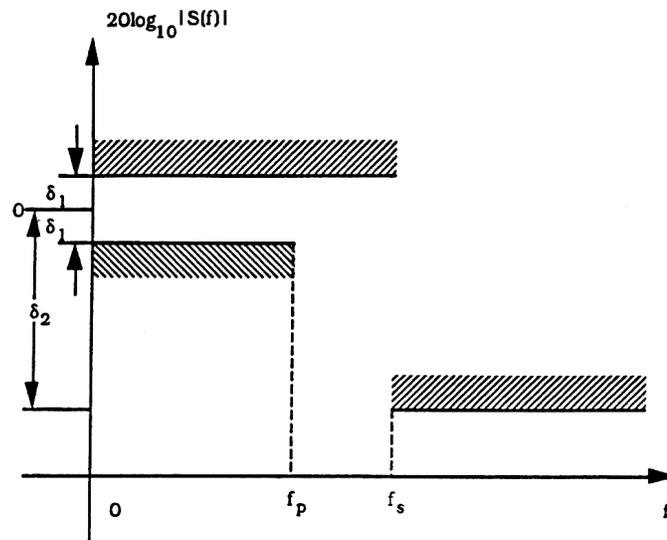


Figura 3.9 Filtro em banda base.  $\delta_1 = 1,5$  dB;  $\delta_2 = 40$  dB;  $f_p = 590$  kHz;  $f_s = 740$  kHz.

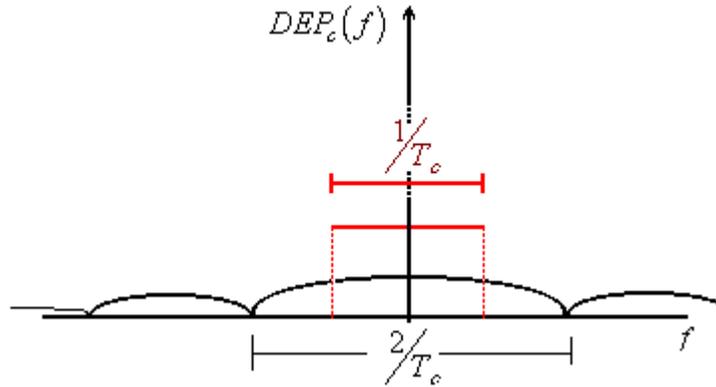
Fonte: TIA/EIA/IS-95 (1993), Seção 7.1.

O filtro em banda base apresentado restringe a banda do sinal dentro de uma faixa de

aproximadamente  $\frac{1}{T_c}$ , como ilustrado na Fig. 3.10. A fração de potência contida nesta faixa

pode ser determinada utilizando o método apresentado no Item 3.1. Para o sinal  $c(t)$  definido no

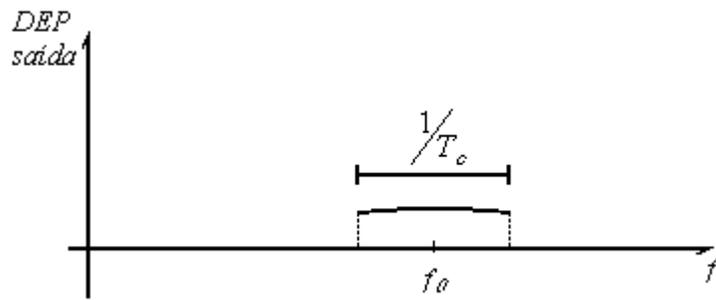
Item 3.1, o resultado foi 77,83 %.



**Figura 3.10** Comparação entre a densidade espectral de potência do sinal I antes da filtragem, e a curva característica do filtro em banda base. O mesmo vale para o sinal Q.

O formato da DEP do sinal transmitido é ilustrado na Fig. 3.11. Sua banda ocupada é igual a

$$\frac{1}{T_c} = 1,2288 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \cong 1,23 \text{ MHz.}$$



**Figura 3.11** Formato da DEP do sinal após filtragem e modulação.

Evidentemente, a DEP do sinal de um canal de rádio CDMA não é uniforme dentro da faixa ocupada de 1,23 MHz. Porém, esta premissa pode ser adotada para simplificar a resolução de questões relacionadas com a determinação do número máximo de chamadas em curso por célula e cálculos de interferência com sistemas celulares AMPS. Com esta premissa, estão sendo desprezados sinais espúrios gerados por não-linearidades dos circuitos que amplificam e transladam o sinal em banda base para a frequência de transmissão.

### 3.2.3 Sinalização em sistemas com tecnologia CDMA padrão IS-95

#### 3.2.3.1 Canais no sentido direto

No sentido direto (ou seja, da ERB para a estação móvel), cada canal lógico é identificado por uma seqüência gerada por uma função de Walsh. Os canais no sentido direto também são identificados pelo seu deslocamento de fase e pela máscara do código longo.

As funções de Walsh numeradas de 0 a 63 ( $W_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, 63$ ) correspondem às linhas da matriz de  $64 \times 64$  apresentada na Tabela 3.1 a seguir. Duas funções de Walsh distintas são ortogonais, ou seja, o produto escalar de duas funções distintas **alinhadas** é igual a zero.

$$\langle W_i, W_j \rangle = 0 \text{ para } i \neq j.$$

O produto escalar de uma função de Walsh consigo mesma é:

$$\langle W_i, W_i \rangle = 64 \text{ para } i = 0, 1, 2, \dots, 63.$$

O seguinte algoritmo gera uma Matriz de Walsh:

$$H_1 = [1]$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} +1 & +1 \\ +1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$H_{2N} = \begin{bmatrix} +H_N & +H_N \\ +H_N & -H_N \end{bmatrix}$$



O padrão IS-95 recomenda o uso de 64 funções de Walsh, portanto um canal de rádio CDMA pode operar com até 64 **canais lógicos** no sentido direto, que são:

- Um **canal piloto**, identificado pela função  $W(i = 0)$ . Note-se que na matriz de Walsh, na linha  $i = 0$  todos os elementos são iguais a 1.
- Um ou nenhum canal de sincronismo, identificado pela função  $W(i = 32)$ .
- 0 a 7 **canais de paging**  $W(i = 1, 2, \dots, 7)$ ;
- **Canais de tráfego**. O número máximo de canais de tráfego que podem ser transmitidos em um canal de rádio é **63 menos o número de canais de paging (0 a 7) menos o número de canais de sincronismo (0 ou 1)**, desconsiderando outros fatores limitantes além do número de funções de Walsh adotadas.

Exemplo: caso um canal de rádio opere com 7 canais de paging ( $i = 1$  a 7) e um canal de sincronismo ( $i = 32$ ), o número de canais de tráfego pode ser de até 55. Em uma célula com um ou mais canais de rádio CDMA, é necessário que os canais de paging e sincronismo estejam presentes em pelo menos um canal de rádio.

### **Canal piloto**

O canal piloto é transmitido continuamente em um canal de rádio e serve, principalmente, como referência para alinhamento de fase da seqüência de código no receptor das estações móveis e para identificação da ERB melhor servidora para a estação móvel.

Considerando-se apenas um canal de rádio CDMA, as mesmas seqüências de código para o canal piloto são utilizadas em todas as células e em todos os setores de um sistema CDMA, porém com fases diferentes. As fases são numeradas com "índices de offset de fase" de 0 a 511

e podem ser reutilizadas em todo o sistema. Uma estação móvel CDMA realiza continuamente medidas de nível de sinal de canais piloto do sistema, para identificar ERBs que poderão servir uma chamada. A estação móvel realiza este rastreamento estando em chamada ou não. O período da seqüência de código do canal piloto é  $2^{15}$ . Portanto, cada incremento do índice de offset corresponde a  $2^{15} \div 2^9 = 2^6 = 64$  chips. Assim, o deslocamento **em chips** de um canal piloto é dado por  $64 \times$  índice de offset de fase.

Em um setor de uma célula, os canais de tráfego, paging e sincronismo são transmitidos com o mesmo índice de offset de fase que o canal piloto. Este canal não transmite dados. O rastreamento de canais piloto que uma estação móvel realiza não abrange necessariamente todos os índices de offset, de 0 a 511. Os pilotos rastreados são aqueles cujo índice de offset é múltiplo inteiro de um parâmetro denominado PILOT\_INC. Este parâmetro de sistema pode ser controlado pela operadora do sistema celular, e significa *Pilot sequence offset increment*. Uma de suas utilidades é reduzir o tempo de busca de canais piloto nas estações móveis.

### **Canal de sincronismo**

Canal direto que transmite dados com taxa constante igual a 1.200 bps. Algumas das informações transmitidas aos terminais de assinante nesse canal são:

- Parâmetros de identificação do sistema *System Identification e Network Identification*.
- PILOT\_PN: *Pilot PN sequence offset index*, que é o índice de offset de fase desta ERB, em unidades de 64 chips. O índice deve ter valor entre 0 e 511.
- *System Time*: tempo de referência, em UTC.

- *Paging Channel Data Rate*: taxa de transmissão no canal de paging, que pode ser 4.800 ou 9.600 bps.

Para obtenção da referência de tempo do sistema, em UTC, cada ERB possui um receptor GPS.

### **Canal de *paging***

Canal direto que tem como função a transmissão de mensagens de cabeçalho de uma ERB para uma estação móvel, quando esta recebe uma ligação. Sua taxa de transmissão pode ser 4.800 ou 9.600 bps. Em um canal de rádio CDMA, podem ser transmitidos até 7 canais de paging. Algumas das informações transmitidas através do canal de paging são:

- *System Parameters Message*: informações que a estação móvel necessita para determinar qual o número correto do canal de paging se este for diferente de 1 (W1), índice de offset do canal piloto, identificação da ERB, número de canais de paging e os parâmetros utilizados no handoff T\_ADD, T\_DROP, T\_TDROP, SRCH\_WIN. O significado destes parâmetros utilizados no handoff será descrita no Item 3.3.
- *Access Parameters Message*: parâmetros de configuração necessários para transmitir no canal de acesso.
- *Neighbor List Message*: lista com índices de offset das células vizinhas à célula onde a estação móvel está localizada; valor do parâmetro PILOT\_INC.
- *CDMA Channel List Message*: frequências dos canais de rádio CDMA disponíveis na célula.
- *Channel Assignment Message*: frequência designada para a estação móvel estabelecer uma chamada.

- *Authentication Challenge Message*: solicitação de identificação da estação móvel. Uma das funções da identificação do móvel é evitar assinantes falsos (clones).

### **Canal direto de tráfego**

Além da informação propriamente dita, o canal direto de tráfego transmite as seguintes mensagens:

- *In-Traffic System Parameters Message*: atualização de parâmetros contidos no *System Parameters Message*, quando necessário (em handoff, por exemplo).
- *Authentication Challenge*: solicitação de identificação de uma estação móvel. Esta mensagem também é transmitida através do canal de paging.
- *Handoff Direction Message*: informações necessárias para que uma estação móvel inicie um handoff.
- *Analog Handoff Direction*: mensagem para que uma estação móvel mude para modo de operação AMPS e inicie um processo de handoff de célula CDMA para célula AMPS.
- *Neighbor List Update Message*: atualização da lista de células vizinhas. Uma lista de células vizinhas é enviada à estação móvel no início da chamada através do canal de paging, na mensagem *Neighbor List Message*.
- *Send Burst DTMF*: número discado, multifrequencial.
- *Power Control Parameters Message*: informa à estação móvel qual o período ou limiar de comparação a ser considerado pela estação móvel no envio de medidas da taxa de erro de quadros, para o controle dinâmico da potência transmitida pela ERB, que será visto no Item 3.2.6. Estas medidas são enviadas à ERB pela estação móvel através do canal de tráfego reverso, como será visto no Item 3.2.3.2.

- *SSD Update: Shared Secret Data* é um código de criptografia, utilizado para aumentar o sigilo dos dados para os assinantes.
- *Mobile Station Registered Message*: aprovação de registro da estação móvel e envio de parâmetros de sistema.

A taxa de transmissão no canal direto de tráfego pode ser de 1.200, 2.400, 4.800 ou 9.600 bps, dependendo da atividade do sinal de voz a ser transmitido.

### **3.2.3.2 Canais no sentido reverso**

No sentido reverso, cada canal lógico é identificado pelo seu índice de offset de fase e pela máscara do código longo. As seqüências de Walsh **não** são utilizadas para identificação dos canais de tráfego reversos, pois elas só são ortogonais entre si quando alinhadas, e não é possível garantir alinhamento ou sincronismo entre os sinais transmitidos por diversas estações móveis, devido à aleatoriedade de suas localizações. No canal reverso, não há um canal piloto, nem de sincronismo.

### **Canal de acesso**

Algumas das mensagens transmitidas pelas estações móveis através deste canal são:

- *Registration Message*: registro da estação móvel.
- Originação de chamadas.
- Atendimento de chamadas.
- *Authentication Challenge Response*: dados de localização e identificação da estação móvel, em resposta à solicitação "Authentication Challenge" da ERB.

- Número discado.
- Atendimento de chamada.

A taxa de transmissão no canal de acesso é fixa e igual a 4.800 bps.

### **Canal reverso de tráfego**

Além da informação propriamente dita: dados ou voz digitalizada, o canal reverso de tráfego é utilizado para transmitir as seguintes mensagens de controle:

- *Authentication Challenge Response*: informações necessárias para validar a identidade da estação móvel.
- Confirmação de estabelecimento de conexão.
- *Power Measurement Report Message*: medidas de taxa de erro de quadros no sinal transmitido pela ERB. Esta mensagem é enviada em intervalos regulares ou a cada vez que a taxa de erros ultrapassa um limiar estabelecido, como será visto no Item 3.2.6. Os dados da taxa de erros de quadros serão utilizados para controle dinâmico da potência transmitida pela ERB.
- *Pilot Strength Measurement Message*: níveis medidos de potência de canais piloto de ERBs que não estão servindo a chamada.
- *Origination Continuation Message*: continuação da mensagem de originação da chamada, que será enviada caso o usuário digite números durante a chamada.
- *Handoff Completion Message*: confirmação de que um handoff foi completado.

Assim como os canais diretos, a taxa de transmissão de dados nos canais reversos pode ser 1.200, 2.400, 4.800 ou 9.600 bps, dependendo da atividade do sinal de voz que está sendo transmitido.

#### **3.2.4 Recepção com diversidade de fase e *soft handoff***

A recepção com diversidade de fase consiste de um receptor que possui a propriedade de demodular em paralelo dois ou mais sinais defasados, combinando-os ou selecionando o melhor entre eles para posterior detecção. Assim como a diversidade de espaço, a função desta técnica é combater desvanecimentos de multipercurso. Receptores com diversidade de fase são denominados em Inglês *RAKE receivers*. Conforme o padrão IS-95, uma estação móvel deve possuir ao menos três demoduladores em paralelo. Tipicamente, as estações móveis possuem três demoduladores. Além de compensar o desvanecimento de sinal, a diversidade de fase tem uma função adicional importante: em sistemas celulares CDMA, é possível reutilizar o mesmo canal de rádio em todas as células. Assim, não é necessário transladar a frequência da estação móvel durante o handoff. Devido à diversidade de fase, uma mesma chamada de estação móvel pode ser atendida simultaneamente por até três ERBs. Portanto, durante um handoff a estação móvel somente irá se desconectar de uma ERB após se conectar com outra. Este tipo de transferência recebe o nome *soft handoff*. É importante observar que há um aumento do número de canais de tráfego em uso no sistema devido a este processo, pois uma chamada em *soft handoff* utiliza mais de um canal de tráfego. Além do *soft handoff*, há duas outras modalidades de handoff no sistema CDMA considerado:

- *CDMA to CDMA hard handoff*: transferência de uma chamada de uma célula para outra passando de um canal de rádio CDMA para outro.

- Intersistemas: CDMA para AMPS.

O padrão IS-95 não descreve o handoff de uma estação móvel dual de um sistema AMPS para um sistema CDMA. Como consequência, um assinante que origine ou receba uma chamada dentro de uma região onde há apenas o sistema AMPS, e que se locomova para a região onde há sistema CDMA, não poderá utilizar canais CDMA até o fim desta mesma chamada.

### 3.2.5 Qualidade do sinal recebido

Para medir a qualidade do sinal no receptor de uma ERB CDMA, definem-se:

$E_b$ : Energia recebida por bit de informação do sinal desejado transmitido por uma estação móvel.

$I_0$ : Densidade espectral de potência equivalente do ruído térmico + interferência. A segunda parcela inclui interferência tipo multiacesso causada por outras estações móveis do mesmo sistema, bem como a de emissores alheios ao sistema CDMA.

As mesmas definições valem, analogamente, para o canal direto. A variação da probabilidade de erro de quadro em função de  $E_b/I_0$  é uma característica de desempenho do receptor, que depende do fabricante, código corretor de erros utilizado, tipo de entrelaçamento, etc.<sup>12</sup>

Metas operacionais tipicamente adotadas em sistemas CDMA são (GILHOUSEN et al., 1991):

$$\frac{E_b}{I_0} \geq 7\text{dB no canal reverso, considerando que o receptor da ERB possua diversidade de$$

espaço.

---

<sup>12</sup>JESZENSKY, P. J. E., anotações de aula do curso PEE-869: "Teoria Básica e Aplicações de Seqüências de Códigos", 1996.

$$\frac{E_b}{I_0} \geq 5\text{dB no canal direto.}$$

Os principais motivos atribuídos para a diferença entre os quesitos para o canal direto e o reverso são:

- Não há canal piloto no sentido reverso.
- Os sinais transmitidos pelas estações móveis no sentido reverso **não** são síncronos, ao passo que no canal direto as funções de Walsh são transmitidas em sincronismo, sendo portanto ortogonais.

### **3.2.6 Controle dinâmico de potência em sistemas CDMA (HALPERN et al., 1994)**

#### **3.2.6.1 Controle dinâmico de potência do canal reverso**

Quanto maior for o número de estações móveis acessando simultaneamente o mesmo canal de rádio, menor será a relação  $E_b/I_0$  em cada canal de tráfego. O número de acessos a um canal de rádio CDMA é limitado por um valor mínimo de  $E_b/I_0$ . Seja  $S_{Ci}$  o nível de potência que uma ERB recebe da estação móvel  $i$ . Os valores de  $S_{Ci}$  correspondentes às várias estações móveis conectadas a uma ERB podem ter diferenças em consequência de:

- Distâncias variadas dos terminais móveis à ERB;
- Diversas posições relativas entre os terminais móveis e obstruções urbanas e geográficas.

Em sistemas CDMA, é desejável que todos os valores de  $S_{Ci}$  sejam iguais. Se o nível recebido de uma estação móvel for superior ao necessário, ela estará causando interferência excessiva

sobre as demais. Se for inferior aos demais, então a qualidade do seu sinal estará comprometida. Este efeito chama-se em Inglês *near-far effect*.

Para equalizar as potências recebidas dos móveis conectados a uma ERB, os sistemas celulares CDMA utilizam as seguintes formas de controle dinâmico da potência transmitida pela estação móvel durante uma conexão telefônica:

**a. Controle em malha aberta:** é função exclusiva da estação móvel, adequado para compensar o desvanecimento devido ao aumento da distância entre ERB e estação móvel. A estação móvel mede em intervalos regulares a potência que recebe do canal piloto da ERB que está servindo a chamada e ajusta sua potência transmitida. Quanto maior for a potência recebida, menor será a potência de transmissão utilizada pela estação móvel.

Visto que as frequências das portadoras nos canais direto e reverso são diferentes, separadas de 45 MHz, os desvanecimentos tipo Rayleigh em ambos os sentidos têm comportamentos diferentes: mínimos não ocorrem necessariamente ao mesmo tempo nos sinais recebidos pela ERB e pela estação móvel. O controle em malha aberta não tem resposta rápida suficiente para compensar variações causadas pelo desvanecimento tipo Rayleigh (CELTEC, 1996). Portanto, é necessário que haja uma realimentação por parte da ERB com influência no controle da potência transmitida pela estação móvel.

**b. Controle em malha fechada - malha interna:** é uma operação que envolve tanto a estação móvel como a ERB. Em cada quadro de 20 ms, a ERB mede 16 vezes a relação sinal - interferência por bit ( $E_b/I_0$ ) média dos sinais transmitidos pela estação móvel, compara com um certo limiar (*setpoint*, explicado no Item c a seguir). Com base nesta comparação, transmite

através do canal de tráfego um bit de controle com duração de 2 bits de dados para ajuste da potência transmitida pela estação móvel:

Bit com valor lógico "0"  $\Rightarrow$  a estação móvel aumenta a potência transmitida em 1 dB.

Bit com valor lógico "1"  $\Rightarrow$  a estação móvel reduz a potência transmitida em 1 dB.

**c. Controle em malha fechada - malha externa:** o **setpoint** pode assumir valores entre 3 e 10 dB. A cada quadro de 20 ms, a ERB reduz o setpoint de 1 dB, até ocorrer erro de um quadro. Então, o setpoint é aumentado de um valor fixo (por exemplo, 4 dB) e o processo se repete.

O controle de potência do terminal de assinante resulta da soma dos ajustes devidos aos Itens (a) e (b) anteriores.

### **Máxima potência transmitida pelos terminais móveis**

A Tabela 3.2 a seguir apresenta os limites para máxima *ERP* de estações móveis de sistemas celulares CDMA.

**Tabela 3.2 Limites para máxima *ERP* de estações móveis de sistemas celulares CDMA. Fonte: TIA/EIA/IS-95, 1993, Tabela 6.1.2.1-1.**

Classe da estação móvel	Máxima <i>ERP</i> deve exceder	Máxima <i>ERP</i> não deve exceder
I	31 dBm = 1.250 mW	38 dBm = 6.300 mW
II	27 dBm = 500 mW	34 dBm = 2.500 mW
III	23 dBm = 200 mW	30 dBm = 1.000 mW

Além de igualar os níveis de potência que uma ERB recebe de todas as estações móveis, outro objetivo do controle da potência transmitida pelas estações móveis é aumentar a duração de suas baterias.

### **3.2.6.2 Controle dinâmico de potência do canal direto**

Assim como no canal reverso, o controle dinâmico da potência transmitida pela ERB tem como função manter sua potência transmitida em níveis adequados para a recepção de cada estação móvel, porém não exagerados, evitando interferências com terminais de assinante em outras células.

A cada 80 ms, a ERB reduz de aproximadamente 0,25 dB a potência transmitida alocada para uma determinada estação móvel, até que receba do móvel uma mensagem "Power Measurement Report Message". Então, a ERB aumenta a potência transmitida alocada para aquele móvel em aproximadamente 1 dB.

A cada 56 quadros de 20 ms, a estação móvel conta o número de quadros com erro recebidos da ERB. Então, existem duas possibilidades que podem ser configuradas:

- A estação móvel envia à ERB uma mensagem com o número de quadros com erro. Com base nesta mensagem, a ERB aumenta ou diminui a potência no próximo ciclo de 80 quadros,
- ou**
- a estação móvel somente irá enviar uma mensagem à ERB caso o número de quadros com erro esteja acima de um certo valor. Então, a ERB aumenta a potência transmitida.

É possível desabilitar o controle dinâmico de potência do canal direto.

### 3.3 CAPACIDADE

#### 3.3.1 Uma estimativa do número máximo de chamadas simultâneas por célula em sistemas CDMA

Procura-se determinar uma relação aproximada entre o número de chamadas simultâneas por célula e a relação  $E_b/I_0$  nos canais tráfego reversos, em um sistema com múltiplas células CDMA. O número máximo de chamadas simultâneas é limitado por um valor mínimo de  $E_b/I_0$ . Esta relação será calculada para o receptor de uma ERB que será denominada (novamente) "ERB central". Sua área de atendimento será denominada "célula central".

Sejam:

$S_C$ : Potência recebida pela ERB central, do sinal transmitido por uma estação móvel. Desconsiderando-se as imperfeições do controle dinâmico de potência, este valor é constante e igual para todas as estações móveis que estão na célula central.

$R_b$ : Taxa de transmissão de bits de sinal desejado. A taxa máxima é 9.600 bps.

$E_b$ : Energia por bit de sinal desejado.  $E_b = S_C \times T_b = \frac{S_C}{R_b}$  (3.3.1)

$W_{ss}$ : Largura da banda ocupada por um canal de rádio CDMA.  $W_{ss} = R_c = 1,23$  MHz.

$I_0$ : Densidade espectral de potência equivalente do ruído térmico + sinais interferentes. Assume-se que esta densidade espectral é uniforme dentro da faixa ocupada por um canal de rádio CDMA, de 1,23 MHz.

$$I_0 \times W_{SS} = N_t + I_{ICDMA} + I_{OCCDMA} + I_{OCAMPS} \quad (3.3.2)$$

Onde:

$N_t$ : Potência total do ruído térmico no receptor da ERB com uma figura de ruído igual a 8 dB.

$N_t = 3,10 \times 10^{-11}$  mW conforme visto na Notação.

$I_{ICDMA}$ : Interferência de multiacesso proveniente das estações móveis que estão dentro da célula central.

$I_{OCCDMA}$ : Interferência de multiacesso proveniente das estações móveis que estão em outras células CDMA.

$I_{OCAMPS}$ : Interferência de multiacesso proveniente das estações móveis que estão em outras células AMPS.

A partir de (3.3.1) e (3.3.2), obtém-se:

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{W_{SS}/R_b}{(N_t + I_{ICDMA} + I_{OCCDMA} + I_{OCAMPS})/S_C} \quad (3.3.3)$$

O número de parcelas da expressão (3.3.2) pode variar, dependendo do número de fontes interferentes que forem consideradas. Neste capítulo, serão considerados apenas  $I_{ICDMA}$  e

$I_{OCCDMA}$ . Portanto:

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{W_{SS}/R_b}{(I_{ICDMA} + I_{OCCDMA})/S_C} \quad (3.3.4)$$

Onde  $W_{SS}/R_b$  é o ganho de processamento devido ao espalhamento espectral.

Seja  $N$  o número de assinantes conectados à célula central. Então,

$$I_{ICDMA} = \alpha S_C (N - 1) \quad (3.3.5)$$

Onde  $\alpha$  é o fator de atividade de voz.

Nas referências RAPPAPORT, MILSTEIN (1992) e NEWSON, HEATH (1994), define-se o "fator de eficiência do reuso de frequências" como:

$$F = \frac{I_{ICCDMA}}{I_{ICCDMA} + I_{OCCDMA}} \quad (3.3.6)$$

Com esta definição, pode-se escrever  $I_{OCCDMA}$  em termos de  $I_{ICCDMA}$ . Um valor típico para  $F$  é 0,65 (HALPERN et al., 1994). No Item 4.4, este fator será definido conforme a abordagem de KIM (1993) e será apresentado também um método para determinar seu valor aproximado.

Isolando  $F$  na expressão anterior, vem:

$$I_{OCCDMA} = I_{ICCDMA} \left( \frac{1}{F} - 1 \right) = \alpha S_c (N - 1) \left( \frac{1}{F} - 1 \right) \quad (3.3.7)$$

Substituindo (3.3.5) e (3.3.7) em (3.3.4), obtém-se:

$$\frac{E_b}{I_0} = F \times \frac{W_{SS}/R_b}{\alpha(N-1)} \quad (3.3.8)$$

Isolando  $N$  na expressão (3.3.8):

$$N = F \times \frac{W_{SS}/R_b}{\alpha E_b/I_0} + 1 \quad (3.3.9)$$

É possível reduzir a interferência de multiacesso no receptor de uma ERB dividindo a célula em setores. A melhoria da relação  $E_b/I_0$  em decorrência da setorização pode ser associada a um "ganho de setorização", denotado por  $G_s$  (dividindo-se a célula em 3 setores, por exemplo, o ganho de setorização não chega 3 devido à superposição entre lóbulos de antenas adjacentes). Um valor típico de  $G_s$  é 2,55 (QUALCOMM, 1992). Considerando-se células de 3 setores, a expressão (3.3.9) pode ser modificada para:

$$N = F \times \frac{W_{SS}/R_b}{\alpha E_b/I_0} G_s + 1 \quad (3.3.10)$$

No Item (3.3.3) apresenta-se uma forma de calcular  $G_s$ . Para o cálculo de  $N$ , serão considerados os seguintes valores:

$$\alpha = 0,4$$

$$F = 0,65$$

$$\frac{E_b}{I_0} = 5 \text{ (= 7 dB)}$$

$$\frac{W_{SS}}{R_b} = 128$$

$$G_s = 2,55$$

$$N = \frac{128}{5} \times \frac{0,65}{0,4} \times 2,55 + 1 = 107 \quad \text{chamadas simultâneas por célula, ou seja,}$$

aproximadamente 36 chamadas simultâneas por setor.

A expressão (3.3.10) é uma relação aproximada, e não considera alguns fatores importantes que têm influência na capacidade, como por exemplo:

- Sistemas celulares CDMA são sensíveis a imperfeições do controle dinâmico de potência. NEWSON, HEATH (1994) e JANSEN, PRASAD (1995) apresentam estudos sobre o impacto das imperfeições do controle dinâmico de potência sobre a capacidade de sistemas celulares CDMA.
- Variações da atividade vocal: apesar do valor 3/8 encontrado na referência GILHOUSEN et al. (1991) apud BRADY (1968), o fator de atividade vocal pode assumir valores de 50 a 60 % de acordo com um estudo realizado para sistemas móveis apontado por JANSEN, PRASAD (1995) apud BRAUN et al. (1990).

- Ruído térmico.
- Não uniformidade da distribuição de assinantes nas células.
- Interferência adicional causada pelo canal de acesso.
- Interferências provenientes de sistemas celulares AMPS; sinais espúrios gerados por outros sistemas irradiantes (por exemplo, sistemas de repetição de televisão ou de radiodifusão).

Neste exercício, o termo  $I_{ICCDMA}$  é tratado separadamente do termo  $I_{OCCDMA}$ , sem considerar que em sistemas reais, uma grande parte das estações móveis pode estar utilizando canais da célula central e de outras células simultaneamente (soft handoff). Portanto, o número de canais de tráfego ocupados não é igual ao número de chamadas simultâneas.

Devido aos fatores apresentados, o número máximo de assinantes atendidos simultaneamente por setor, utilizado no decorrer do Capítulo 4, será um número utilizado em alguns sistemas celulares reais.

### **3.3.2 Listas de canais piloto em uma estação móvel**

Uma estação móvel CDMA tem participação ativa no processo de handoff, medindo e reportando a intensidade de canais piloto à ERB servidora durante uma chamada. A sigla em Inglês que expressa esta atuação do móvel é MAHO. Considerem-se as seguintes definições:

$E_c$ : Energia transmitida por chip no canal piloto.

$I_0$ : Densidade espectral de potência equivalente do ruído térmico + interferência.

Em sistemas celulares CDMA compatíveis com o padrão IS-95, a medida de  $E_c/I_0$  é implementada pelo receptor da estação móvel, que possui diversidade de fase, e é utilizado no processo de handoff como indicador de qualidade do sinal recebido pela estação móvel.

Durante uma conexão telefônica, uma estação móvel CDMA mantém quatro listas (ou *sets*) de canais piloto:

- *Active Set*: contém os canais piloto do sistema correspondentes aos canais de tráfego que estão sendo utilizados na chamada. Pilotos nos demais *sets* são possíveis candidatos a handoff e estão definidos a seguir conforme o padrão IS-95:
- *Candidate Set*: contém os canais piloto do sistema que não estão no Active Set, porém são recebidos pela estação móvel com  $E_c/I_0$  suficiente, de modo que os canais de tráfego associados a estes poderiam ser demodulados com sucesso.
- *Neighbor Set*: contém os canais piloto do sistema que não estão no Active Set nem no Candidate Set, mas que também são candidatos a handoff.
- *Remaining Set*: contém todos os canais piloto do sistema, que estão no mesmo canal de rádio CDMA que está sendo utilizado pela estação móvel, excluindo os que estão contidos nas três listas anteriores: Active Set, Candidate Set e Neighbor Set. Os pilotos possíveis do sistema são aqueles cujo índice de offset de fase é múltiplo inteiro de PILOT\_INC.

São descritos a seguir os principais parâmetros relacionados a soft handoff.

### 3.3.2.1 Parâmetro T\_ADD

O parâmetro T\_ADD - *Add Threshold*, ou limiar de detecção do canal piloto - controla o movimento dos canais piloto das listas Neighbor Set e Remaining Set para as listas Active Set

ou Candidate Set. Seu valor é definido em unidades de -0,5 dB. Um canal piloto que está na Neighbor ou Remaining Set cujo nível de  $E_c/I_0$  recebido pelo móvel ultrapasse o valor  $T\_ADD \times (-0,5 \text{ dB})$  é movido para a Candidate ou Active Set, conforme orientação da ERB servidora.

**1º exemplo de soft handoff:**

- a. Uma estação móvel conectada a uma ERB servidora detecta durante a chamada o canal piloto de outra ERB cujo  $E_c/I_0$  ultrapassou o valor correspondente a  $T\_ADD$ .
- b. A estação móvel incorpora este piloto à sua lista Candidate Set e reporta seu nível de potência e índice de offset (de 0 a 511) à ERB servidora através de uma mensagem *Measurement Message*.
- c. A ERB servidora, identificando qual o setor ou célula correspondente a este canal piloto, poderá direcionar ou não um handoff.
- d. Caso a estação móvel receba em seguida uma mensagem da ERB servidora, direcionando o handoff através da mensagem *Handoff Direction Message*, a estação móvel irá mover este piloto à sua Active Set.
- e. A estação móvel envia à ERB uma mensagem de confirmação de que o handoff foi completado - *Handoff Completion Message*.

O parâmetro  $T\_ADD$  pode ser ajustado para cada setor. Portanto, pode ser utilizado pela operadora para controlar o limiar de entrada de cada célula ou setor. Os valores recomendados para  $T\_ADD \times (-0,5 \text{ dB})$  estão na faixa de -17 a -13 dB (CELTEC, 1996; QUALCOMM, 1992).

A Tabela 3.3 a seguir, de movimentação de pilotos entre listas, complementa as informações dadas neste 1º exemplo:

**Tabela 3.3 Mudanças de canais piloto entre as listas.**

Lista de origem	Lista de destino	Evento
Candidate	Active	Estação móvel recebe Handoff Direction Message incluindo canal piloto
Neighbor	Active	Estação móvel recebe Handoff Direction Message incluindo canal piloto
Remaining	Active	Estação móvel recebe Handoff Direction Message incluindo canal piloto
Neighbor	Candidate	Nível de canal piloto excede $T\_ADD \times (-0,5 \text{ dB})$
Remaining	Candidate	Nível de canal piloto excede $T\_ADD \times (-0,5 \text{ dB})$
Remaining	Neighbor	Estação móvel recebe Neighbor List Update Message através do canal de tráfego, incluindo o canal piloto.

### 3.3.2.2. Parâmetros T\_DROP e T\_TDROP

$T\_DROP$  - *Drop Threshold*, ou limiar de desprendimento de canal piloto, também definido em unidades de -0,5 dB.

$T\_TDROP$  - *Drop Timer Value*, ou tempo de expiração de temporizador. O valor correspondente ao parâmetro  $T\_TDROP$  é ajustável na faixa de 0 a 319 s e controla a saída de canais piloto das Active Set e Candidate Set, como descrito a seguir.

Um canal piloto que está na Active Set cujo nível de  $E_c/I_0$  recebido pelo móvel cair abaixo do valor  $T\_DROP \times (-0,5 \text{ dB})$ , durante um período que exceda o valor correspondente a  $T\_TDROP$ , é movido para a Candidate ou Neighbor Set, conforme direcionamento da ERB servidora.

Um canal piloto que está na Candidate Set cujo nível de  $E_c/I_0$  recebido pelo móvel cair abaixo do valor  $T\_DROP \times (-0,5 \text{ dB})$  durante um período que exceda o valor correspondente a  $T\_TDROP$ , será movido para a Neighbor Set, sem necessidade de direcionamento de handoff por parte da ERB servidora.

### **2º exemplo de soft handoff:**

- a. Durante uma chamada, um dos pilotos no Active Set de uma estação móvel cai abaixo do valor correspondente ao parâmetro  $T\_DROP$ .
- b. A estação móvel inicializa um temporizador. Caso o nível de  $E_c/I_0$  volte a ser maior que  $T\_DROP \times (-0,5 \text{ dB})$ , o temporizador é reinicializado.
- c. O tempo de permanência de  $E_c/I_0 < T\_DROP \times (-0,5 \text{ dB})$  expira o limite do temporizador, correspondente a  $T\_TDROP$ .
- d. A estação móvel reporta o fato à ERB com uma mensagem "Pilot Strength Measurement Message".
- e. Caso a estação móvel receba em seguida uma mensagem da ERB direcionando o handoff - "Handoff Direction Message", a estação móvel irá mover este piloto à sua Neighbor Set. Em seguida, enviará uma mensagem de confirmação "Handoff Completion Message".

Os parâmetros  $T\_DROP$  e  $T\_TDROP$  podem ser ajustados para cada setor. Portanto, podem ser utilizados pela operadora para controlar o limiar de saída de cada célula ou setor. Valores recomendados para o parâmetro  $T\_DROP \times (-0,5 \text{ dB})$  estão na faixa de -20 a -13 dB. Um valor típico para o tempo correspondente a  $T\_TDROP$  é 5 s (CELTEC, 1996).

A Tabela 3.4 a seguir, com mudanças de pilotos entre listas, complementa as informações dadas neste 2º exemplo.

**Tabela 3.4 Movimentação de canais piloto entre as listas**

Lista de origem	Lista de destino	Evento
Active	Candidate	Estação móvel recebe Handoff Direction Message, não incluindo piloto, e o temporizador T_TDROP não expirou.
Active	Neighbor	Estação móvel recebe Handoff Direction Message não incluindo piloto e o temporizador T_TDROP expira.
Active	Remaining	Não utilizada
Candidate	Neighbor	O temporizador T_TDROP expirou <b>ou</b> sobrecarga do Candidate Set.
Candidate	Remaining	Não utilizada

Os parâmetros SRCH\_WIN\_A, SRCH\_WIN\_N, e SRCH\_WIN\_R controlam o tamanho das janelas de busca de canais piloto nas Active/Candidate Set, Neighbor Set e Remaining Set, respectivamente. Seus valores podem ser ajustados para cada setor, na faixa de 4 a 452 chips.

SRCH\_WIN\_A fica centralizada na primeira componente de multiacesso detectada.

SRCH\_WIN\_N e SRCH\_WIN\_R ficam centralizadas no valor do offset de fase, em chips, do canal piloto e das seqüências I e Q.

### 3.3.3 Impacto do soft handoff sobre o número de canais de tráfego em uso

#### 3.3.3.1 Cálculo da relação $E_c/I_0$ no canal piloto

A energia por chip recebida por uma estação móvel em um canal piloto considerado "desejado" pode ser calculada por:

$$E_c = \mu P_1 \times T_c \quad (3.3.11)$$

Onde:

$\mu$ : Fração de potência alocada para o canal piloto das ERBs (admitindo-se esta fração igual em todas as ERBs).

$P_j$ : Potência total que a estação móvel recebe da ERB  $j$ .

$j = 1$  corresponde ao canal piloto desejado, ou seja, aquele que é recebido com a maior intensidade.

Neste caso, a densidade espectral de potência equivalente do ruído recebido total (ruído térmico + interferência) será calculada por:

$$I_0 = \frac{N_t + \sum_{\text{"Todos" } j} P_j}{W_{ss}} \quad (3.3.12)$$

Onde:

$N_t$ : Potência total do ruído térmico no receptor da estação móvel. Conforme visto na Notação,

$N_t = 3,10 \times 10^{-11}$  mW para um canal de 1,23 MHz e figura de ruído 8 dB.

$\sum_{\text{"Todos" } j} P_j$  é a soma das potências transmitidas por todas as ERBs CDMA do sistema, inclusive a

**ERB 1 (e neste caso, trata-se de sua potência afora o canal piloto).**

Lembrando que  $W_{ss} = \frac{1}{T_c}$ , vem:

$$\frac{E_c}{I_0} = \frac{\mu P_i}{N_t + \sum_{\text{"Todos" } j} P_j} \quad (3.3.13)$$

### Exemplo de cálculo de $E_c/I_0$

A Fig. 3.12 retrata um sistema celular CDMA composto de uma ERB isolada. As cores representam faixas de níveis de potência recebida por uma estação móvel no canal piloto.

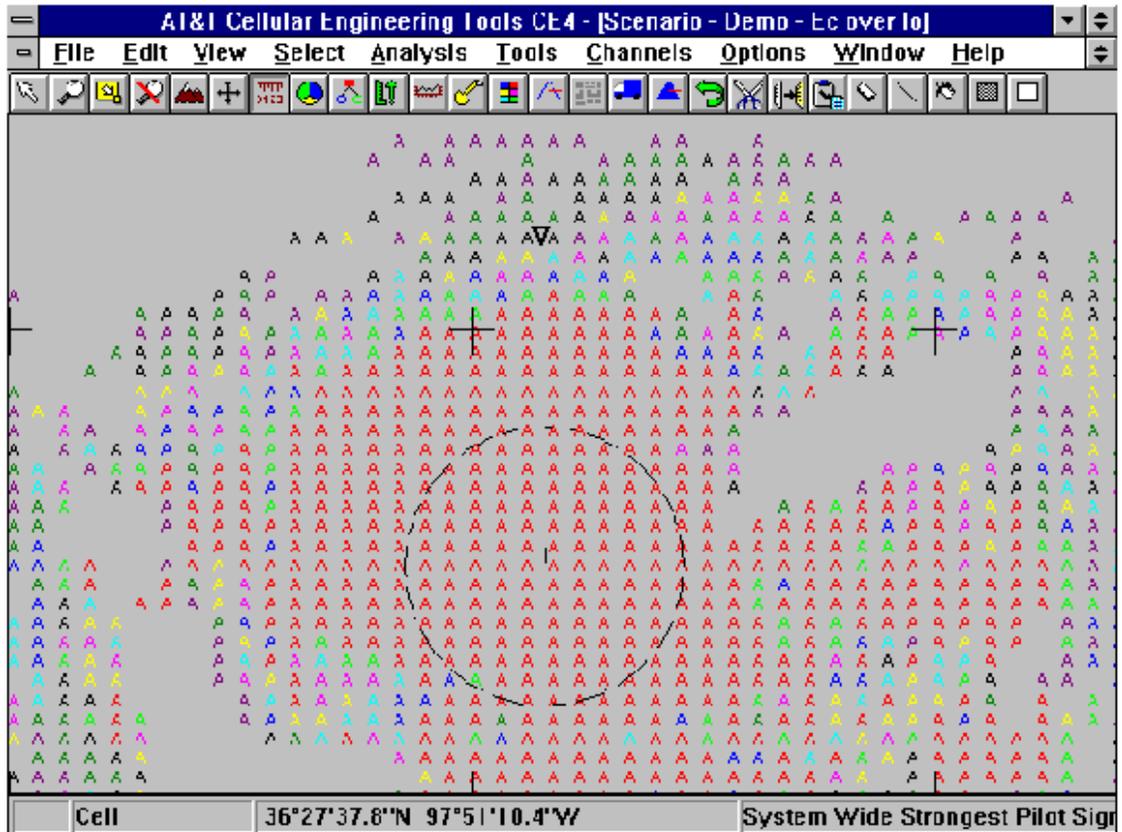
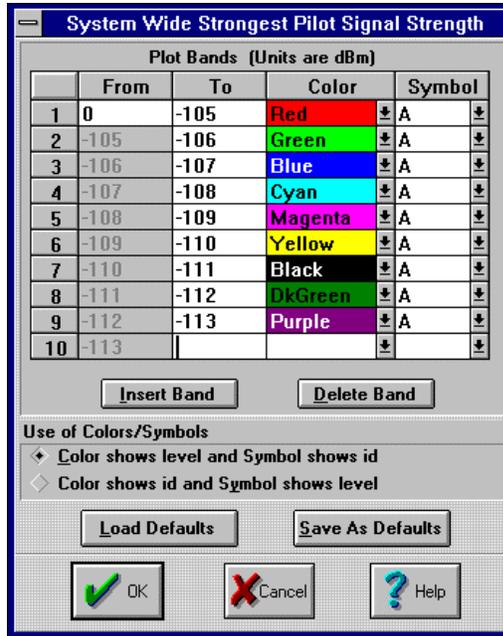


Figura 3.12 Cenário de um sistema celular CDMA composto de uma única célula. As cores representam faixas de níveis de potência recebida pela estação móvel no canal piloto. As legendas são:



A ERB da Fig. 3.12 tem  $ERP$  total de 39 W. A potência  $ERP$  transmitida no canal piloto é de 3 W. Portanto:

$$\mu = \frac{3W}{39W} = \frac{1}{13}$$

O ponto destacado com o símbolo  $\nabla$  está 9,8 km ao norte da ERB. Para uma estação móvel neste ponto, a potência recebida no canal piloto calculada pelo software de predição é -111 dBm. Portanto:

$$\mu P_1 = 10^{-11,1} \text{ mW} = 7,94 \times 10^{-12} \text{ mW}$$

Neste caso particular em que existe uma única célula, o cálculo da potência total recebida pelo móvel, afora o canal piloto, é simples:

$$\sum_{\text{"Todos" } j} P_j = P_1 = 7,94 \times 10^{-12} \times 12 = 9,53 \times 10^{-11} \text{ mW}$$

Em um sistema com múltiplas células, os sinais provenientes de outras células precisariam ser contabilizados também.

A relação  $E_c/I_0$  no ponto marcado com o símbolo  $\nabla$  é calculada por:

$$\frac{E_c}{I_0} = \frac{\mu P_i}{N_t + \sum_{\text{"Todos" } j} P_j} = \frac{7,94 \times 10^{-12}}{3,10 \times 10^{-11} + 9,53 \times 10^{-11}} = 0,0629 = -12,0 \text{ dB}$$

A Fig. 3.13 ilustra o mesmo sistema celular CDMA. Desta vez, as cores representam faixas de níveis de  $E_c/I_0$  recebido pela estação móvel no canal piloto.

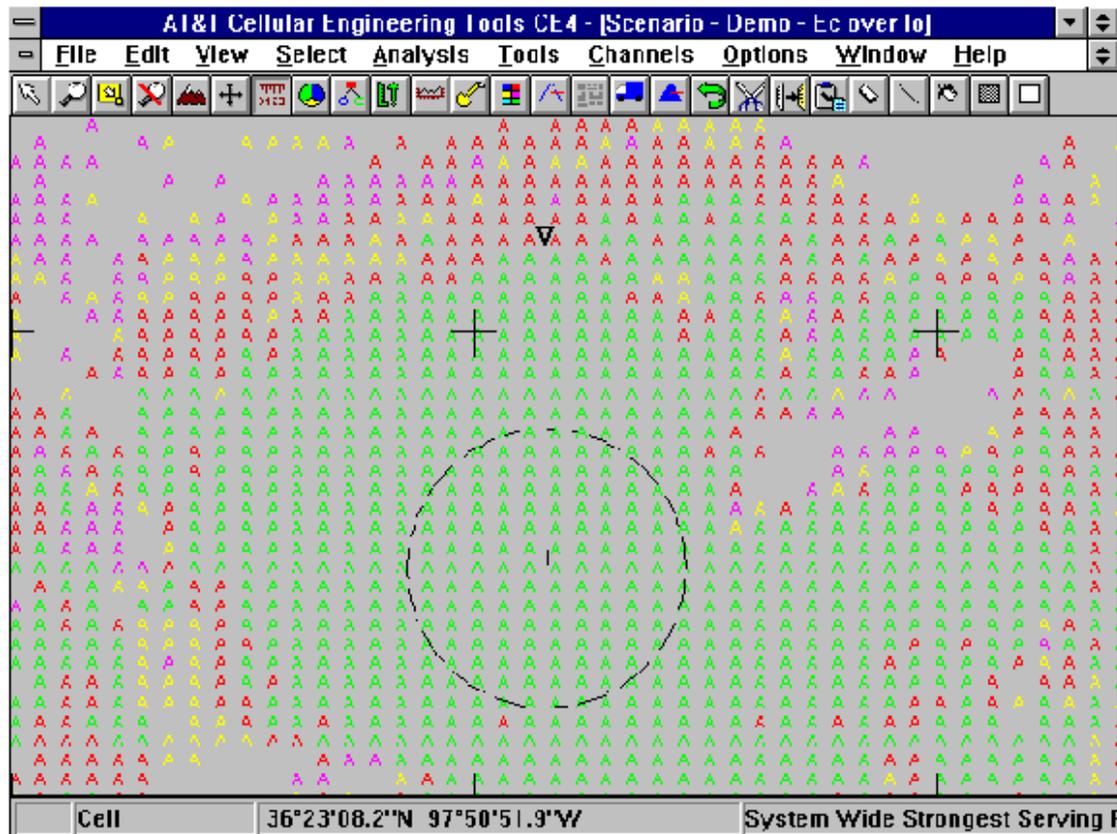
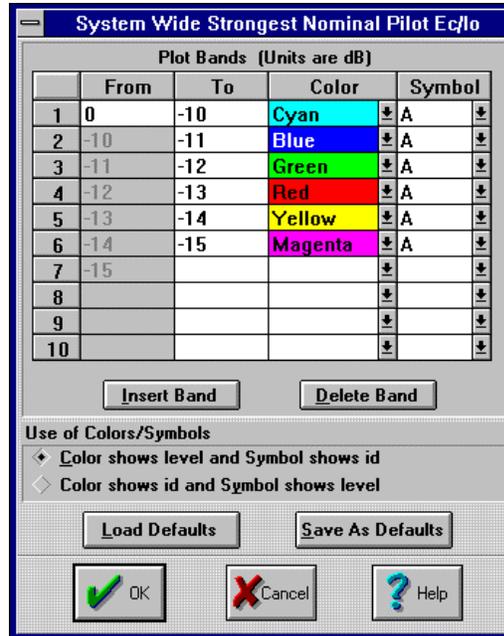


Figura 3.13 Cenário de um sistema celular CDMA composto de uma única célula. As cores representam faixas de  $E_c/I_0$  recebido pela estação móvel no canal piloto. As legendas são:



No mesmo ponto 9,8 km ao norte da ERB, marcado também com o símbolo  $\nabla$ ,  $E_c/I_0$  está na faixa de -12 a -13 dB. O valor calculado de  $E_c/I_0$  está dentro desta faixa.

### 3.3.3.2 Aumento do número de canais em uso devido a soft handoff

A diversidade de fase na recepção dos canais direto e reverso tem como função reduzir a taxa de erro de quadros, tendo como efeito redução do nível de potência necessária, reduzindo os níveis de interferência, contribuindo para o aumento do número de assinantes que podem acessar simultaneamente o mesmo canal de rádio CDMA.

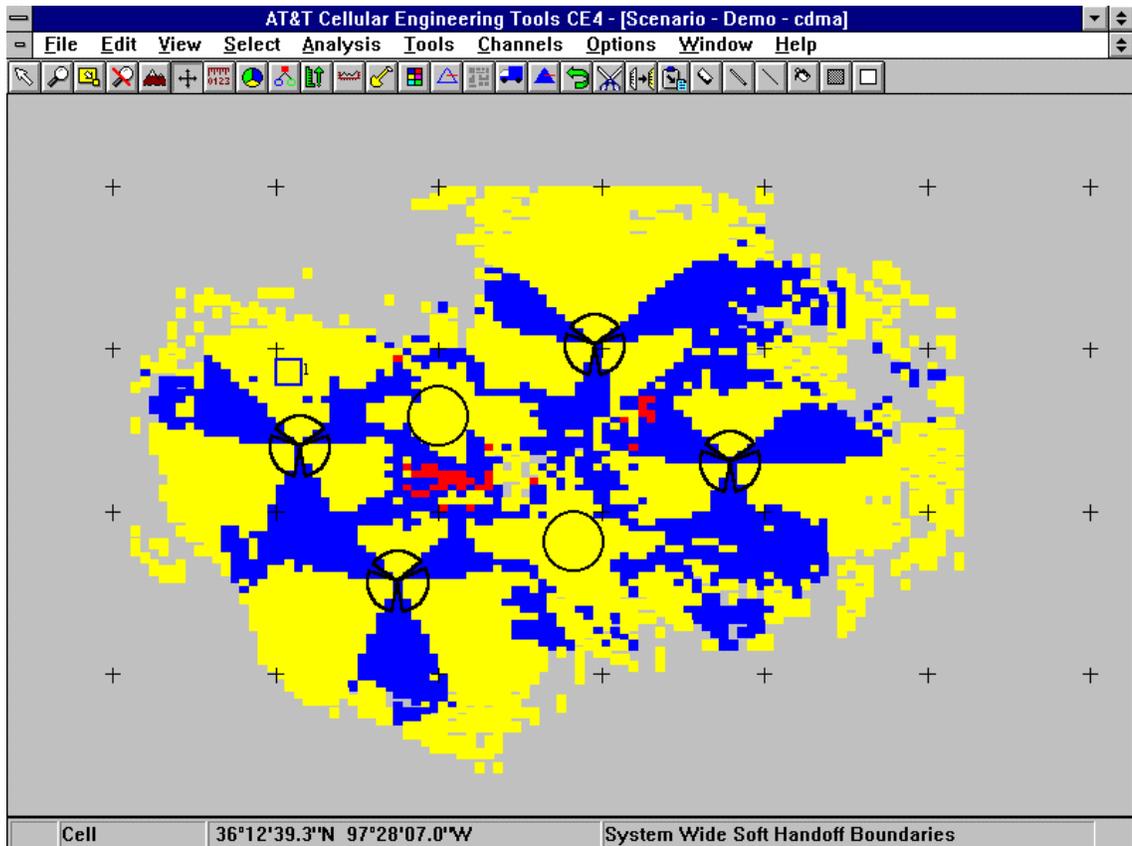
Por outro lado, devido à mesma propriedade de diversidade de fase, uma estação móvel pode estar utilizando mais de um canal de tráfego durante uma chamada, havendo redução do número de canais de tráfego disponíveis no sistema.

O mapa de cobertura da Fig. 3.14 foi gerado utilizando o software de predição. Este sistema opera com apenas um canal de rádio CDMA, havendo algumas células omnidirecionais e outras células de 3 setores.

Nesta simulação de sistema, foram adotados os próprios parâmetros "default" do software, entre os quais:

$T\_ADD \times (-0,5 \text{ dB}) = -14 \text{ dB}$  para todos os setores

$T\_DROP \times (-0,5 \text{ dB}) = -16 \text{ dB}$  para todos os setores.



**Figura 3.14** Sistema celular CDMA, destacando áreas de soft handoff, com  $T\_ADD \times (-0,5 \text{ dB}) = -14 \text{ dB}$  e  $T\_DROP \times (-0,5 \text{ dB}) = -16 \text{ dB}$ .

Neste exercício, considera-se como área de serviço aquela onde  $E_c/I_0 > -16 \text{ dB}$ . Desta forma, as regiões em amarelo representam a totalidade da área de serviço em que **não** há superposição

entre setores (da mesma célula ou de células adjacentes), ou seja, onde cada chamada é atendida por apenas um canal de tráfego. Esta área será denominada de  $A_1$ . O software calculou esta área, que neste exemplo corresponde a 64,84 % da área de serviço.

As regiões de superposição entre dois setores, sejam da mesma célula ou de células distintas, estão destacadas em azul, e neste exemplo correspondem a 34,38 % da área de serviço. Esta área será denotada por  $A_2$ .

As regiões de superposição entre três setores, sejam da mesma célula ou não, estão destacadas em vermelho, e neste exemplo correspondem a 0,78 % da área de serviço. Esta área será denominada  $A_3$ .

Para determinar o aumento do uso de canais devido a soft handoff, é necessário ter informações estatísticas sobre a distribuição de tráfego na área de serviço. Seja  $\rho(x,y)$  a densidade de tráfego em erl/m<sup>2</sup> em um ponto de coordenadas cartesianas  $(x,y)$  dentro da área de serviço. Normalmente, o período mais visado para realizar medidas de tráfego é a HMM.

Pode-se definir um fator de aumento de uso de canais devido a soft handoff como:

$$F_{ASH} = \frac{\text{Número total de canais de tráfego em uso}}{\text{Número total de estações móveis em conversação}}$$

$$F_{ASH} = \frac{\int_{A_1} \rho(x, y) dx dy + 2 \int_{A_2} \rho(x, y) dx dy + 3 \int_{A_3} \rho(x, y) dx dy}{\int_A \rho(x, y) dx dy} \quad (3.3.14)$$

onde  $A = A_1 + A_2 + A_3$  é a área de serviço.

Simplificando a expressão anterior, vem:

$$F_{ASH} = 1 + \frac{\int_{A_2} \rho(x, y) dx dy + 2 \int \rho(x, y) dx dy}{\int_A \rho(x, y) dx dy} + \frac{A_3}{\int_A \rho(x, y) dx dy} \quad (3.3.15)$$

No exemplo dado neste item, admitindo-se  $\rho$  uniforme em toda a área de atendimento, obtém-se:

$$F_{ASH} = 1 + 0,3438 + 2 \times 0,0078 = 1,3594$$

Este exemplo ilustra que há um acréscimo no número de canais de tráfego para atender as ligações em curso. Neste caso particular, o acréscimo foi de 35,94 %. Para otimizar um sistema celular CDMA, é desejável reduzir as áreas de superposição entre células, principalmente em regiões de alto tráfego. Ao mesmo tempo, é necessário minimizar as regiões em que aparece o fundo cinza na Fig. 3.14, que correspondem a regiões sem cobertura.

Um valor típico para o aumento do número de canais de tráfego devido a soft handoff, observado em sistemas celulares em operação com células de 3 setores (LUCENT TECHNOLOGIES, 1997) é 30 %, sendo que o número máximo de chamadas simultâneas por setor é aproximadamente 19. Este valor será utilizado no Capítulo 4, sobre transição entre tecnologias.

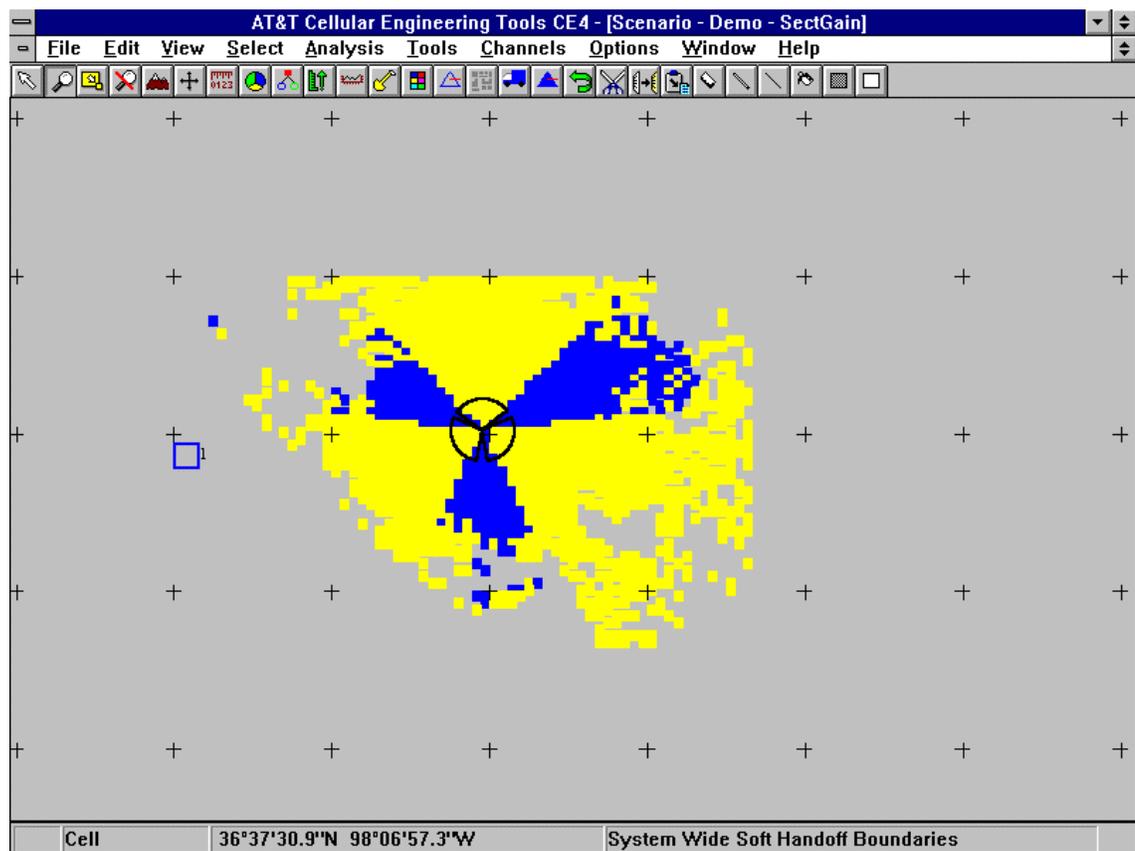
### 3.3.3.3 Cálculo do ganho de setorização

Para determinar o ganho obtido setorizando uma célula em determinadas condições, deve-se estudar a superposição entre lóbulos de antenas adjacentes. Para tanto, é necessário analisar uma célula isolada, como representa a Fig. 3.15. No presente estudo, considera-se que as regiões onde ocorre soft handoff representam a superposição entre setores da mesma célula. O

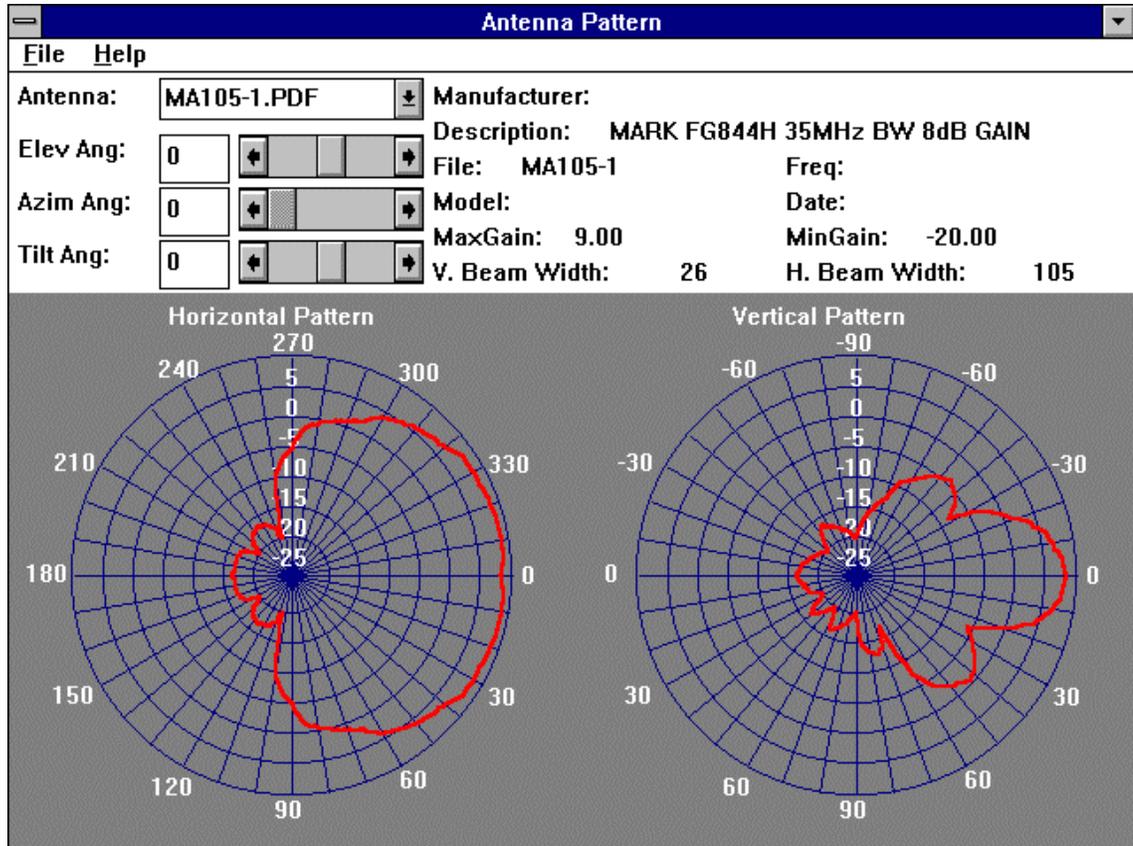
diagrama de radiação da antena utilizada neste exemplo é ilustrado na Fig. 3.16. O ganho de setorização pode ser calculado por:

$$G_s = \frac{N^\circ \text{ de setores}}{F_{ASH}} \quad (3.3.16)$$

Novamente, a área de serviço considerada é aquela onde  $E_c/I_0 > -16$  dB. As regiões em amarelo representam a totalidade da área de serviço em que **não** há superposição entre setores ( $A_1$ ). As regiões de superposição entre setores adjacentes ( $A_2$ ) estão destacadas em azul, e neste caso correspondem a 22,61% da área de serviço.



**Figura 3.15** Cenário com uma célula setorizada. As áreas de superposição entre lóbulos de antenas adjacentes estão representadas em azul. O restante da área de serviço está representada em amarelo. O diagrama de radiação das antenas utilizadas neste exemplo é ilustrado na Fig. 3.16.



**Figura 3.16** Diagramas de radiação das antenas MA105-1 (Mark Antennas), utilizadas para compor o cenário da Fig. 3.15.

Neste caso particular, temos:

$$F_{ASH} = 1 + 0,2261 = 1,2261$$

Portanto:

$$G_s = \frac{3}{1,2261} = 2,45. \text{ Este valor é muito próximo de 2,55, que é o valor encontrado, por}$$

exemplo, na referência QUALCOMM (1992). NEWSON, HEATH (1994) obtiveram  $G_s = 2,6$ .

O valor de  $G_s$  depende do tipo de antena utilizado.

# TRANSIÇÃO

## 4.1 INTRODUÇÃO

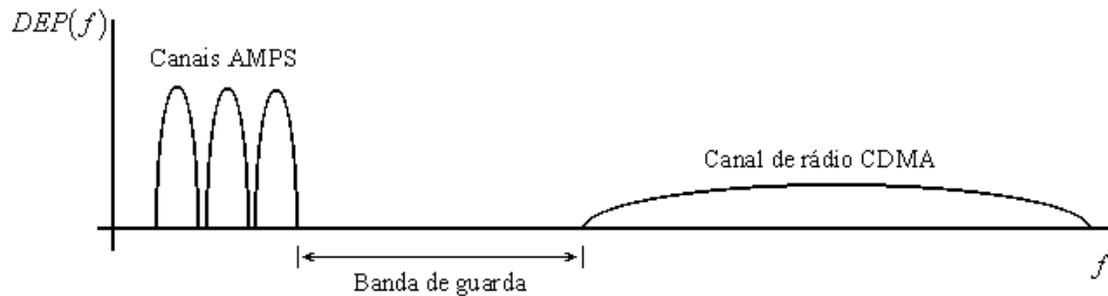
### 4.1.1 Evitando interferências

O principal objetivo da migração de um sistema celular com tecnologia AMPS para CDMA é poder atender um número maior de assinantes. Em um sistema onde há convívio entre ambas as tecnologias, procuram-se evitar interferências entre as células analógicas e as digitais.

O primeiro passo de transição de um sistema celular AMPS para digital seria introduzir um canal de rádio CDMA em uma ou mais células. Cada canal de rádio CDMA tem largura igual a 1,23 MHz, o que corresponde a  $1,23 \text{ MHz} / 30 \text{ kHz} = 41$  canais AMPS consecutivos.

## Banda de guarda

Apesar de se poder adotar como premissa que a DEP de um canal de rádio CDMA é uniforme em toda a banda ocupada, é necessário reservar uma "banda de guarda" entre um canal de rádio CDMA e canais AMPS, como ilustrado na Fig. 4.1. Neste caso, banda de guarda é uma faixa de frequência em que não há transmissão de sinais, para evitar interferências entre canais AMPS e CDMA.



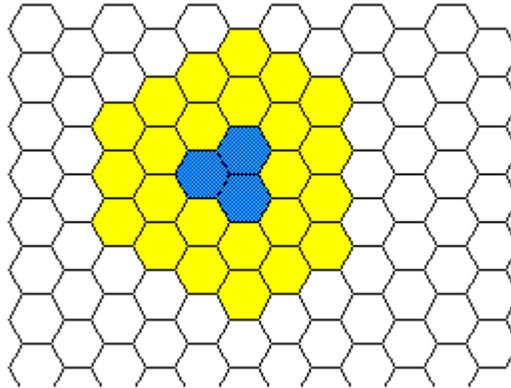
**Figura 4.1** Banda de guarda entre canais AMPS e um canal de rádio CDMA.

O padrão IS-95 recomenda uma banda de guarda de no mínimo 270 kHz, o que corresponde a 9 canais AMPS consecutivos. Para a introdução do primeiro canal de rádio CDMA em um sistema AMPS, é necessário reservar banda de guarda dos dois lados. Portanto, será necessário desativar  $9 + 41 + 9 = 59$  canais AMPS consecutivos.

No mesmo padrão IS-95, não há recomendações quanto a banda de guarda entre canais de rádio CDMA. Assim, é recomendável que os canais de rádio CDMA a serem ativados após o primeiro sejam contíguos, para minimizar o uso de bandas de guarda. Desta forma, faz-se o melhor proveito possível do espectro disponível.

## Regiões de guarda

"Regiões de guarda" são regiões onde não são transmitidos canais AMPS que coincidem com a faixa reservada para um canal de rádio CDMA, para evitar interferências entre ambos os sistemas, como ilustrado na Fig. 4.2.



**Figura 4.2** Sistema celular onde convivem as tecnologias AMPS e CDMA. Legendas:

	<b>Células que utilizam um mesmo canal de rádio CDMA.</b>
	<b>Células que utilizam canais AMPS na mesma faixa de frequência utilizada pelo canal de rádio CDMA.</b>
	<b>Região de guarda.</b>

Durante a transição entre tecnologias, devem-se aproveitar ao máximo as regiões disponíveis para exploração da telefonia. As regiões de guarda são áreas onde o espectro é sub-utilizado. Portanto, sua área precisa ser minimizada.

#### **4.1.2 Três estratégias de migração (HALPERN et al., 1994)**

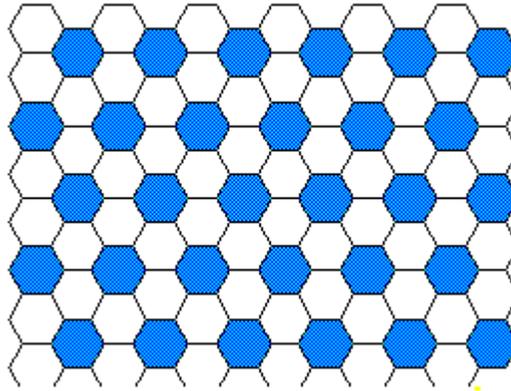
Apresentam-se a seguir três alternativas (**a**, **b**, **c**) para migrar de um sistema celular constituído somente por células AMPS para um sistema onde existe convivência entre células AMPS e CDMA:

##### **a. Área de serviço totalmente iluminada com baixa densidade de células CDMA**

Esta alternativa consiste de cobrir toda uma região de serviço com um canal de rádio CDMA, ativando-o em algumas ERBs (não em todas). A Fig. 4.3 ilustra um sistema celular com ambas as tecnologias, AMPS e CDMA, iluminado totalmente por um canal de rádio CDMA, sem que este seja transmitido por todas as ERBs.

Para evitar interferências, será necessário desativar em toda a área de serviço os canais AMPS que coincidem com a faixa de frequência ocupada pelo canal de rádio CDMA em operação mais a banda de guarda.

O resultado é que um novo sistema digital fica superposto ao sistema analógico existente. Dentro da área iluminada pelo canal de rádio CDMA ativo, não haverá necessidade de handoff intersistemas (exceto eventualmente em regiões não iluminadas por sinais CDMA, que estejam atendidas pelo sistema AMPS). Também não haverá necessidade de handoff de células AMPS para células CDMA, que não é especificado no padrão IS-95.



**Figura 4.3** Área de serviço em que um canal de rádio CDMA foi ativado somente em 1/3 das células (destacadas em azul). Havendo superposição entre células digitais adjacentes, este canal será acessível em toda a área de serviço.

Algumas vantagens desta alternativa de migração são:

- O uso de um número menor de ERBs em relação ao sistema celular analógico reduz custos.
- O espectro disponível para telefonia fica dividido em duas faixas: uma para AMPS e outra para CDMA. Portanto, seria possível atribuí-las a duas concessionárias distintas. Neste caso, cada concessionária deveria possuir uma CCC.
- A concessionária da rede digital pode oferecer a seus assinantes atendimento em toda a área de serviço.
- Não é necessário utilizar regiões de guarda.

Algumas desvantagens desta alternativa de migração são:

- Devido à desativação de canais analógicos em toda a área de serviço, haverá redução do grau de atendimento para assinantes analógicos. Para compensar a falta destes canais, será necessário prover rapidamente os assinantes que geram mais tráfego com telefones celulares duais, ou seja, que suportam ambas as tecnologias.

- Devido ao tamanho maior das células CDMA, será necessário que as estações móveis duais transmitam potência maior no canal de rádio CDMA, reduzindo assim a duração das baterias.

Após a ativação do primeiro canal de rádio CDMA, é possível seguir dois caminhos para aumentar a capacidade do sistema:

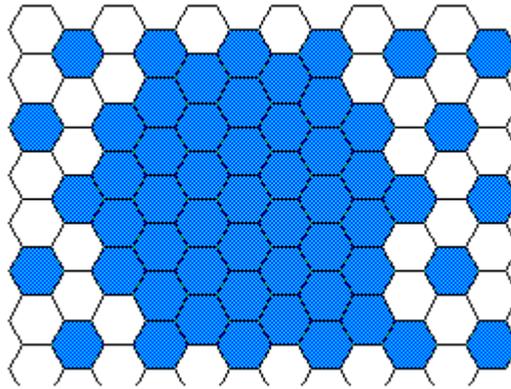
- Ativar o mesmo canal de rádio CDMA em um número cada vez maior de estações.
- Ativar um segundo canal de rádio CDMA nas mesmas estações.

**b. Área de serviço totalmente iluminada com alta densidade de células CDMA**

Consiste de ativar um canal de rádio CDMA em todas as ERBs AMPS nas áreas de tráfego mais intenso. A área das células CDMA fica reduzida em relação à alternativa (a) anterior.

Nas regiões em que o tráfego não é muito intenso, o mesmo canal é ativado apenas em algumas ERBs, permitindo acesso dos assinantes duais a um mesmo canal de rádio CDMA. Nestas regiões, as células digitais precisam ser maiores e a densidade de tráfego será menor.

A Fig. 4.4 ilustra um exemplo desta alternativa. Neste exemplo, as ERBs que operam o canal de rádio CDMA são mais esparsas na periferia do desenho.



**Figura 4.4** Área de serviço em que um canal de rádio CDMA foi ativado nas células destacadas em azul. Na área de tráfego mais intenso, todas as ERBs operam o canal digital. Na área periférica, de tráfego menos intenso, o mesmo canal foi ativado em parte das ERBs.

Algumas vantagens desta alternativa em relação à alternativa (a) são:

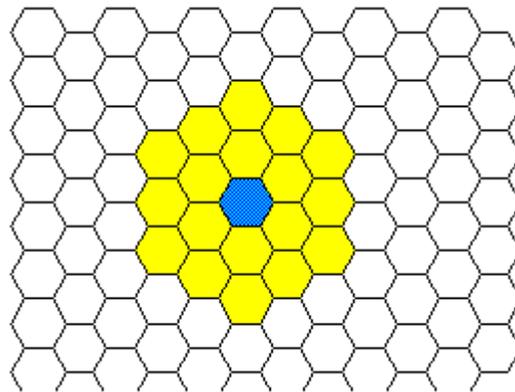
- Este sistema suporta um número maior de assinantes.
- Devido ao tamanho reduzido das células CDMA, as estações móveis duais poderão transmitir em baixa potência, aumentando assim a duração das baterias.

Em relação à alternativa (a), a principal desvantagem desta alternativa é que ela requer equipamento digital em todas as ERBs do sistema, o que aumenta o valor do investimento inicial.

Após a ativação do primeiro canal de rádio CDMA, só é possível aumentar a capacidade do sistema ativando um segundo canal de rádio CDMA nas estações, exceto nas regiões periféricas, onde ainda é possível converter ERBs analógicas em digitais.

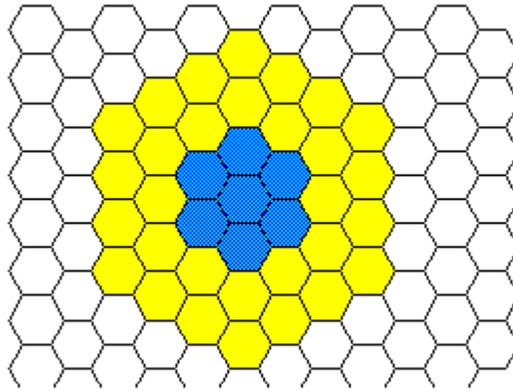
**c. Área de serviço iluminada por células CDMA apenas nas localizações mais estratégicas**

Esta alternativa foi escolhida para ser analisada neste trabalho. Neste caso, a ativação de células CDMA é concentrada apenas em áreas estratégicas. Por exemplo, na Fig. 4.5 um canal de rádio CDMA foi ativado em apenas uma célula em uma das áreas estratégicas.



**Figura 4.5** Parte de um sistema celular AMPS onde um canal de rádio CDMA foi ativado em apenas uma célula. Para evitar interferências com canais AMPS na mesma frequência, foi utilizada uma região de guarda. As legendas são as mesmas da Fig. 4.2.

O número de células que operam o mesmo canal de rádio CDMA pode aumentar na área onde há tráfego mais intenso. Na Fig. 4.6, o mesmo canal de rádio CDMA foi ativado em 7 células adjacentes (que poderiam constituir um cluster).



**Figura 4.6** Sistema celular AMPS em que um canal de rádio CDMA foi ativado em 7 células adjacentes. As legendas são as mesmas da Fig. 4.2.

As principais vantagens desta alternativa em relação às anteriores são:

- Nas áreas mais estratégicas, existe uma grande concentração de células CDMA, oferecendo uma vasta canalização para os assinantes digitais. Nas demais áreas, ao mesmo tempo, todos os canais AMPS estão disponíveis para reuso, ao contrário das alternativas apresentadas anteriormente, em que há segmentação do espectro.
- O investimento inicial é menor, pois o equipamento digital fica concentrado apenas na região (ou nas regiões) de maior tráfego.
- Esta alternativa permite à concessionária do serviço móvel celular ponderar o investimento em equipamentos com tecnologia CDMA de acordo com a porcentagem de assinantes digitais, administrando sua localização conforme a expansão do mercado em cada região.

As principais desvantagens desta alternativa em relação às anteriores são:

- A concessionária da rede digital não pode oferecer a seus assinantes atendimento em toda a área de serviço.

- Um assinante que origine ou receba uma chamada dentro da região "digital" e que se locomova para a região "analógica" passará a utilizar um canal AMPS. Entretanto, um assinante que origine ou receba uma chamada dentro da região analógica e que se locomova para a região digital não poderá utilizar canais CDMA até o fim desta mesma chamada, pois ainda não está padronizado o handoff de AMPS para CDMA.

Em relação à (b), a principal desvantagem desta alternativa é que as células que estão na região de guarda têm capacidade reduzida em relação às demais, pois não operam os canais de rádio CDMA que estão ativos em outras células, nem os canais AMPS de mesma frequência. Nota-se nas Figs. 4.5 e 4.6 que a região de guarda tem número de células maior que a região digital.

**Alguns dos fatores a serem determinados para administrar a convivência entre canais AMPS e CDMA na mesma faixa de frequência, nesta alternativa de migração, são:**

- Quantos e quais canais AMPS devem ser desativados para possibilitar a introdução de um canal de rádio CDMA em determinadas células e nas regiões de guarda correspondentes.
- Impacto da ativação de um canal CDMA na relação portadora/interferência de canais analógicos em outras células.
- Verificar se há redução de interferência em uma célula AMPS, quando uma célula AMPS cocanal é substituída por uma célula CDMA.
- Quais regiões devem ser utilizadas como guarda. Verifica-se mais adiante, no Item 4.6, que no início da migração, o número de células das regiões de guarda é muito grande em relação ao número de células que operam com canais de rádio CDMA, de modo que o ganho de capacidade devido à introdução de um canal de rádio CDMA não compensa a perda de capacidade devida à desativação de canais AMPS nas células CDMA e nas regiões de guarda.

Portanto, a capacidade total do sistema não aumenta de imediato. Na medida em que forem acrescentadas mais células CDMA, seu número aumenta em relação ao número de células nas regiões de guarda, aumentando assim a capacidade total do sistema. A capacidade também aumenta quando é ativado um maior número de canais de rádio CDMA por célula.

#### 4.2 INTERFERÊNCIA DO TRANSMISSOR DE UMA ERB CDMA NO RECEPTOR DE UMA ESTAÇÃO MÓVEL AMPS

Considere-se uma ERB transmitindo um canal de rádio CDMA à distância  $r$  de um estação móvel AMPS operando dentro da mesma faixa. A DEP de um canal de rádio CDMA pode ser considerada uniforme em toda a banda ocupada de 1,23 MHz. Então, a potência de interferência da ERB CDMA no receptor da estação móvel AMPS pode ser calculada, em dBm, por:

$$I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA} = P_r + 10 \log \left( \frac{30 \text{kHz}}{1,23 \text{MHz}} \right) \quad (4.2.1)$$

onde  $10 \log \left( \frac{30 \text{kHz}}{1,23 \text{MHz}} \right) = -16,1 \text{ dB}$  e  $P_r$  é obtido utilizando o modelo de propagação de perdas lineares (LEE, 1993, 1995).

##### Exemplo de aplicação da expressão (4.2.1)

Considere-se o cenário da Fig. 4.7, que representa um sistema celular composto de duas ERBs. A ERB n° 1 transmite um canal de rádio CDMA (canal 283) e a ERB n° 2 transmite um único canal AMPS (canal 283). As cores representam faixas de níveis de potência do canal de rádio CDMA transmitido pela ERB n° 1. No ponto destacado com  $\nabla$ , este nível está entre -90 e -89 dBm. Adotando-se o valor médio desta faixa,  $P_r = -89,5 \text{ dBm}$ , calcula-se:

$$I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA} = P_r + 10 \log \left( \frac{30 \text{kHz}}{1,23 \text{MHz}} \right) = -89,5 - 16,1 = -105,6 \text{ dBm}$$

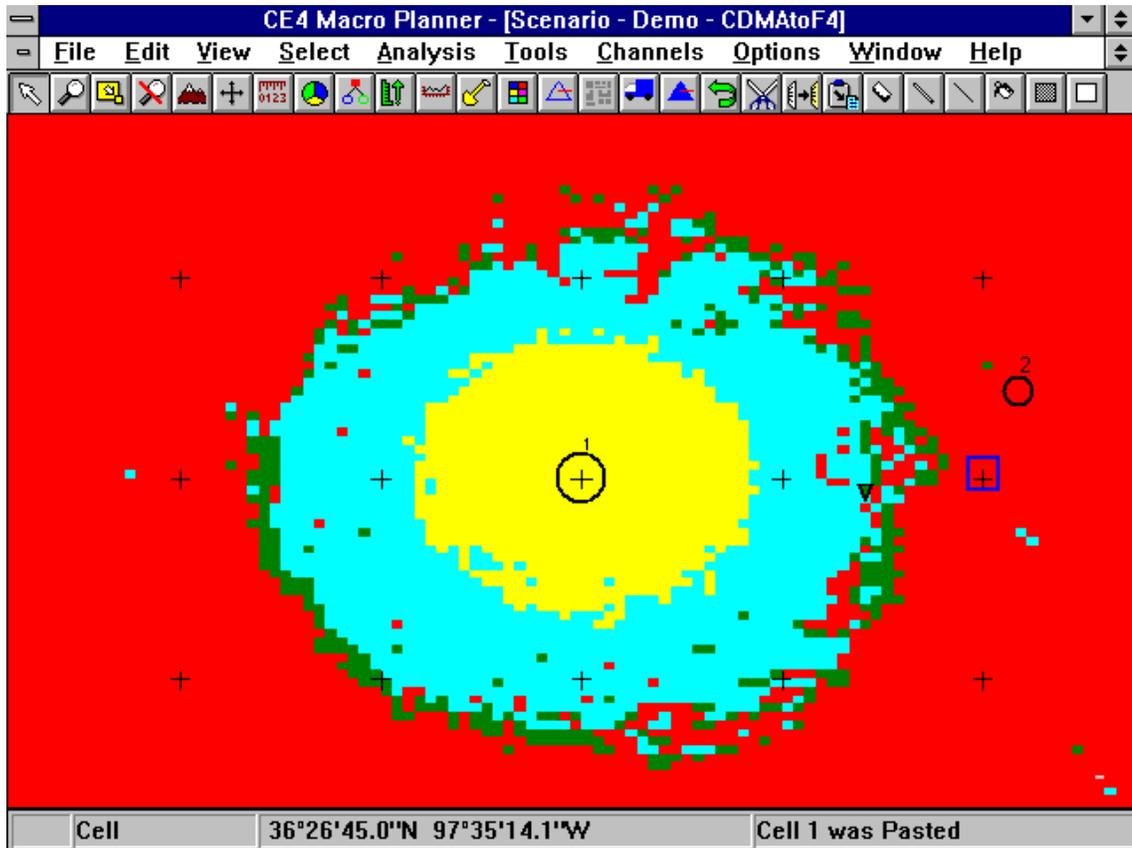
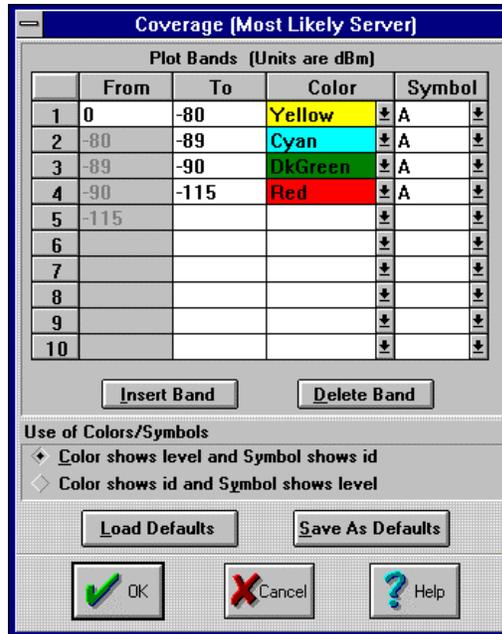


Figura 4.7 Cenário de um sistema celular composto de duas ERBs. A ERB n° 1 transmite o canal 283 CDMA. A ERB n° 2 transmite o canal 283 AMPS. As cores representam faixas de níveis de potência do canal de rádio CDMA. No ponto destacado com ∇, o nível está entre -90 e -89 dBm. As legendas são:



O mesmo cenário da Fig. 4.7 foi utilizado para gerar a análise apresentada na Fig. 4.8, onde as cores representam faixas de níveis de  $I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA}$ . No ponto destacado com  $\nabla$ ,  $I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA}$  está entre -106 e -105 dBm. O valor calculado de  $I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA}$  encontra-se dentro desta faixa.

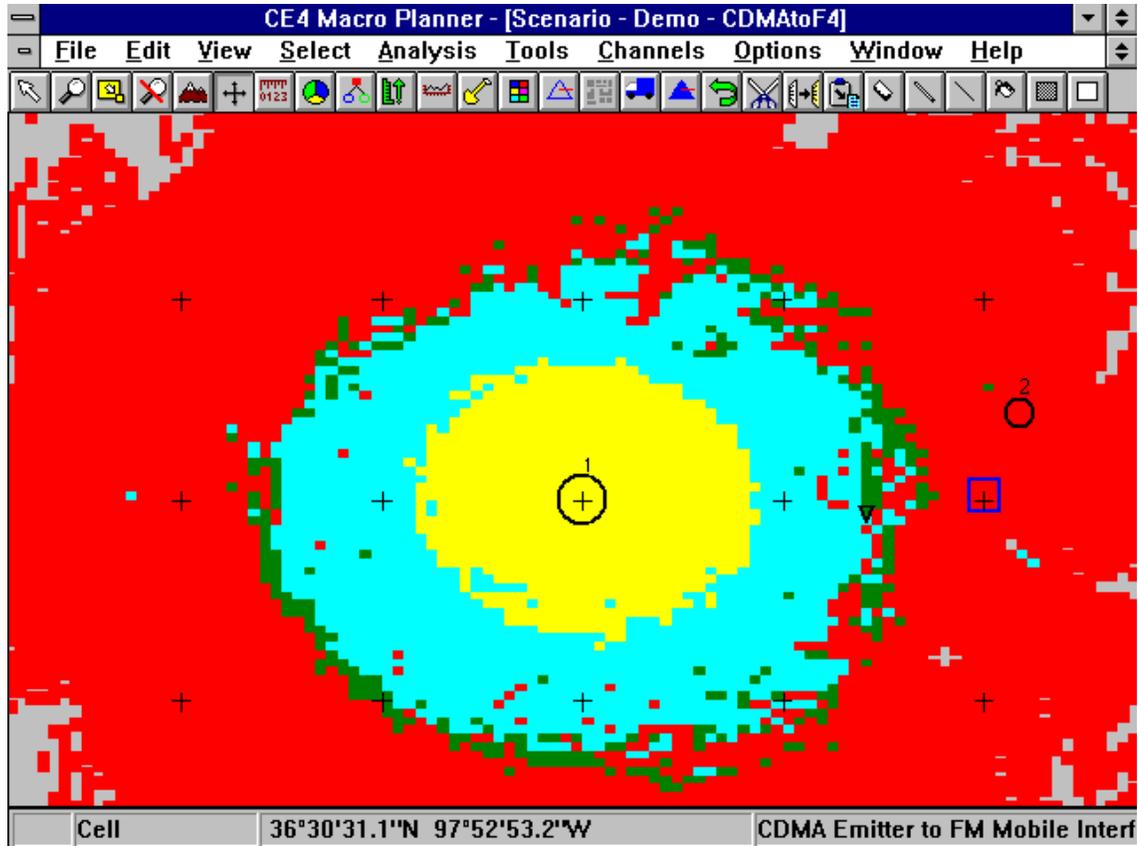


Figura 4.8 Mesmo cenário da Fig. 4.7: sistema celular composto de uma única célula que transmite o canal 283 AMPS e o canal 283 CDMA. As cores representam faixas de níveis de  $I_{MovAMPS \leftarrow ERCDMA}$ . No ponto destacado com  $\nabla$ , o nível está entre -106 e -105 dBm. As legendas são:

**CDMA Emitter to FM Mobile Interference**

Plot Bands (Units are dBm)

	From	To	Color	Symbol
1	0	-96	Yellow	A
2	-96	-105	Cyan	B
3	-105	-106	DkGreen	C
4	-106	-121	Red	D
5	-121			
6				
7				
8				
9				
10				

Use of Colors/Symbols

- Color shows level and Symbol shows id
- Color shows id and Symbol shows level

### **4.3 TABELAS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS AMPS COM CANAIS DE RÁDIO CDMA SUPERPOSTOS (HALPERN et al., 1994)**

Os números dos canais de rádio CDMA e suas frequências centrais são os mesmos do sistema AMPS. Conforme as seções 7.1.1.1 e 7.6.1.1 do padrão IS-95, uma ERB CDMA deverá operar ao menos um dos canais de rádio a seguir:

- Canal de rádio CDMA Primário, que no bloco A tem número 283, e no bloco B tem número 384.
- Canal de rádio CDMA Secundário, que no bloco A tem número 691, e no bloco B tem número 777.

A estação móvel irá realizar a aquisição do sistema a partir de um destes canais. Eles estão destacados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Cada canal de rádio CDMA ocupa banda igual a 1,23 MHz, o que corresponde a  $1,23 \text{ MHz} / 30 \text{ kHz} = 41$  canais AMPS.

Para evitar interferências entre um canal de rádio CDMA e um canal AMPS adjacente, o padrão IS-95 recomenda que seja reservada uma banda de guarda de no mínimo  $9 \times 30 \text{ kHz}$ , o que corresponde a 9 canais AMPS consecutivos. Portanto, para a introdução de um canal de rádio CDMA em um sistema AMPS (primeiro passo da transição para digital), será necessário desativar  $9 + 41 + 9 = 59$  canais AMPS consecutivos, ou seja, 3 canais em 17 grupos e 2 canais em 4 outros grupos.

Nota-se que a faixa A' não é larga suficiente para oferecer a banda de guarda necessária do canal CDMA Secundário do bloco A (# 691). Estão destacados com a mesma legenda na Tabela 4.1 os canais AMPS que deveriam ser evitados no bloco B para completar a banda de guarda do canal CDMA Secundário do bloco A.

Tabela 4.1

Canais de rádio CDMA Primário e Secundário superpostos aos canais do bloco A

Tabela Geral de Alocação de Canais: Bloco A

Sistemas AMPS e CDMA

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Faixas:
	AI	BI	CI	DI	EI	FI	GI	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	
C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
a	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	
n	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	
a	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	
i	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	
s	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	
d	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	
e	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	
v	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	
o	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	
z	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	
	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	
	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	
	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	
	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312				
	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	
	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	
	715	716																				
	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023							
Canais de controle	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	313	314	315	

Legendas:



Canal CDMA # 283: Primário



Canal CDMA # 691: Secundário



Banda de guarda correspondente ao canal CDMA Primário



Banda de guarda correspondente ao canal CDMA Secundário

Tabela 4.2

Canais de rádio CDMA Primário e Secundário superpostos aos canais do bloco B

Tabela Geral de Alocação de Canais: Bloco B  
Sistemas AMPS e CDMA

Grupos	Canais																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3
Canais control	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354
C	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375
a	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396
n	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417
a	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438
i	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459
s	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480
d	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501
e	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522
v	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543
o	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564
z	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585
	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606
	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627
	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648
	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666			
	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753
	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774
	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795
	796	797	798	799																	

Legendas:

 Canal CDMA # 384: Primário

 Canal CDMA # 777: Secundário

 Banda de guarda correspondente ao Canal CDMA Primário

 Banda de guarda correspondente ao Canal CDMA Secundário

Além dos canais Primário e Secundário, uma ERB CDMA pode operar também com outros canais de rádio CDMA cujos números não estão padronizados e ficam a critério de cada operadora. Durante um processo de transição entre tecnologias, há várias possibilidades de alocação de canais. No padrão IS-95, não há recomendações de banda de guarda entre canais de rádio CDMA adjacentes. Portanto, é recomendável que sejam utilizados canais contíguos, aproveitando-se da forma mais eficiente possível o espectro disponível.

Apresenta-se nas Tabelas 4.3 e 4.4 a seguir um exercício de configuração de canais AMPS e CDMA. Neste exercício, foi alocado o número máximo possível de canais de rádio CDMA nos blocos A e B. Devido à limitação de banda, é possível operar até 9 (nove) canais de rádio CDMA no bloco A, e até 8 (oito) canais de rádio CDMA no bloco B.

Tabela 4.3

Configuração máxima de canais de rádio CDMA superpostos ao bloco A.

Tabela Geral de Alocação de Canais: Bloco A  
Sistemas AMPS e CDMA

Grupos	Faixas:																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3
C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
a	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
a	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
n	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
a	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
i	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
s	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147
d	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
e	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189
v	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
o	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231
z	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252
	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273
	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294
	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312			
																667	668	669	670	671	672
	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693
	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714
	715	716																			
	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023						
				991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008
Canais de controle	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	313	314	315

Legendas:

- Canal CDMA # 283: Primário
- Canal CDMA # 691: Secundário
- Banda de guarda
- Canal CDMA #160
- Canal CDMA #37
- Canal CDMA #691: Secundário
- Canal CDMA #119
- Canal CDMA #1019
- Canal CDMA #78
- Canal CDMA #242
- Canal CDMA #201

Na configuração máxima obtida para o bloco A, constam:

- 9 canais de rádio CDMA
- 21 canais de controle AMPS
- Banda de guarda correspondente a 26 canais AMPS

Tabela 4.4 Configuração máxima de canais de rádio CDMA superpostos ao bloco B.

Tabela Geral de Alocação de Canais: Bloco B  
Sistemas AMPS e CDMA

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Canais control	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	
	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	
	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	
	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	
	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	
	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	
	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	
	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	
	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	
	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	
	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	
	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	
	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	
	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	
	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	
	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	
	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666				
							717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732
	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	
	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	
	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	
	796	797	798	799																		

Legendas:

- Canal CDMA # 384; Primário
- Canal CDMA # 507
- Canal CDMA # 630
- Canal CDMA # 425
- Canal CDMA # 548
- Canal CDMA # 777; Secundário
- Canal CDMA # 466
- Canal CDMA # 589
- Canais AMPS analógicos
- Banda de guarda

Na configuração máxima obtida para o bloco B, constam:

- 8 canais de rádio CDMA
- 21 canais de controle AMPS
- 38 canais de voz analógicos.
- Banda de guarda correspondente a 29 canais AMPS.

A Tabela 4.5 descreve a utilização das faixas de 30 kHz originalmente utilizadas para canais AMPS. Foram hachurados e destacados com fonte azul os campos correspondentes às bandas de guarda que têm número de canais inferior a 9, que é o mínimo recomendado. O número de canais de banda de guarda na faixa A" é 8, e não 9. Quanto às bandas de guarda de 4 e 5 canais, respectivamente, na faixa A', uma forma de se contornar este problema seria reservar os canais 662 a 666 da faixa B e 717 a 720 da faixa B'. Quanto aos 2 canais de banda de guarda entre a faixa B' e a banda de frequência superior adjacente à banda reservada para o serviço móvel celular, uma forma de se contornar este problema seria trocar o canal 777 pelo canal 770. Esta troca somente seria possível nas células onde o canal Primário (384) estivesse ativo.

**Tabela 4.5 Número de canais em cada faixa.**

Faixa	Descrição	Nº de faixas de 30 kHz	Faixa de freq do canal reverso	Faixa de freq do canal direto
A''	<b>Banda de guarda</b>	<b>8</b>	824,040 a	869,040 a
	Canal CDMA # 1019	25	825,000	870,000
A	Canal CDMA # 1019 (continuação)	16	825,030 a 834,990	870,030 a 879,990
	Canal CDMA # 37	41		
	Canal CDMA # 78	41		
	Canal CDMA # 119	41		
	Canal CDMA # 160	41		
	Canal CDMA # 201	41		
	Canal CDMA # 242	41		
	Canal CDMA # 283	41		
	Banda de guarda	9		
Canais de controle AMPS	21			
B	Canais de controle AMPS	21	835,020 a 844,980	880,020 a 889,980
	Banda de guarda	9		
	Canal CDMA # 384	41		
	Canal CDMA # 425	41		
	Canal CDMA # 466	41		
	Canal CDMA # 507	41		
	Canal CDMA # 548	41		
	Canal CDMA # 589	41		
	Canal CDMA # 630	41		
	Banda de guarda	9		
	Canais de voz AMPS	7		
A'	<b>Banda de guarda</b>	<b>4</b>	845,010 a	890,010 a
	Canal CDMA # 691	41	846,480	891,480
	<b>Banda de guarda</b>	<b>5</b>		
B'	Canais de voz AMPS	31	846,510 a 848,970	891,510 a 893,970
	Banda de guarda	9		
	Canal CDMA # 777	41		
	<b>Banda de guarda</b>	<b>2</b>		

Observações:

- A obrigatoriedade do uso de ao menos um dos canais - Primário ou Secundário - representaria uma limitação para um caso em que houvesse interesse político ou econômico maior por determinadas bandas dentro da faixa alocada para o serviço móvel celular. Uma

possibilidade de contornar esta situação seria a fabricação de unidades móveis capazes de realizar inicialização a partir de diversos canais, por exemplo os canais propostos neste capítulo, dando prioridade aos canais Primário e Secundário.

- Em uma tabela de alocação de canais bloco A sem canais CDMA superpostos, os grupos C1, E3, F3 e G3 têm 18 canais de voz. Os demais têm 19 canais de voz, como visto no Item 2.5.

Após a introdução do canal de rádio CDMA Primário (283), observando a banda de guarda, o número de canais de voz AMPS do grupo A1 é reduzido para 17 e o número de canais de voz AMPS do grupo C1 é reduzido para 15. Nos demais grupos, sobram 16 canais de voz AMPS. Por simplicidade, podem-se considerar em média 16 canais de voz por grupo.

Após a introdução do canal de rádio CDMA número 242, mantendo o canal 283 ativo e observando a banda de guarda, o número de canais de voz AMPS do grupo C1 é reduzido para 13, e o número de canais de voz AMPS dos grupos A1 e B1 é reduzido para 15. Nos demais grupos, sobram 14 canais de voz AMPS. A Tabela 4.6 lista o número médio de canais de voz AMPS remanescentes por grupo, após a introdução de cada canal de rádio CDMA no bloco A, respeitando a banda de guarda.

**Tabela 4.6** Número médio de canais de voz AMPS remanescentes em cada grupo, após a introdução de cada canal de rádio CDMA do bloco A, respeitando a banda de guarda.

<b>Bloco A</b>	
<b>Canais de rádio CDMA ativos</b>	<b>Número médio de canais de voz AMPS que sobram por grupo</b>
283	16
283, 242	14
283, 242, 201	12
283, 242, 201, 160	10
283, 242, 201, 160, 119	8
283, 242, 201, 160, 119, 78	6
283, 242, 201, 160, 119, 78, 37	4
283, 242, 201, 160, 119, 78, 37, 1019	2
283, 242, 201, 160, 119, 78, 37, 1019, 691	0

No bloco A, após a introdução de todos os 9 canais de rádio CDMA, não sobram canais AMPS, exceto os canais de controle.

- A Tabela 4.7 para o bloco B é análoga à Tabela 4.6:

**Tabela 4.7** Número médio de canais de voz AMPS remanescentes em cada grupo, após a introdução de cada canal de rádio CDMA do bloco B, respeitando a banda de guarda.

<b>Bloco B</b>	
<b>Canais de rádio CDMA ativos</b>	<b>Número médio de canais de voz AMPS que sobram por grupo</b>
384	16
384, 425	14
384, 425, 466	12
384, 425, 466, 507	10
384, 425, 466, 507, 548	8
384, 425, 466, 507, 548, 589	6
384, 425, 466, 507, 548, 589, 630	4
384, 425, 466, 507, 548, 589, 630, 777	2

No bloco B, após a introdução dos 8 canais de rádio CDMA, sobram os canais de controle e, em média, 2 canais de voz AMPS por grupo.

#### 4.4 ABORDAGEM DE K. I. KIM

Neste capítulo, será descrita a abordagem de KIM (1993) para:

- **Definição do fator de eficiência do reuso de frequências**
- **Determinação da potência de interferência de uma célula CDMA no sentido reverso**
- **Cálculo da potência de interferência no receptor de uma ERB CDMA, proveniente de estações móveis que estão em outras células**
- **Cálculo do fator de eficiência do reuso de frequências**
- **Cálculo da degradação da relação portadora/interferência no receptor de uma ERB AMPS omnidirecional a uma distância conhecida em relação a uma célula CDMA interferente**
- **Cálculo da degradação da relação portadora/interferência no receptor de uma ERB AMPS omnidirecional a uma distância conhecida em relação a um cluster de células CDMA interferentes**

Para tanto, são consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- a. As células seguem geometria hexagonal, estando as ERBs nos centros dos hexágonos.
- b. A DEP de um canal de rádio CDMA será considerada uniforme em toda a banda ocupada de 1,23 MHz.
- c. Expoente de perdas de propagação  $\gamma = 4$ .
- d. Seja  $r$  a distância de uma estação móvel até a ERB à qual está conectada. A potência do canal reverso é controlada de modo que o móvel transmita potência diretamente proporcional a  $r^\gamma = r^4$ . Serão **desconsideradas** as imperfeições do controle dinâmico de potência.

**e.** Os únicos tipos de interferência considerados serão as de canal comum (ou seja, interferência tipo cocanal e multiacesso). Não serão considerados outros tipos de interferência, como por exemplo do canal adjacente.

**f.** Não serão consideradas fontes de ruído.

**g.** Todas as células têm raio igual a  $R$  e são omnidirecionais. As células são representadas por hexágonos.

**h.** A área de um hexágono de apótema  $a$  é expressa por  $2\sqrt{3}a^2 \cong 3,46a^2$ . Entretanto, nesta abordagem, seu cálculo será simplificado para  $\pi a^2$ . Quanto a esta simplificação, observa-se que a relação entre o apótema e o raio de um hexágono é dada por (2.3.1):

$$\frac{a}{R} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cong 0,87 \quad (4.4.1)$$

O raio da circunferência cuja área é equivalente à área de um hexágono de apótema  $a$  é dado por  $R_{\#}$ :

$$\frac{R_{\#}}{a} = \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}} \cong 1,05 \quad (4.4.2)$$

**i.** A distribuição das estações móveis no sistema é uniforme. Havendo  $N$  estações móveis em cada célula, a densidade de estações móveis por unidade de área será denotada por  $\rho$ :

$$\rho \approx \frac{N}{\pi a^2} \quad (4.4.3)$$

**j.**  $N = 30$  em todas as células.

**k.** O fator de atividade vocal tem valor  $\alpha = 0,5$

Nas deduções a seguir, serão utilizados os conceitos de geometria hexagonal vistos no Item 2.3.

#### 4.4.1 Definição do fator de eficiência do reuso de frequências

Sejam:

$\left(\frac{C}{I}\right)_{Req}$  : relação  $C/I$  requerida (por exemplo, 18 dB).

$N_C$ : número máximo de canais em uma célula isolada, que atende o mesmo valor  $\left(\frac{C}{I}\right)_{Req}$ .

Neste caso, a célula isolada não está sujeita a interferências provenientes de outras células.

$N$ : número máximo de canais por célula que atende  $\left(\frac{C}{I}\right)_{Req}$  em um sistema com múltiplas células.

Na abordagem de KIM, o "fator de eficiência do reuso de frequências" de um sistema celular é definido como:

$$K^\# = \frac{N_C}{N} \quad (4.4.4)$$

Considerando as hipóteses apresentadas no início deste item, uma célula AMPS isolada poderia operar todos os canais disponíveis no sistema celular. Assim,  $N_C = 395$  (AMPS). Em um sistema com múltiplas células AMPS, utilizando padrão de reuso  $K$ , o número de canais alocados por célula é no máximo  $395 \div K$ . Portanto,  $K^\# = K$  em sistemas AMPS.

Numa célula CDMA isolada com  $N_C$  estações móveis, a ERB recebe em um canal de tráfego:

- O sinal desejado, proveniente de uma estação móvel,  $\alpha S_C$
- Sinais provenientes das demais estações móveis, cada um com potência  $\alpha S_C$ , totalizando  $(N_C - 1)\alpha S_C$ .

Portanto, o número máximo de canais de tráfego disponíveis  $N_C$  deve ser tal que:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{\text{Req}} = \frac{\alpha S_C}{(N_C - 1)\alpha S_C} = \frac{1}{N_C - 1} \quad (4.4.5)$$

Em um sistema com múltiplas células, uma ERB recebe interferências provenientes das estações móveis dentro da célula e dos móveis que estão em outras células. Portanto, o número máximo de canais de tráfego disponíveis  $N$  deve ser tal que

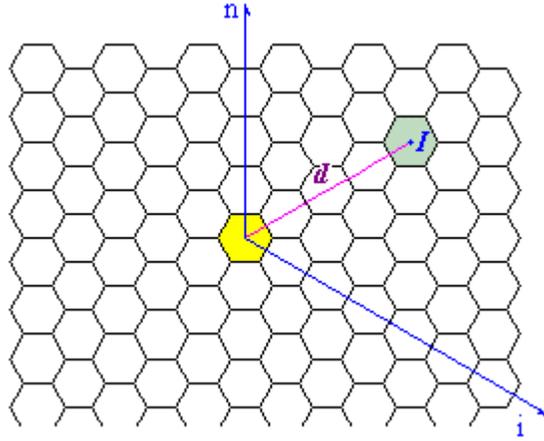
$$\left(\frac{C}{I}\right)_{\text{Req}} = \frac{\alpha S_C}{(N - 1)\alpha S_C + I_{OC}} = \frac{1}{(N - 1) + \frac{I_{OC}}{\alpha S_C}} \quad (4.4.6)$$

Onde  $I_{OC}$  é a potência de interferência proveniente de estações móveis que estão em outras células, que foi representada por  $I_{OCCDMA}$  no Item 3.3 e será calculada no Item 4.4.3. A partir de (4.4.4), (4.4.5) e (4.4.6), obtém-se:

$$K^\# = \frac{N_C}{N} = 1 + \frac{I_{OC}}{\alpha N S_C} \quad (4.4.7)$$

#### **4.4.2 Determinação da potência de interferência de uma célula CDMA no sentido reverso**

Referindo-se à Fig. 4.9, procura-se determinar a interferência gerada pelas estações móveis que estão na célula central, sobre a ERB que está no ponto  $I$ . Esta será denominada "ERB interferida".



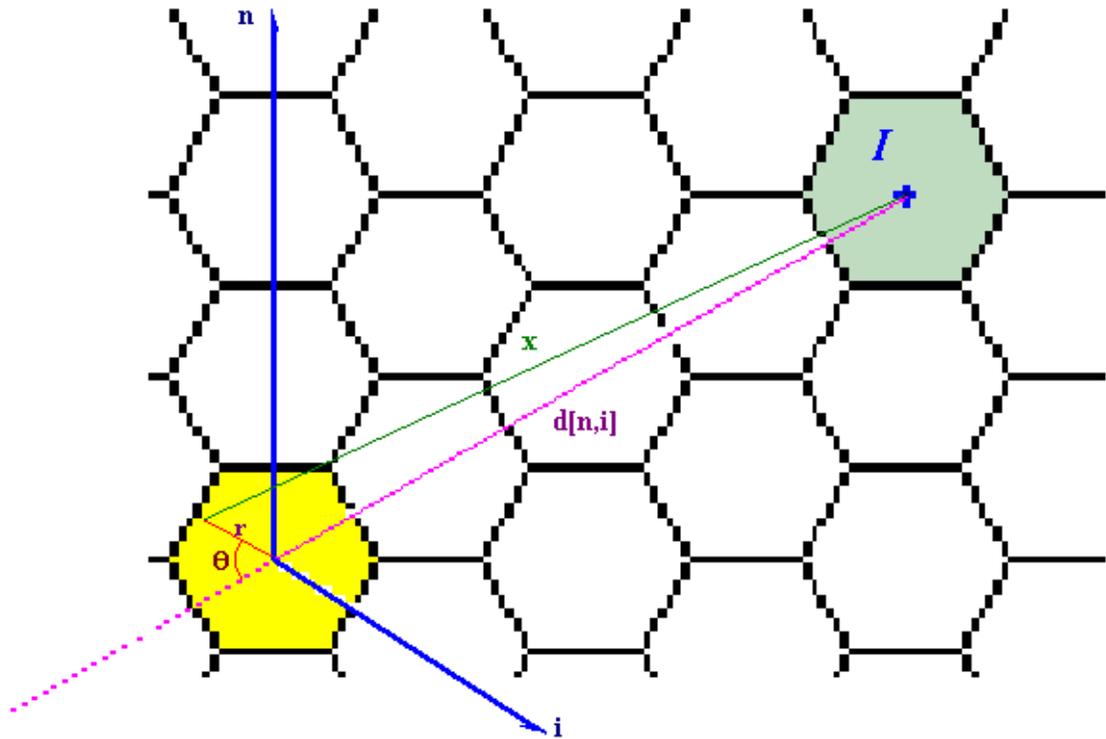
**Figura 4.9** Sistema celular em uma grade hexagonal. As ERBs estão nos centros dos hexágonos. Em destaque, ERB em um ponto genérico  $I$  que sofre interferência das estações móveis que estão na célula central.

Seja a distância da origem à ERB interferida  $d = d[n,i]$ , que pode ser determinada substituindo (4.4.1) em (2.3.2):

$$\frac{d[n,i]}{a} = 2\sqrt{n^2 + i^2 - ni} \quad (4.4.8)$$

Considere-se uma estação móvel dentro da célula central, cuja posição é definida por uma distância à origem  $r$  e pelo ângulo  $\theta$  ilustrado na Fig. 4.10. Sua distância à ERB que está na posição  $[n,i]$  é representada por  $x$ , que pode ser calculado pelo Teorema dos Cossenos:

$$x = \sqrt{d^2 + r^2 + 2dr \cos\theta} \quad (4.4.9)$$



**Figura 4.10** Estação móvel dentro da célula central. Sua posição é definida por uma distância à origem ( $r$ ) e pelo ângulo ( $\theta$ ) ilustrado. Sua distância à ERB que está na posição  $[n, i]$  é representada por  $x$ .

Lembrando a hipótese (d), seja  $r$  a distância de uma estação móvel até a ERB à qual está conectada. Então, o controle dinâmico de potência no canal reverso é tal que a potência transmitida pelo móvel é diretamente proporcional a  $r^\gamma$ , com  $\gamma = 4$ . Portanto, o nível de interferência provocada pela estação móvel no receptor da ERB interferida é diretamente proporcional a  $r^4$ .

Devido às perdas de propagação, o nível de interferência provocada pela estação móvel no receptor da ERB interferida é inversamente proporcional a  $x^4$ . Assim, a potência de interferência que a ERB interferida recebe da estação móvel é dada por  $p(x)$ :

$$p(x) = \alpha S_c \frac{r^4}{x^4} \quad (4.4.10)$$

Para simplificar os cálculos, será utilizada uma variável auxiliar  $L$ :

$$L = 4(n^2 + i^2 - ni) \quad (4.4.11)$$

Então, a expressão (4.4.8) pode ser simplificada para:

$$\frac{d[n,i]}{a} = \sqrt{L} \quad (4.4.12)$$

A potência de interferência que a ERB interferida recebe de todas as estações móveis que estão na célula central será representada por  $P[n,i]$  e é obtida por integração da expressão (4.4.10) sobre a área da célula central.

$$P[n,i] = \int_{A_c} \alpha S_c \frac{r^4}{x^4} \rho dA \quad (4.4.13)$$

Onde:

$A_c$  é a área que compõe a célula central.

$dA$  é um elemento diferencial de área na célula central. Em coordenadas polares,

$$dA = r dr d\theta \quad (4.4.14)$$

$\rho$  é a densidade de estações móveis por unidade de área (vide expressão 4.4.3).

Substituindo (4.4.9) e (4.4.14) em (4.4.13), vem:

$$P[n,i] = \alpha S_c \rho \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{r^4}{[d^2 + r^2 + 2rd \cos\theta]^2} r dr d\theta \quad (4.4.15)$$

A rigor, a integral da expressão (4.4.15) deveria ser feita sobre a área de um hexágono, que é  $3,46a^2$ . Entretanto, por simplicidade a integral será calculada sobre uma circunferência de área  $\pi a^2$  (Vide hipótese (h)).

Substituindo (4.4.12) e (4.4.3) em (4.4.15), vem:

$$P[n,i] = \alpha S_c \frac{N}{\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{r^4}{[a^2 L + r^2 + 2ra\sqrt{L} \cos\theta]^2} r dr d\theta \quad (4.4.16)$$

Desenvolvendo esta integral (KIM, 1993) obtém-se:

$$P[n,i] = 2\alpha NS_c \left[ 2L \ln\left(\frac{L}{L-1}\right) - \left(\frac{4L^2 - 6L + 1}{2(L-1)^2}\right) \right] \quad (4.4.17)$$

Para simplificar a expressão (4.4.17), será utilizada a função  $G[L]$ :

$$G[L] = 2L \ln\left(\frac{L}{L-1}\right) - \left(\frac{4L^2 - 6L + 1}{2(L-1)^2}\right) \quad (4.4.18)$$

Assim:

$$P[n,i] = 2\alpha NS_c G[L] \quad (4.4.19)$$

Reciprocamente, a interferência que a ERB central recebe das estações móveis da célula de coordenadas  $[n,i]$  também é dada por  $P[n,i]$  da expressão (4.4.19). Esta expressão não é função de  $a$ . Portanto, não há necessidade de corrigi-la com (4.4.1).

#### 4.4.3 Cálculo da potência de interferência no receptor de uma ERB CDMA, proveniente de estações móveis que estão em outras células

O valor de  $I_{OC}$  será calculado pela soma das interferências causadas pelas células do 1º anel, mais as células do 2º anel, mais o 3º, etc. Como foi explicado no Item 2.3, sobre geometria hexagonal, as distâncias da origem às células do anel de ordem  $n$  são dadas pela expressão (4.4.12), com  $i$  variando de 0 a  $(n - 1)$ . Estes resultados se repetem 6 vezes.

Assim, a interferência causada pelas células do anel  $n$  na célula central é dada por  $I[n]$ :

$$I[n] = 6 \times \sum_{i=0}^{n-1} P[n, i] \quad (4.4.20)$$

Substituindo (4.4.19) em (4.4.20) vem:

$$I[n] = 12\alpha NS_C \sum_{i=0}^{n-1} G[L] \quad (4.4.21)$$

$I_{OC}$  é obtida pela somatória de  $I[n]$  de todos os anéis

$$I_{OC} = 12\alpha NS_C \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{n-1} G[L] \quad (4.4.22)$$

#### 4.4.4 Cálculo do fator de eficiência do reuso de frequências

Obtém-se o fator de eficiência do reuso de frequências pela substituição de (4.4.22) em (4.4.7):

$$K^{\#} = \frac{N_C}{N} = 1 + \frac{I_{OC}}{\alpha NS_C} = 1 + 12 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{n-1} G[L] \quad (4.4.23)$$

A expressão (4.4.23) foi calculada para os primeiros 300 anéis, ou seja, com  $n$  variando de 1 até 300, utilizando a rotina para o software Matlab que se encontra no ANEXO C. O resultado obtido foi:

$$K^\# = 1,3265 \quad (4.4.24)$$

A definição para "fator de eficiência do reuso" encontrada nas referências RAPPAPORT, MILSTEIN (1992) e NEWSON, HEATH (1992), dada na expressão (3.3.6), é diferente de  $K^\#$ :

$$F = \frac{I_{IC}}{I_{IC} + I_{OC}} \quad (4.4.25)$$

Onde  $I_{IC}$  é a interferência proveniente das estações móveis que estão na mesma célula da ERB interferida. desenvolvendo (4.4.25) vem:

$$F = \frac{\alpha S_c (N - 1)}{\alpha S_c (N - 1) + 12\alpha N S_c \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{n-1} G[L]}$$

Aproximando-se  $(N - 1)$  por  $N$ , esta expressão pode ser simplificada para:

$$F \approx \frac{1}{1 + 12 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{n-1} G[L]} \quad (4.4.26)$$

que é o inverso de  $K^\#$  encontrado na expressão (4.4.23). Portanto:

$$F \approx \frac{1}{K^\#} = \frac{N}{N_c} = \frac{1}{1,3265} \cong 0,75 \quad (4.4.27)$$

Quanto maior for  $F$ , maior será  $N$ , o número máximo de canais de tráfego por célula CDMA em um sistema com múltiplas células.

Segundo RAPPAPORT e MILSTEIN (1992), a contribuição da interferência tipo multiacesso de estações móveis em outras células diminui em relação à contribuição das estações móveis na célula central quanto maior for o coeficiente de perdas de propagação ( $\gamma$ ). Portanto, quanto maiores forem as perdas de propagação, maior será o fator de eficiência do reuso  $F$ .

#### 4.4.5 Cálculo da degradação da relação portadora/interferência no receptor de uma ERB AMPS omnidirecional a uma distância conhecida em relação a uma célula CDMA interferente

Considere-se o caso em que a célula central opera um canal de rádio CDMA. Procura-se calcular a potência de interferência recebida por uma célula AMPS de posição conhecida  $[n,i]$ .

Sejam então:

$W_A$ : banda ocupada por um canal do sistema celular AMPS, igual a 30 kHz

$W_{SS}$ : banda ocupada por um canal do sistema celular CDMA, igual a 1,23 MHz

$P_A$ : potência transmitida por uma estação móvel do sistema celular AMPS

$I_{CDMA}[n,i]$ : potência de interferência que uma ERB AMPS na posição  $[n,i]$  recebe da célula central que opera um canal de rádio CDMA.

$\left(\frac{C}{I}\right)_A$ : relação portadora/interferência no receptor de uma ERB do sistema AMPS, no caso em que o sinal desejado provém de uma estação móvel na extremidade da sua célula, na ausência de células CDMA. A estação móvel que está na extremidade da célula encontra-se à distância  $R$  em relação à ERB, e não  $a$ .

$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i]$ : relação portadora/interferência no receptor de uma ERB AMPS que está na posição  $[n,i]$ , no caso em que o sinal desejado provém de uma estação móvel na extremidade da célula e a ERB recebe interferência proveniente do canal de rádio CDMA transmitido pelas estações móveis que estão na célula central.

Considerando que o sistema celular AMPS inicial utiliza padrão de reuso  $K = 7$ , e aproveitando o resultado do cálculo de  $C/I$  apresentado na Tabela 2.4:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A = 10 \log \left[ \frac{P_A/R^4}{6(P_A/D^4)} \right] = 10 \log \left[ \frac{(D/R)^4}{6} \right] = 10 \log[73,5] \cong 18,7 \text{ dB}$$

$$I_{CDMA}[n,i] = P[n,i] \frac{W_A}{W_{SS}} = 2\alpha N S_C G[L] \frac{W_A}{W_{SS}} \quad (4.4.28)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i] &= 10 \log \left[ \frac{P_A/R^4}{6(P_A/D^4) + I_{CDMA}[n,i]} \right] = 10 \log \left\{ \frac{\left(\frac{P_A}{R^4}\right) \div \left(\frac{6P_A}{D^4}\right)}{1 + I_{CDMA}[n,i] \div \left[\frac{6P_A}{D^4}\right]} \right\} = \\ &= 10 \log \left[ \frac{\left(\frac{C}{I}\right)_A}{1 + 2\alpha N S_C G[L] \frac{W_A}{W_{SS}} \frac{R^4}{P_A} \left(\frac{C}{I}\right)_A} \right] \end{aligned}$$

Seja  $S_A$  a potência do sinal desejado que uma ERB AMPS recebe de uma estação móvel que está na extremidade de uma célula. Analogamente a  $S_C$ ,

$$S_A = \frac{P_A}{R^4}$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i] = 10 \log \left[ \frac{\left(\frac{C}{I}\right)_A}{1 + \left(\frac{C}{I}\right)_A \times \frac{S_C}{S_A} \times \frac{W_A}{W_{SS}} \times 2\alpha N G[L]} \right] \quad (4.4.29)$$

$$\frac{W_A}{W_{SS}} = \frac{30 \times 10^3}{1,23 \times 10^6} = \frac{1}{41}$$

Substituindo  $\alpha = 0,5$  e  $N = 30$ :

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i] = 10 \log \left[ \frac{\left(\frac{C}{I}\right)_A}{1 + \left(\frac{C}{I}\right)_A \times \frac{S_C}{S_A} \times \frac{1}{41} \times 2 \times 0,5 \times 30G[L]} \right]$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i] = 10 \log \left[ \frac{\left(\frac{C}{I}\right)_A}{1 + 0,73 \left(\frac{C}{I}\right)_A \frac{S_C}{S_A} G[L]} \right]$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i] = 10 \log \left[ \frac{73,5}{1 + 53,78 \frac{S_C}{S_A} G[L]} \right]$$

Naturalmente, espera-se obter para  $\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i]$  um valor inferior a  $\left(\frac{C}{I}\right)_A$ . Admitindo que se possa considerar  $S_C = S_A$ , obtém-se:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i] = 10 \log \left[ \frac{73,5}{1 + 53,78G[L]} \right] \quad (4.4.30)$$

A relação  $\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i]$  foi calculada pela expressão (4.4.30) para  $n$  variando de 1 a 4 (ou seja, nos anéis 1 a 4). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8** Matriz dos valores calculados de  $\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [n,i]$ , em dB.

	$i = 0$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$n = 1$	15,1	-	-	-
$n = 2$	18,5	18,3	-	-
$n = 3$	18,6	18,6	18,6	
$n = 4$	18,7	18,6	18,6	18,6

Para cada valor de  $n$ , os valores de  $i$  foram calculados de 0 a  $(n - 1)$ , havendo portanto valores repetidos, como visto no Item 2.3, sobre geometria hexagonal. Estes valores se repetem 6 vezes nas células do anel  $n$ . Como esperado, todos os valores são inferiores<sup>13</sup> a 18,7 dB.

No mesmo Item 2.3, foi visto também que a célula [3,1] **ou** a célula [3,2] pode ser cocanal da célula central. Assumindo que a célula [3,1] seja cocanal da célula central, o valor de  $\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [3,1]$  apresentado na Tabela 4.8 precisa ser corrigido. Após a introdução de um canal de rádio CDMA, a célula [3,1] recebe interferência cocanal de 5 células AMPS, e não 6. Portanto:

$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [3,1]$  tem valor maior que o valor 18,6 dB apresentado na Tabela 4.8.

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [3,1] = 10 \log \left[ \frac{\frac{6}{5} \times 73,5}{1 + \frac{6}{5} \times 53,78G[3,1]} \right]$$

$$G[3,1] = 2,3691 \times 10^{-4} \quad \text{logo,}$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [3,1] = 19,4 \text{ dB}$$

Portanto, a relação  $\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [3,1]$  após a introdução de um canal de rádio CDMA na célula central aumenta em relação ao valor inicial  $\left(\frac{C}{I}\right)_A [3,1]$ . O motivo é que a interferência cocanal proveniente de outra célula AMPS é maior que a interferência proveniente de uma célula CDMA, cujo sinal é espalhado.

Para um sistema celular AMPS, pode-se estabelecer um limite da degradação da qualidade de sinal na convivência com células CDMA de, por exemplo, 1 dB (KIM, 1993). Nesse caso, as células cuja relação portadora/interferência esteja abaixo de 17,7 dB deverão ser utilizadas

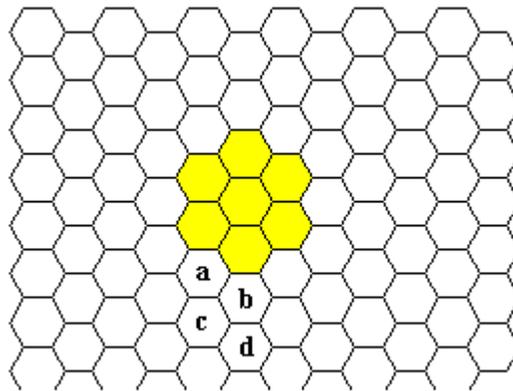
---

<sup>13</sup> O valor de  $\left(\frac{C}{I}\right)_A^\# [4,0]$  é inferior a 18,7, mas consta como igual a 18,7 devido ao arredondamento.

como região de guarda entre células AMPS e CDMA. Com o limite de 1 dB estabelecido, e os resultados da Tabela 4.8, as células do primeiro anel não podem operar na faixa utilizada pelo canal de rádio CDMA da célula central, e devem ser utilizadas como região de guarda entre a célula central e as células do 2º anel.

#### **4.4.6 Cálculo da degradação da relação portadora/interferência no receptor de uma ERB AMPS omnidirecional a uma distância conhecida em relação a um cluster de células CDMA interferentes**

Considere-se a Fig. 4.11 a seguir, onde um canal de rádio CDMA foi ativado em 7 células que formam um cluster. Procura-se determinar quais células deverão compor a região de guarda em que a degradação da relação portadora/interferência do sinal recebido por uma ERB AMPS seria de 1 dB ou mais. Para tanto, será calculada a relação portadora/interferência nas ERBs marcadas com (a), (b), (c) e (d).

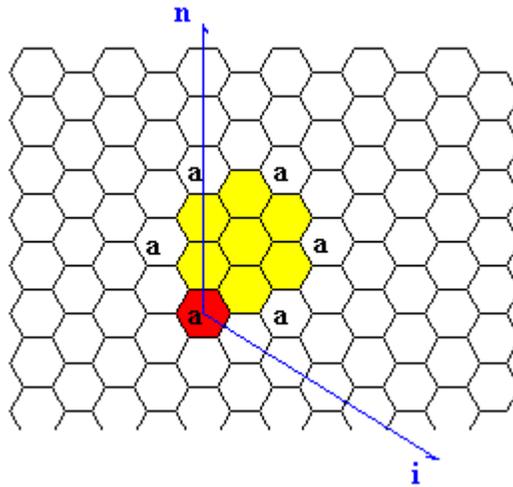


**Figura 4.11 Sistema celular em que as 7 células destacadas em amarelo operam o mesmo canal de rádio CDMA. As demais células do sistema são analógicas. Procura-se calcular a relação portadora/interferência no canal reverso, nas células (a), (b), (c) e (d).**

Na Fig. 4.12, o sistema de coordenadas está centralizado na célula destacada em vermelho. As posições  $[n,i]$  das células CDMA interferentes são:

$n$	$i$
1	0
	1
2	0
	1
	2
3	1
	2

Na mesma Fig. 4.12, o valor da relação portadora/interferência encontrado para a ERB da célula marcada com vermelho será válido para todas as ERBs marcadas com (a).



**Figura 4.12** Sistema celular em que as 7 células destacadas em amarelo operam o mesmo canal de rádio CDMA. As demais células do sistema são analógicas. O valor da relação portadora/interferência será calculado para o sinal recebido pela ERB da célula destacada em vermelho. O resultado obtido será válido para as ERBs de todas as células marcadas com (a).

Portanto, a relação portadora/interferência no receptor da ERB da célula em vermelho pode ser calculada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(a)} = \frac{\left(\frac{P_A}{R^4}\right)}{5\left(\frac{P_A}{D^4}\right) + I_{CDMA}[1,0] + I_{CDMA}[1,1] + I_{CDMA}[2,0] + I_{CDMA}[2,1] + I_{CDMA}[2,2] + \dots}$$

$$\dots \overline{\dots + I_{CDMA}[3,1] + I_{CDMA}[3,2]}$$

Lembrando que  $I_{CDMA}[n,i]$  é expressa em (4.4.28) e substituindo  $S_A = \frac{P_A}{R^4}$ , vem:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(a)} = \frac{S_A}{5S_A\left(\frac{R}{D}\right)^4 + 2\alpha NS_C \frac{W_A}{W_{SS}} (G[1,0] + G[1,1] + G[2,0] + G[2,1] + G[2,2] + \dots}$$

$$\dots \overline{\dots + G[3,1] + G[3,2]})$$

Onde  $G[n,i]$  é obtida através da expressão (4.4.18). Para  $K = 7$ , vale a relação  $\frac{R}{D} = \frac{1}{\sqrt{21}}$

Considerando novamente  $S_A = S_C$ , obtém-se:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(a)} = \frac{1}{\frac{5}{21^2} + 2\alpha N \frac{W_A}{W_{SS}} (G[1,0] + G[1,1] + G[2,0] + G[2,1] + G[2,2] + G[3,1] + G[3,2])}$$

Substituindo os valores considerados  $\alpha = 0,5$  e  $N = 30$ , vem:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(a)} = \frac{1}{\frac{5}{21^2} + \frac{30}{41}(G[1,0] + G[1,1] + G[2,0] + G[2,1] + G[2,2] + G[3,1] + G[3,2])}$$

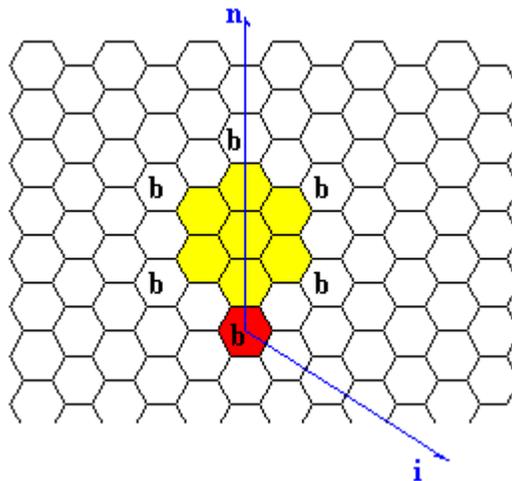
Portanto:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(a)} = 20,58 \text{ ou } 13,1 \text{ dB que é inferior ao limite mínimo estabelecido de } 17,7 \text{ dB.}$$

Na Fig. 4.13, o sistema de coordenadas está centralizado na célula destacada em vermelho. As posições  $[n,i]$  das células CDMA interferentes são:

$n$	$i$
1	-1 0
2	-1 0 1
3	0 1

Na mesma Fig. 4.13, o valor da relação portadora/interferência encontrado para a ERB da célula marcada com vermelho será válido para todas as ERBs marcadas com (b).



**Figura 4.13** Sistema celular em que as 7 células destacadas em amarelo operam o mesmo canal de rádio CDMA. As demais células do sistema são analógicas. O valor da relação portadora/interferência será calculado para o sinal recebido pela ERB da célula destacada em vermelho. O resultado obtido será válido para as ERBs de todas as células marcadas com (b).

Portanto, a relação portadora/interferência no receptor da ERB da célula em vermelho pode ser calculada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(b)} = \frac{\left(\frac{P_A}{R^4}\right)}{5\left(\frac{P_A}{D^4}\right) + I_{CDMA}[1,-1] + I_{CDMA}[1,0] + I_{CDMA}[2,-1] + I_{CDMA}[2,0] + I_{CDMA}[2,1] + \dots}$$

$$\dots \frac{\dots}{\dots + I_{CDMA}[3,0] + I_{CDMA}[3,1]}$$

Analogamente às células marcadas com (a), considerando novamente  $S_A = S_C$  e os mesmos valores de  $\alpha$  e  $N$ , obtém-se:

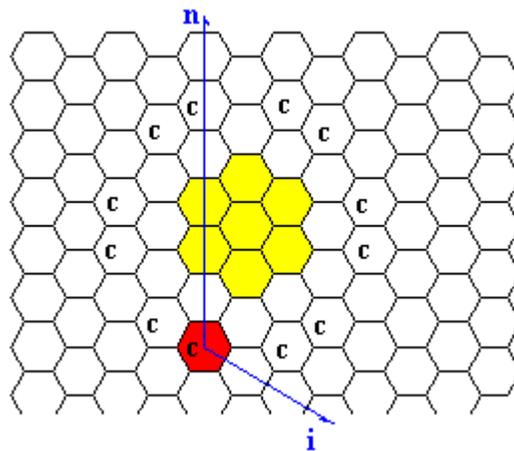
$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(b)} = 31,37 \text{ ou } 15,0 \text{ dB que é inferior ao limite mínimo de } 17,7 \text{ dB.}$$

Até aqui, concluiu-se que a degradação da relação portadora/interferência no canal reverso em todas as ERBs do primeiro anel no entorno do "cluster CDMA" é maior que 1 dB. Portanto, pelo menos as células deste mesmo anel devem fazer parte da região de guarda. Verifica-se a seguir o canal reverso das ERBs do segundo anel no entorno do mesmo cluster CDMA, que correspondem às células marcadas com (c) e (d) na Fig. 4.11.

Na Fig. 4.14, o sistema de coordenadas está centralizado na célula destacada em vermelho. As posições  $[n,i]$  das células CDMA interferentes são:

$n$	$i$
2	0
	1
3	0
	1
	2
4	1
	2

Na mesma Fig. 4.14, o valor da relação portadora/interferência encontrado para a ERB da célula marcada com vermelho será válido para todas as ERBs marcadas com (c).



**Figura 4.14** Sistema celular em que as 7 células destacadas em amarelo operam o mesmo canal de rádio CDMA. As demais células do sistema são analógicas. O valor da relação portadora/interferência será calculado para o sinal recebido pela ERB da célula destacada em vermelho. O resultado obtido será válido para as ERBs de todas as células marcadas com (c).

Portanto, a relação portadora/interferência na ERB da célula em vermelho pode ser calculada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(c)} = \frac{\left(\frac{P_A}{R^4}\right)}{5\left(\frac{P_A}{D^4}\right) + I_{CDMA}[2,0] + I_{CDMA}[2,1] + I_{CDMA}[3,0] + I_{CDMA}[3,1] + I_{CDMA}[3,2] + \dots}$$

$$\dots + I_{CDMA}[4,1] + I_{CDMA}[4,2]$$

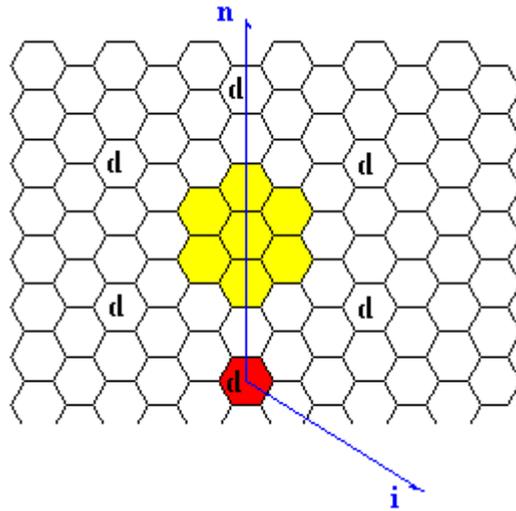
Analogamente aos resultados anteriores, vem:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(c)} = 73,73 \text{ ou } 18,7 \text{ dB, que é superior ao limite mínimo de } 17,7 \text{ dB.}$$

Na Fig. 4.15, o sistema de coordenadas está centralizado na célula destacada em vermelho. As posições  $[n,i]$  das células CDMA interferentes são:

$n$	$i$
2	-1 0
3	-1 0 1
4	0 1

Na mesma Fig. 4.15, o valor da relação portadora/interferência encontrado para a ERB da célula marcada com vermelho será válido para todas as ERBs marcadas com (d).



**Figura 4.15** Sistema celular em que as 7 células destacadas em amarelo operam o mesmo canal de rádio CDMA. As demais células do sistema são analógicas. O valor da relação portadora/interferência será calculado para o sinal recebido pela ERB da célula destacada em vermelho. O resultado obtido será válido para as ERBs de todas as células marcadas com (d).

Analogamente aos resultados anteriores:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{(d)} = 80,06 \text{ ou } 19,0 \text{ dB, que também é superior ao limite mínimo de } 17,7 \text{ dB.}$$

Portanto, as células do segundo anel no entorno do cluster CDMA podem operar na mesma faixa ocupada pelo canal de rádio CDMA ativo.

Em função dos resultados obtidos, concluiu-se que:

- O primeiro anel em torno de uma célula ou um cluster CDMA deverá ser utilizado como região de guarda.
- O segundo anel em torno de uma célula ou um cluster CDMA não precisa ser utilizado como região de guarda.

Os conceitos apresentados na Abordagem de Kim podem ser utilizados para calcular a degradação da relação portadora/interferência no receptor de ERBs AMPS em um cenário com células setorizadas, utilizando os valores  $\alpha = 3/8$  e  $N = 19$  chamadas simultâneas por setor, apresentados no Cap. 3. Conforme visto na expressão (2.4.3), em um sistema com células de 3 setores, a relação portadora/interferência em cada setor é expressa por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A = 10\log\left[\frac{1}{2}\left(\frac{D}{R}\right)^\gamma\right] \quad (4.4.31)$$

Substituindo  $\gamma = 4$  e  $D/R = 4,58$  (sistema com padrão de reuso 7), vem:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A = 10\log\left[\frac{1}{2}(4,58)^4\right] = 23,4\text{dB}$$

Estabelecendo-se o mesmo limite de 1 dB de degradação da qualidade do sinal, as células AMPS cuja relação portadora/interferência no canal reverso esteja abaixo de 22,4 dB deverão ser reservadas como região de guarda. Admitindo-se novamente  $S_C = S_A$ , conclui-se que:

- A relação portadora/interferência nas células do primeiro anel no entorno de uma célula CDMA depende de sua posição no primeiro anel. No pior caso,  $C/(I + N_t + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA}) = 18,9$  dB. Nas células do segundo anel, a relação portadora/interferência (também depende de sua posição) é igual a 23,0 dB no pior caso. Portanto, somente o primeiro anel precisa ser reservado como região de guarda.
- A relação portadora/interferência nas células do primeiro anel no entorno de um cluster CDMA é 17,8 dB no pior caso. Nas células do segundo anel, a relação portadora/interferência é igual a 24,7 dB no pior caso. Portanto, somente o primeiro anel precisa ser reservado como região de guarda.

#### 4.5 ANÁLISE DE INTERFERÊNCIAS DE ERBs CDMA EM ESTAÇÕES MÓVEIS AMPS

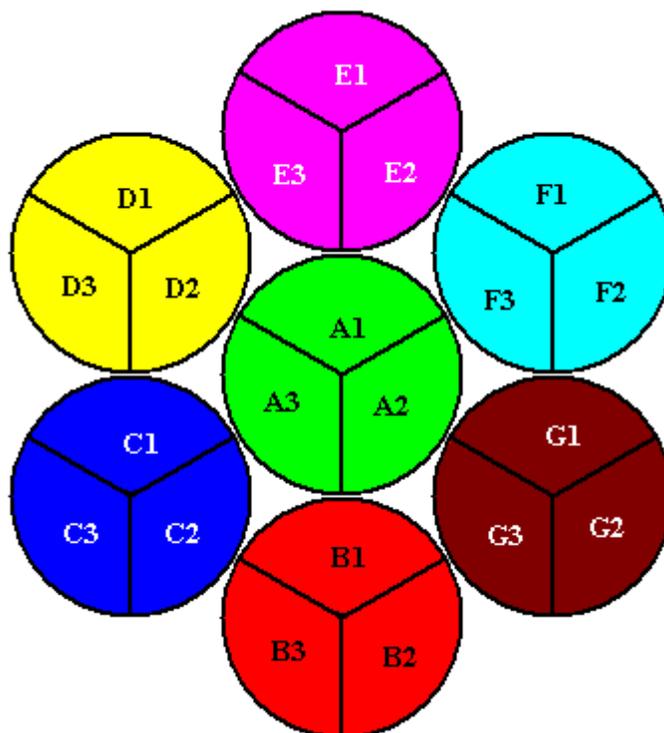
Considere-se inicialmente a Fig. 4.16, que representa um cluster formado por 7 células AMPS, igual ao apresentado na Fig. 2.41. Cada célula tem 3 grupos de canais de mesma letra, ou seja: (A1, A2, A3), (B1, B2, B3), etc. Cada setor utiliza todos os canais do seu grupo.

Procura-se calcular a degradação da relação portadora/(interferência mais ruído) no receptor de uma estação móvel AMPS após a ativação de um canal de rádio CDMA. Por exemplo, o canal 283.

Todos os setores do cluster da Fig. 4.16 terão ao menos um canal AMPS dentro da faixa ocupada pelo canal de rádio CDMA número 283, pois cada setor utiliza todos os canais de um grupo (vide a Tabela 4.1). Portanto, a expressão (4.2.1) (para  $I_{MovAMPS \leftarrow ERCDMA}$ ) aplica-se a pelo menos um canal em cada setor do cluster em questão.

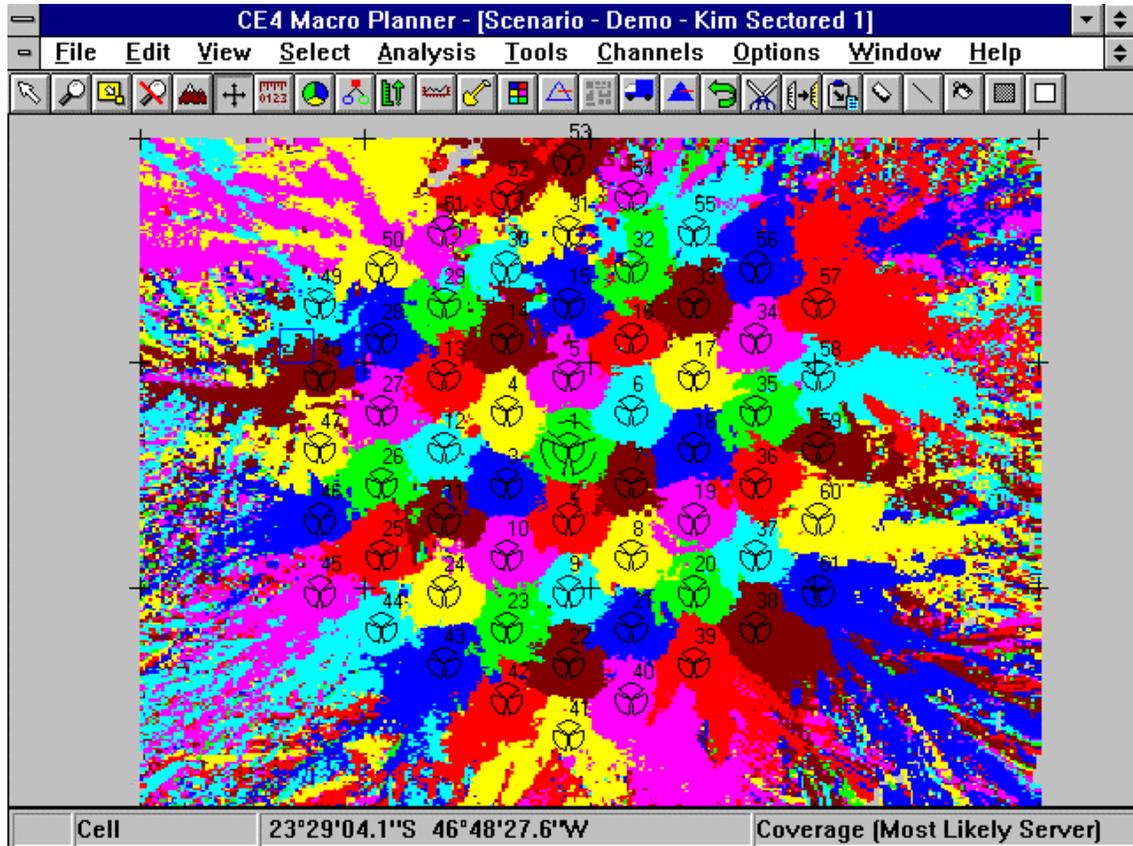
Nesta análise de interferências, será necessário adotar um limite da degradação da relação portadora/(interferência mais ruído). Seja este limite 1 dB (o mesmo adotado na abordagem de KIM, 1993). Caso a interferência  $I_{MovAMPS \leftarrow ERCDMA}$  provoque degradação da relação portadora/(interferência mais ruído) maior que 1 dB em um ou dois canais de um setor, devem ser desativados estes canais mais os canais da banda de guarda.

A configuração de grupos de canais em cada setor do cluster representado na Fig. 4.16 será repetida em todos os clusters do cenário utilizado para gerar as análises apresentadas nas Figs. 4.17 a 4.24.



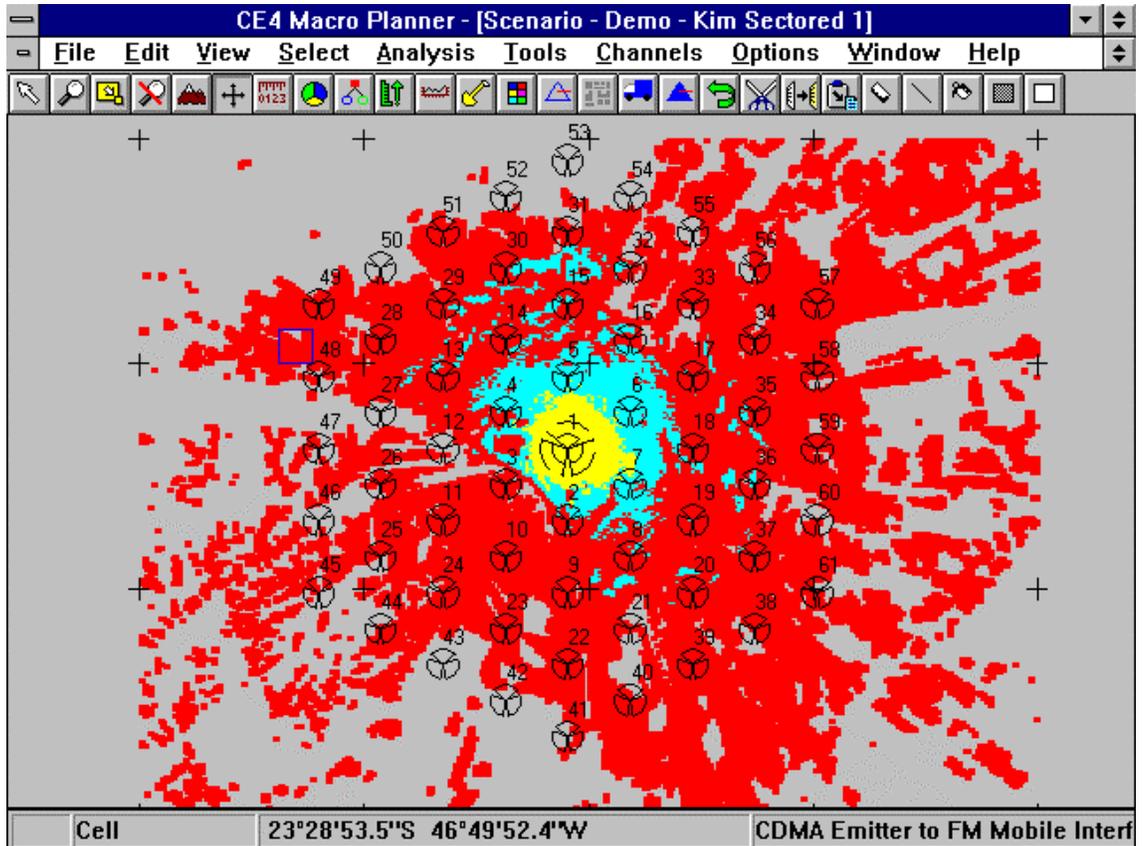
**Figura 4.16** Cluster cuja configuração de grupos de canais por setor será utilizada em todos os setores no cenário utilizado para gerar as análises das Figs. 4.17 a 4.24. A Fig. 4.16 é idêntica à Fig. 2.41.

Considere-se então o cenário da Fig. 4.17 com ERBs organizadas em 1º, 2º, 3º e 4º anéis em torno da célula central, numeradas de 1 a 61. O número que corresponde a cada célula apresenta-se logo acima desta. O significado das linhas pontilhadas em torno da ERB central é que ela está equipada para operar com tecnologia CDMA nos 3 setores. Na análise da Fig. 4.17, os pontos com nível de sinal abaixo de -115 dBm estão em cinza. As cores utilizadas têm a mesma representatividade das cores utilizadas na Fig. 4.16. Neste cenário, cada célula tem 3 grupos de canais separados de  $7 \times 30$  kHz na mesma ordem apresentada na Fig. 4.16, ou seja, com a mesma configuração de grupos em cada cluster.



**Figura 4.17** Cenário com células organizadas em 1°, 2°, 3° e 4° anéis em torno da célula central. As células são numeradas de 1 a 61. O número que corresponde a cada célula encontra-se logo acima desta. Cada célula tem 3 grupos de canais separados de 7×30 kHz, com cores na mesma ordem da Fig. 4.16. As linhas pontilhadas em torno da ERB central significam que ela está equipada para operar com tecnologia CDMA nos 3 setores. O quadrado em azul entre as células 48 e 49 representa uma CCC, que não tem efeito para este estudo.

Na Fig. 4.18, o canal de rádio CDMA n° 283 é ativado na célula central. As cores representam faixas de níveis de interferência em estações móveis AMPS ( $I_{MovAMPS \leftarrow ERCDMA}$ ).



**Figura 4.18** Mesmo cenário da Fig. 4.17. Nesta análise, as cores representam faixas de níveis de interferência em estações móveis AMPS ( $I_{MovAMPS \leftarrow ERCDMA}$ ) conforme legendas a seguir:

**CDMA Emitter to FM Mobile Interference**

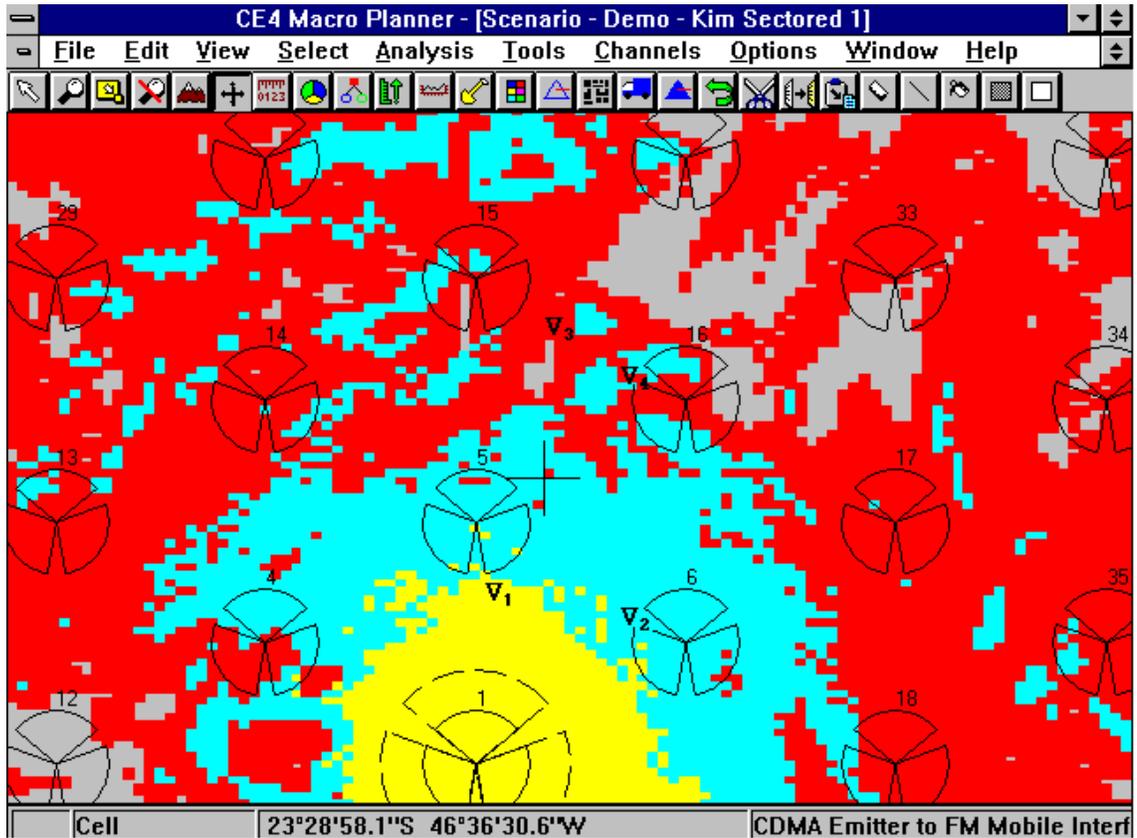
Plot Bands (Units are dBm)

	From	To	Color	Symbol
1	0	-83	Yellow	A
2	-83	-92	Cyan	A
3	-92	-121	Red	A
4	-121			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Use of Colors/Symbols

- ◆ Color shows level and Symbol shows id
- ◇ Color shows id and Symbol shows level

A Fig. 4.19 ilustra a mesma análise encontrada na Fig. 4.18 anterior, destacando os pontos marcados com os símbolos  $\nabla_1$ ,  $\nabla_2$ ,  $\nabla_3$  e  $\nabla_4$ . Os pontos  $\nabla_1$  e  $\nabla_2$  estão dentro de células do primeiro anel em torno da célula central. Os pontos  $\nabla_3$  e  $\nabla_4$  estão dentro de células do segundo anel.



**Figura 4.19** Mesma análise da Fig. 4.18, destacando os pontos marcados com os símbolos  $\nabla_1$ ,  $\nabla_2$ ,  $\nabla_3$  e  $\nabla_4$ . As legendas são as mesmas da Fig. 4.18.

A relação portadora/(interferência mais ruído) será calculada antes e depois da ativação do canal de rádio CDMA nos pontos destacados com  $\nabla_1$ ,  $\nabla_2$ ,  $\nabla_3$  e  $\nabla_4$ , iniciando pelo ponto  $\nabla_1$ , que está dentro da célula n° 5. Suas coordenadas geográficas são:

23° 31' 7,7" Sul

46° 38' 0,0" Oeste

No ponto  $\nabla_1$ , a relação  $C/(I + N_t)$  está entre 18 e 19 dB antes da ativação do canal de rádio CDMA (calculado pelo software de predição). Para os próximos cálculos, assume-se para a relação  $C/(I + N_t)$  o valor médio entre 18 e 19 dB, ou seja:  $C/(I + N_t) = 18,5$  dB. Procura-se calcular a relação  $C/(I + N_t + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA})$  no ponto  $\nabla_1$  após a ativação do canal de rádio CDMA.

No ponto  $\nabla_1$ , a interferência cocanal AMPS ( $I$ ) está na faixa entre -78 e -77 dBm (calculado pelo software de predição). Assume-se o valor médio  $I = -77,5$  dBm.

Conforme visto na Notação, a potência de ruído térmico no receptor de uma estação móvel de figura de ruído 8 dB em uma banda de 30 kHz é -121,2 dB. Este valor pode ser desprezado em relação a  $I = -77,5$  dBm.

O nível de potência da portadora em dBm pode ser calculado por:

$$C(\text{dBm}) = (N_t + I)(\text{dBm}) + \frac{C}{(N_t + I)}(\text{dB}) \approx I(\text{dBm}) + \frac{C}{I}(\text{dB}) = -77,5 + 18,5 = -59 \text{ dBm}$$

A interferência que um móvel no ponto  $\nabla_1$  recebe de uma ERB CDMA está na faixa de -83 a -82 dBm (calculado pelo software de predição). Assumindo-se o valor médio:

$$I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA} = -82,5 \text{ dBm}$$

Obtém-se:

$$I + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA} = -76,3 \text{ dBm}$$

Portanto:

$$\frac{C}{I + N_t + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA}}(\text{dB}) = -59 - (-76,3) = 17,3 \text{ dB}$$

Neste ponto, a degradação da qualidade do sinal devida à interferência proveniente do canal de rádio CDMA foi de  $18,5 - 17,3 = 1,2$  dB.

Calcula-se da mesma forma, na Tabela 4.9,  $C/(I + N_f + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA})$  nos pontos marcados com  $\nabla_2$ ,  $\nabla_3$  e  $\nabla_4$ .

**Tabela 4.9** Cálculo de  $C/(I + N_t + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA})$  nos pontos indicados na Fig. 4.19.

Identific. do ponto	Célula a que pertence	Coordenadas geográficas
V1	n° 5	23° 31' 07,7" S; 46° 38' 00,0" O
V2	n° 6	23° 31' 17,4" S; 46° 36' 38,8" O
V3	n° 15	23° 28' 29,5" S; 46° 37' 22,0" O
V4	n° 16	23° 28' 57,0" S; 46° 36' 39,0" O

Identific. do ponto	$C/(I + N_t)$	$I + N_t$	$C$	$I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA}$	$C/(I + N_t + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA})$	Varição da qualidade
V1	18,5 dB	-77,5 dBm	-59 dBm	-82,5 dBm	17,3 dB	-1,2 dB
V2	20,5 dB	-78,5 dBm	-58 dBm	-86,5 dBm	19,9 dB	-0,6 dB
V3	19,5 dB	-78,5 dBm	-59 dBm	-116,5 dBm	~ 19,5 dB	~ 0 dB
V4	18,5 dB	-76,5 dBm	-58 dBm	-98,5 dBm	~ 18,5 dB	~ 0 dB

Para gerar a Tabela 4.9, foram utilizados dados obtidos através das análises das Figs. 4.20 a 4.22.

Na Fig. 4.20, as cores representam faixas de valores da relação  $C/(I + N_t)$  do sinal recebido por uma estação móvel em um canal AMPS da ERB melhor servidora. Nota-se que na maior parte da área de serviço,  $C/(I + N_t) \geq 18$  dB. Nos pontos  $\nabla_1$ ,  $\nabla_2$ ,  $\nabla_3$  e  $\nabla_4$  escolhidos,  $C/(I + N_t) \geq 18$  dB.

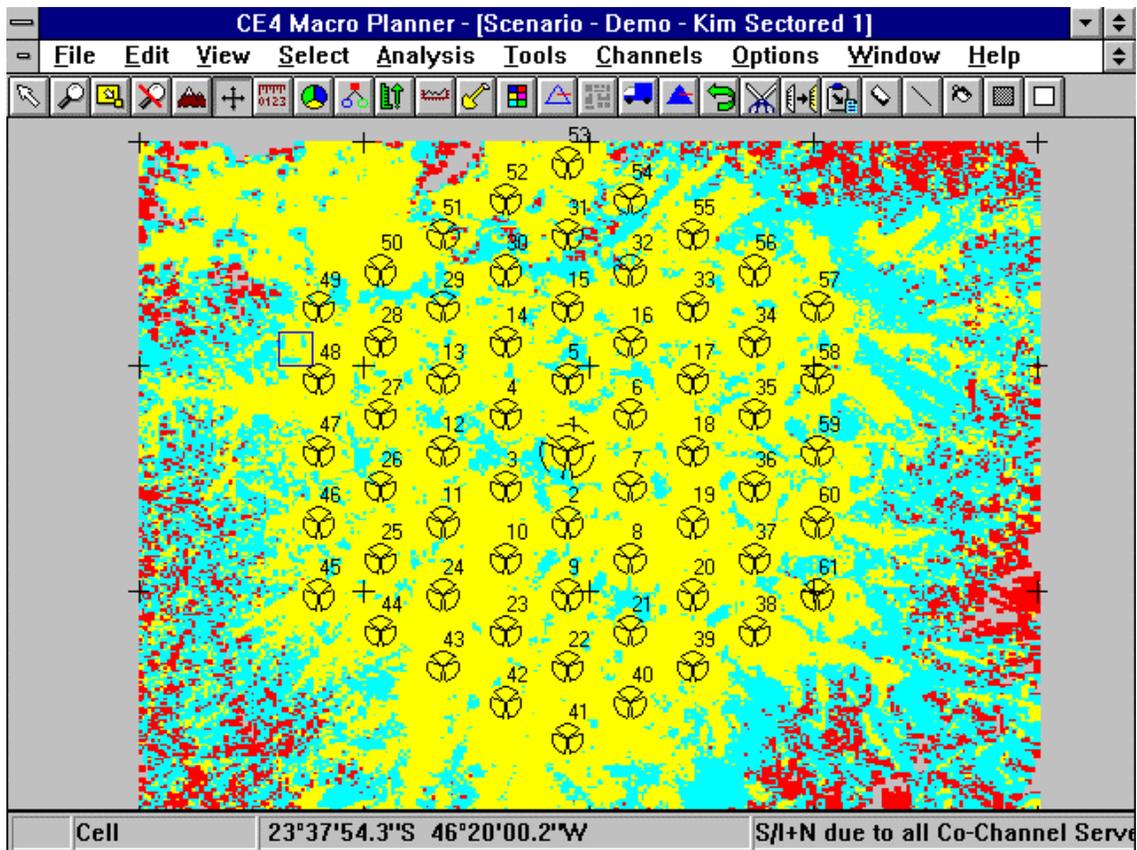


Figura 4.20 Mesmo cenário da Fig. 4.17. As cores representam faixas de valores da relação  $C/(I + N_t)$  do sinal recebido por uma estação móvel em um canal AMPS, conforme legendas a seguir:

**S/I+N due to all Co-Channel Servers**

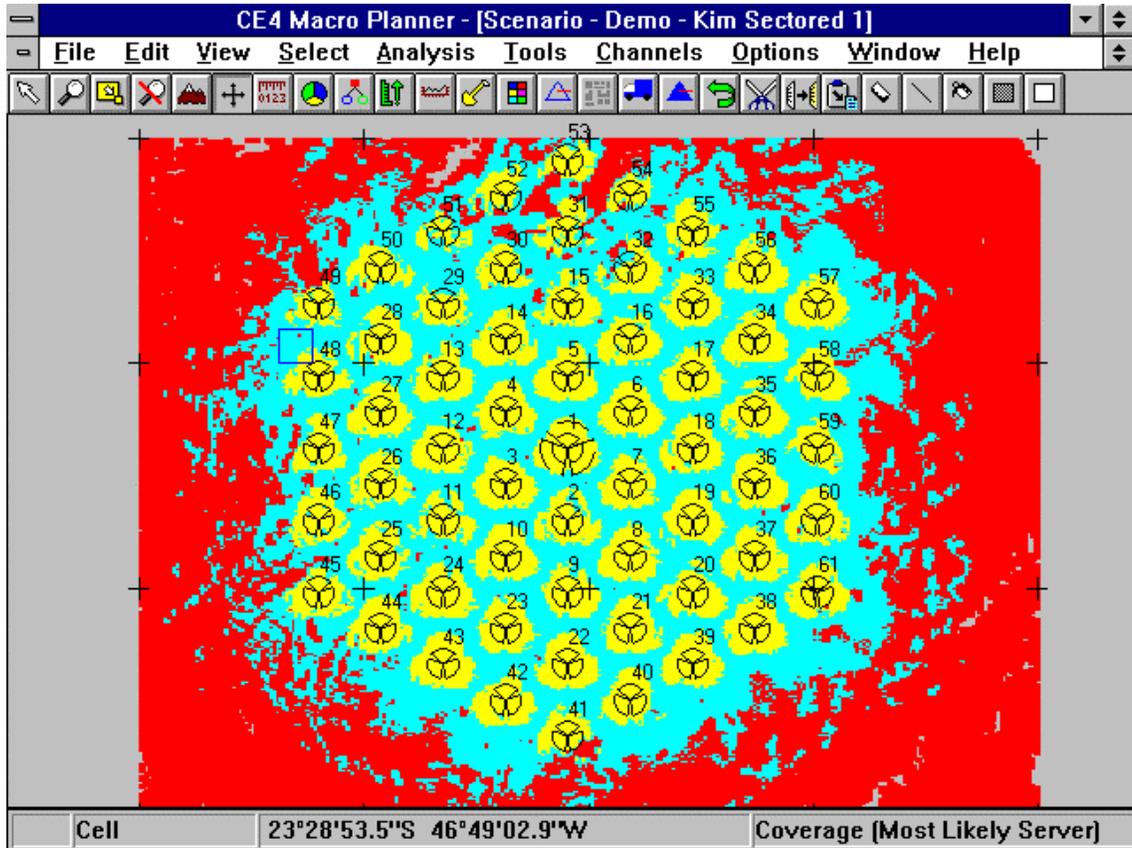
Plot Bands (Units are dB)

	From	To	Color	Symbol
1	0	5	Red	A
2	5	18	Cyan	A
3	18	80	Yellow	A
4	80			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

**Use of Colors/Symbols**

- ◆  Color shows level and Symbol shows id
- ◇  Color shows id and Symbol shows level

Na Fig. 4.21, as cores representam faixas de níveis de potência do sinal desejado ( $C$ ), proveniente da ERB melhor servidora, recebido por uma estação móvel. Evidentemente, o software utiliza estes valores no cálculo de  $C/(I + N_i)$ , no numerador.



**Figura 4.21** Mesmo cenário da Fig. 4.17. As cores representam faixas de níveis de sinal desejado proveniente da ERB melhor servidora ( $C$ ) conforme legendas a seguir:

**Coverage [Most Likely Server]**

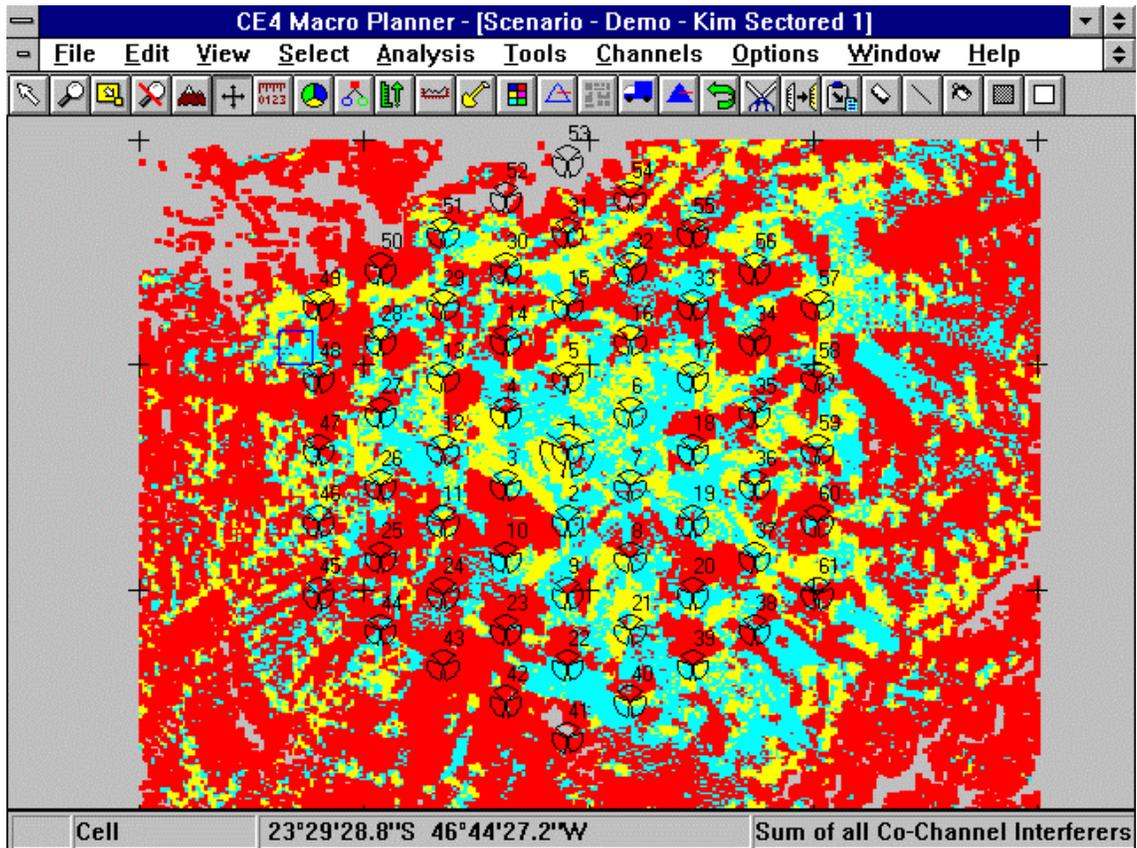
Plot Bands (Units are dBm)

	From	To	Color	Symbol
1	0	-61	Yellow	A
2	-61	-74	Cyan	A
3	-74	-121	Red	A
4	-121			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

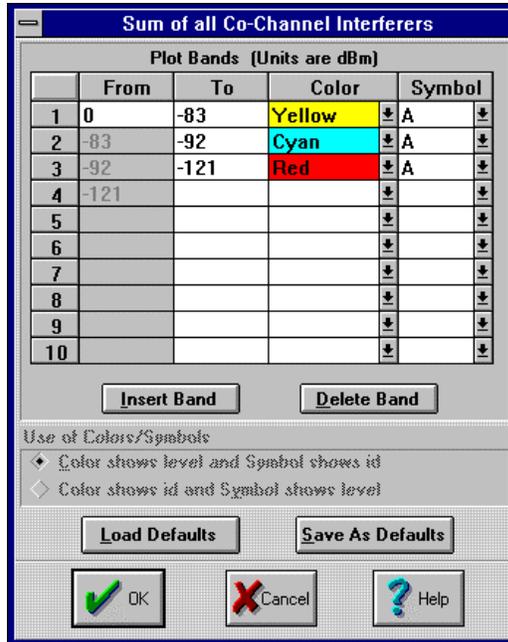
Use of Colors/Symbols

- Color shows level and Symbol shows id
- Color shows id and Symbol shows level

Na Fig. 4.22, as cores representam faixas de níveis de potência da interferência mais ruído ( $N_i + I$ ), sendo as interferências provenientes das ERBs cocanais à melhor servidora em cada ponto do cenário. Evidentemente, o software utiliza estes valores no cálculo de  $C/(I + N_i)$ , no denominador.



**Figura 4.22** Mesmo cenário da Fig. 4.17. As cores representam faixas de níveis de potência da interferência mais ruído, ou seja,  $(N_i + I)$ , sendo as interferências provenientes das ERBs cocanais à melhor servidora em cada ponto do cenário. Evidentemente, o software utiliza estes valores no cálculo de  $C/(I + N_i)$ , no denominador. As legendas desta análise são:



Neste exemplo particular, observa-se que no ponto  $\nabla_1$  do primeiro anel, a degradação da relação portadora/(interferência mais ruído) foi superior ao limite estabelecido de 1 dB. No ponto  $\nabla_2$ , também do primeiro anel, a degradação foi inferior a 1 dB. Nos pontos  $\nabla_3$  e  $\nabla_4$ , do segundo anel, a degradação foi desprezível.

No cenário da Fig. 4.23, o canal de rádio CDMA n° 283 foi ativado nas células que compõem o primeiro anel em torno da célula central. As cores representam faixas de níveis de interferência em estações móveis AMPS ( $I_{MovAMPS \leftarrow ERCDMA}$ ).

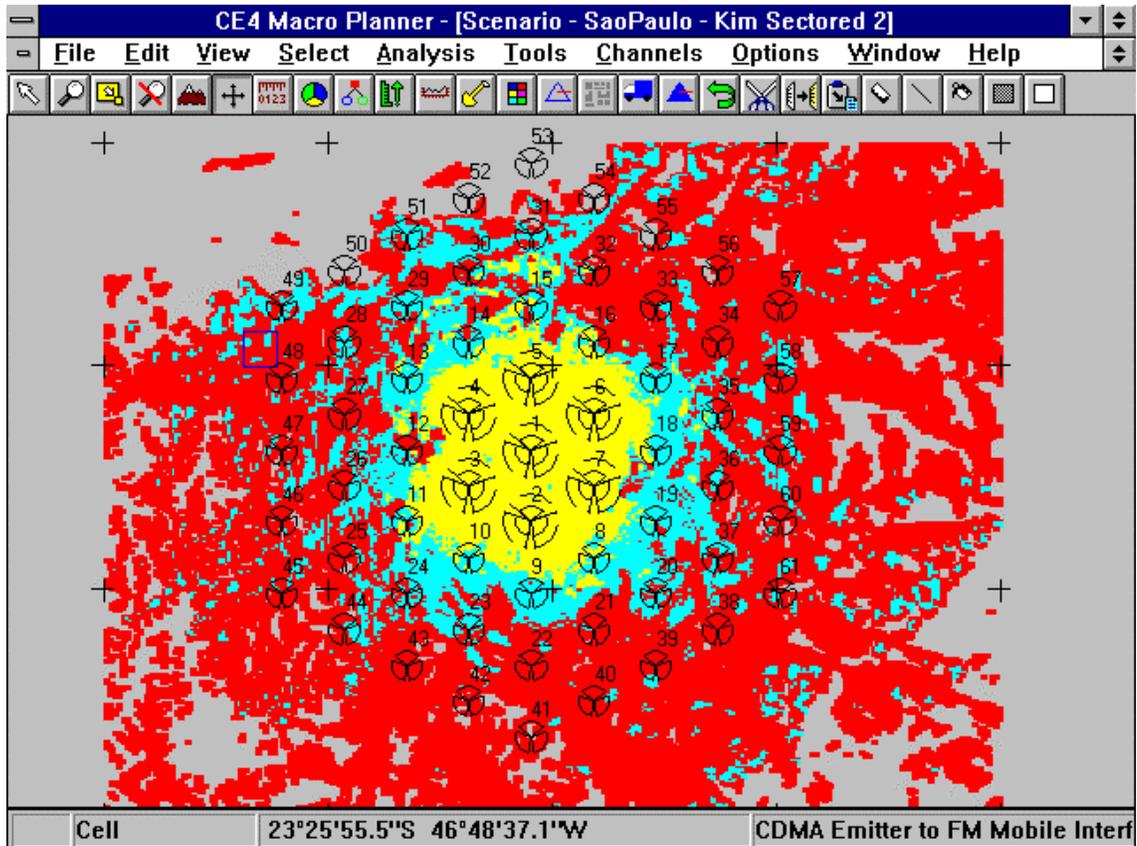


Figura 4.23 Mesmo cenário da Fig. 4.17, porém ativando o canal de rádio CDMA n° 283 nas células do primeiro anel em torno da célula central. As cores representam faixas de níveis de interferência em estações móveis AMPS ( $I_{MovAMPS \leftarrow ERCDMA}$ ). As legendas são:

**CDMA Emitter to FM Mobile Interference**

Plot Bands (Units are dBm)

	From	To	Color	Symbol
1	0	-83	Yellow	A
2	-83	-92	Cyan	A
3	-92	-121	Red	A
4	-121			
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Use of Colors/Symbols

- ◆ Color shows level and Symbol shows id
- ◇ Color shows id and Symbol shows level

A Fig. 4.24 apresenta a mesma análise da Fig. 4.23, destacando os pontos marcados com símbolos  $\nabla_3$ ,  $\nabla_4$ ,  $\nabla_5$  e  $\nabla_6$ , para os quais será calculada a relação portadora/(interferência mais ruído) na Tabela 4.10. É importante observar que o canal de rádio CDMA n° 283 foi ativado em todas as células do cluster central. Assim, as células onde estão os pontos marcados deixam de receber a interferência proveniente das células cocanais que estão no cluster central. Na Tabela 4.10, são calculados os níveis  $(N_t + I)$  e  $C/(N_t + I)$  **antes** e **depois** da desativação dos canais reutilizados no cluster central. Por exemplo, no ponto  $\nabla_3$  que está na célula n° 15, os canais AMPS n°s 262, 283 e 304 deixam de receber interferência dos mesmos canais AMPS que estavam sendo reutilizados na célula n° 3 antes da ativação do canal CDMA n° 283.

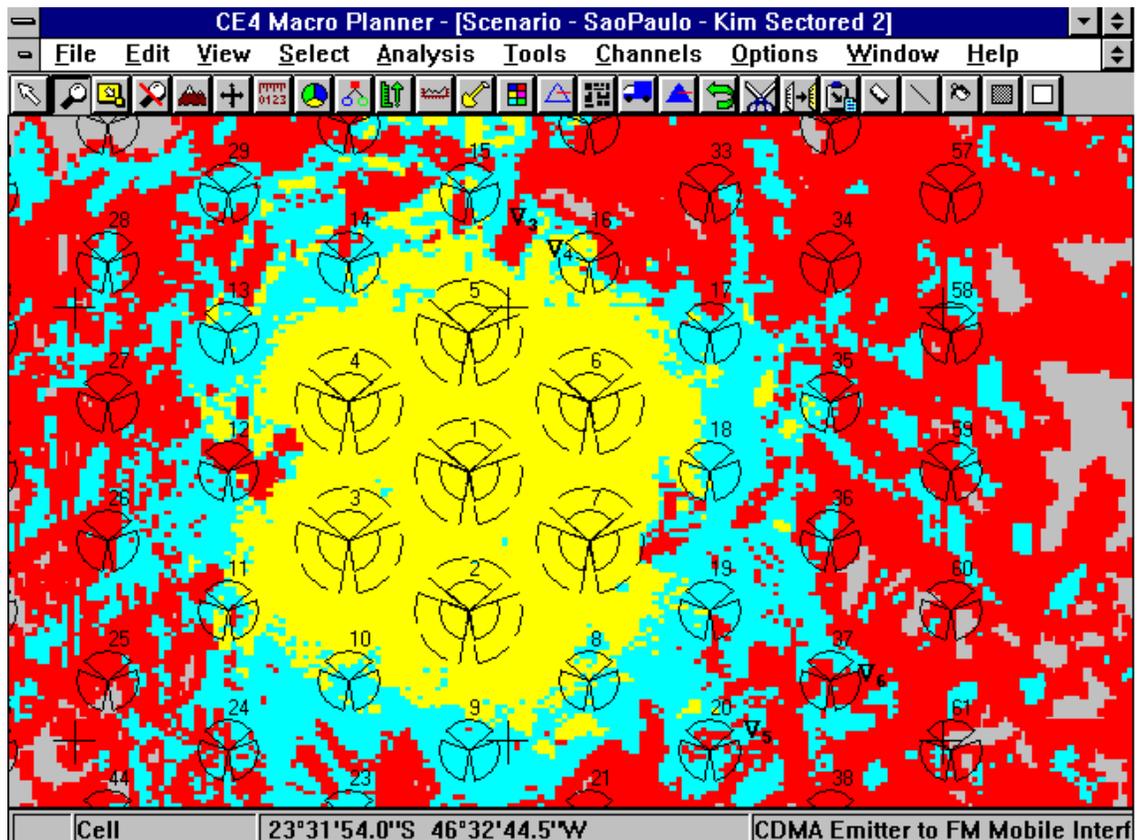


Figura 4.24 Mesma análise da Fig. 4.23, destacando os pontos marcados com os símbolos  $\nabla_3$ ,  $\nabla_4$ ,  $\nabla_5$  e  $\nabla_6$ .

**Tabela 4.10** Cálculo de  $C/(I + N_t + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA})$  nos pontos  $\nabla_3$ ,  $\nabla_4$ ,  $\nabla_5$  e  $\nabla_6$  indicados na Fig. 4.24.

Identific. do ponto	Célula a que pertence	Coordenadas geográficas
V3	n° 15	23° 28' 29,5" S; 46° 37' 22,0" O
V4	n° 16	23° 28' 57,0" S; 46° 36' 39,0" O
V5	n° 20	23° 37' 18,0" S; 46° 33' 12,5" O
V6	n° 37	23° 36' 12,0" S; 46° 31' 20,5" O

Identific. do ponto	$C/(I + N_t)$ antes	$(I + N_t)$ antes	$C/(I + N_t)$ depois	$(I + N_t)$ depois	$C$	$I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA}$	$C/(I + N_t + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA})$	Varição da qualidade
V3	19,5 dB	-78,5 dBm	19,5 dB	-78,5 dBm	-59 dBm	-90,5 dBm	19,2 dB	-0,3 dB
V4	18,5 dB	-76,5 dBm	39,5 dB	-96,5 dBm	-58 dBm	-82,5 dBm	24,3 dB	+5,8 dB
V5	19,5 dB	-82,5 dBm	27,5 dB	-90,5 dBm	-63 dBm	-89,5 dBm	24,0 dB	+4,5 dB
V6	18,5 dB	-76,5 dBm	18,5 dB	-76,5 dBm	-58 dBm	-88,5 dBm	18,2 dB	-0,3 dB

A análise apresentada mostra que, neste exemplo particular, a degradação da relação portadora/(interferência mais ruído) nos pontos  $\nabla_3$  e  $\nabla_6$  foi inferior ao limite máximo estabelecido de 1 dB. Nos pontos  $\nabla_4$  e  $\nabla_5$ , houve aumento da qualidade de sinal.

### **Sobre o modelo de propagação de dois raios**

Nos cenários utilizados para gerar as análises das Figs. 4.17 a 4.24, a distância entre as ERBs é de 4,8 km aproximadamente. Portanto, o raio das células é em média 2,4 km. Nas análises apresentadas, o software de predição utilizou como valor da altura das antenas das estações móveis  $h = 1,8$  m. Nos canais AMPS,  $ERP = 49$  dBm. Nos canais de rádio CDMA,  $ERP = 49$  dBm também. Considerando o solo plano e linha de visada direta entre ERB e estação móvel, que são premissas do modelo de propagação de dois raios, a distância de uma ERB até o ponto de quebra definido no Item 2.2.3 deveria idealmente ser igual ao raio (ou seja,  $R_b = 2,4$  km). Portanto, o valor ideal da altura das antenas das ERBs pode ser calculado pela expressão (2.2.18):

$$R_b = \frac{4Hh}{\lambda} \Rightarrow H = \frac{\lambda R_b}{4h}$$

Na faixa do serviço móvel celular, de 824 a 849 e de 869 a 894 MHz, o comprimento de onda é  $\lambda \cong 0,35$  m. Portanto:

$$H \cong \frac{0,35 \times 2400}{4 \times 1,8} = 116,7 \text{ m}$$

Adotou-se  $H = 50$  m, diferente do calculado, pois em alguns casos reais há limitações quanto a custos de torres ou quanto à altura máxima permitida em cidades onde há aeroportos. Em um sistema com células menores, seria possível adotar na prática o valor ideal (calculado) da altura das antenas das ERBs.

## Conclusões

Neste item, estudou-se um método para verificar a degradação da qualidade de canais AMPS na presença de canais de rádio CDMA interferentes. Este estudo difere muito da abordagem de KIM, principalmente nos seguintes pontos:

- As interferências de células CDMA nas células AMPS são calculadas no sentido direto. Na abordagem de KIM, estas foram calculadas no sentido reverso.
- As células são setorizadas.
- O software de predição de níveis de sinal foi utilizado. Assim, o formato das células não é hexagonal e depende das irregularidades do terreno.

Na Tabela 4.9, a degradação da relação portadora/(interferência mais ruído) no ponto  $\nabla_1$  foi maior que 1 dB. Este resultado para o ponto  $\nabla_1$ , que pertence a uma célula do primeiro anel no entorno da célula central, não justifica reservar todo o primeiro anel como região de guarda. Na Tabela 4.10, a degradação da relação portadora/(interferência mais ruído) no ponto  $\nabla_3$  foi inferior a 1 dB. Deste resultado para o ponto  $\nabla_3$ , que pertence a uma célula do primeiro anel no entorno do "cluster CDMA", não se pode concluir que este anel de guarda é desnecessário.

Neste item, a relação portadora/(interferência mais ruído) foi calculada em apenas 4 pontos. Poderiam ser obtidos resultados mais conclusivos aplicando o método apresentado para calcular a relação portadora/(interferência mais ruído) em um número de pontos muito maior, antes e depois da introdução de células CDMA. O desenvolvimento de uma rotina dentro do software de predição para calcular a relação  $C/(I + N_f + I_{MovAMPS \leftarrow ERBCDMA})$  facilitaria o estudo da variação deste parâmetro em função da localização das ERBs e da potência transmitida em canais de rádio CDMA, facilitando a tomada de decisões quanto à reserva de regiões de guarda.

#### 4.6 NÚMERO DE ASSINANTES EM CADA ETAPA DE MIGRAÇÃO

Procura-se calcular o número de assinantes analógicos e digitais a partir dos cenários utilizados no Item 4.5, durante algumas etapas de migração. Para o cálculo de capacidade, será utilizado o modelo de tráfego de Erlang-B, com bloqueio máximo de 2 % (vide o ANEXO D). Para o cálculo do número de assinantes que podem ser atendidos pelo sistema celular nas diferentes etapas, admite-se que a distribuição de tráfego é uniforme em todos os setores do sistema e que cada estação móvel gera em média 0,03 erl durante a HMM<sup>14</sup>.

Inicialmente, o sistema é constituído por 61 células AMPS de 3 setores e nenhuma célula CDMA. Os canais utilizados são do bloco A. Cada setor tem 19 canais de voz AMPS, exceto aqueles que utilizam os grupos C1, E3, F3 e G3. Para simplificar os cálculos, consideram-se em média 19 canais de voz por setor. Portanto, a capacidade de cada setor (bloqueio = 2 %) é (aproximadamente) 12,33 erl. Assim, cada uma destas células pode atender até  $\frac{3 \times 12,33}{0,03} = 1.233$  estações móveis AMPS. Então, o sistema inicial pode atender até  $61 \times 1.233 = 75.213$  estações móveis AMPS, i.e., "assinantes analógicos".

As células CDMA têm 3 setores atendendo no máximo 19 chamadas simultâneas por setor. Assim como as células AMPS de 3 setores, cada célula CDMA pode atender até 1.233 assinantes digitais. As estações móveis CDMA são duais. Uma estação móvel dual é capaz de estabelecer chamadas utilizando canais AMPS no caso de indisponibilidade de canais de tráfego CDMA. Entretanto, para simplificar os cálculos de capacidade em Erlangs deste capítulo, será desconsiderada a possibilidade de uma estação móvel dual utilizar canais AMPS. Assim, da mesma forma que uma estação móvel dita "analógica" pode utilizar somente canais

AMPS, uma estação móvel "digital" poderia utilizar somente canais CDMA. Esta premissa reduz a eficiência de entroncamento do sistema considerado.

Assume-se que uma estação móvel localizada em um setor de uma célula tem a possibilidade de ser atendida por qualquer canal de rádio CDMA que esteja disponível naquele setor. Esta premissa aumenta a eficiência de entroncamento do sistema.

Neste estudo, a região de guarda entre células AMPS e CDMA sempre será um anel de células, como foi concluído no Item 4.4. Após a introdução de um canal de rádio CDMA, o número de canais de voz AMPS por grupo é reduzido em média para 16 nas células CDMA e na região de guarda (vide Item 4.3). Portanto, a capacidade de cada setor (bloqueio = 2%) é 9,83 erl (aproximadamente) e o número máximo de assinantes analógicos que uma destas células pode

$$\text{atender é } \frac{3 \times 9,83}{0,03} = 983.$$

### **1ª etapa:**

Introduz-se um canal de rádio CDMA na célula central. Seja este o canal número 283. A região de guarda é então formada pelas células do primeiro anel, ou seja, 6 células, como ilustrado na Fig. 4.25. O sistema resultante da 1ª etapa tem:

- 7 células AMPS setorizadas com 16 canais de voz por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes =  $7 \times 983 = 6.881$
- 54 células AMPS setorizadas com 19 canais de voz por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes =  $54 \times 1.233 = 66.582$

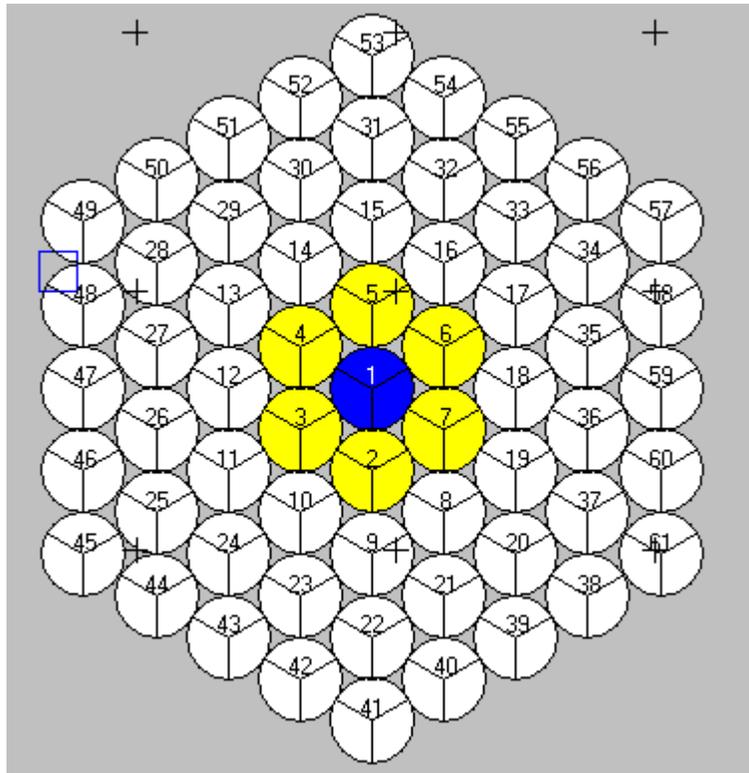
$$\text{Número de assinantes analógicos} = 66.582 + 6.881 = 73.463$$

---

<sup>14</sup> HALPERN, et al. (1994) utilizam o valor 0,02 erl/assinante em um exemplo de cálculo do número de

- 1 célula CDMA setorizada que pode atender até 19 chamadas por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes digitais = 1.233

O número de assinantes analógicos + digitais é  $73.463 + 1.233 = 74.696$



**Figura 4.25** 1ª etapa de migração em um sistema celular composto de 61 células setorizadas. As legendas são:

	<b>Células que utilizam um mesmo canal de rádio CDMA.</b>
	<b>Região de guarda.</b>
	<b>Células que utilizam canais AMPS na mesma faixa de frequência utilizada pelo canal de rádio CDMA.</b>

## 2ª etapa:

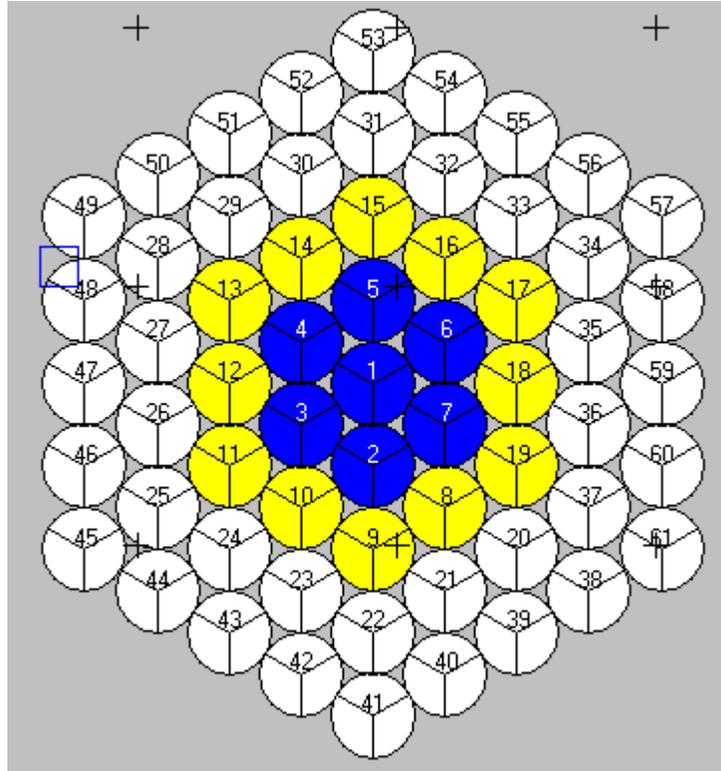
Introduz-se um canal de rádio CDMA nas células do primeiro anel. A região de guarda é então formada pelas células do segundo anel, ou seja, 12 células, como ilustrado na Fig. 4.26. O sistema resultante da 2ª etapa tem:

- $7 + 12 = 19$  células AMPS setorizadas com 16 canais de voz por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes =  $19 \times 983 = 18.677$
- $61 - 19 = 42$  células AMPS setorizadas com 19 canais de voz por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes =  $42 \times 1.233 = 51.786$

Número de assinantes analógicos =  $18.677 + 51.786 = 70.463$

- 7 células CDMA setorizadas que podem atender até 19 chamadas por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes digitais =  $7 \times 1.233 = 8.631$

O número de assinantes analógicos + digitais é  $70.463 + 8.631 = 79.094$



**Figura 4.26** 2ª etapa de migração em um sistema celular composto de 61 células setorizadas. As legendas são as mesmas da Fig. 4.25 anterior.

**3ª etapa:**

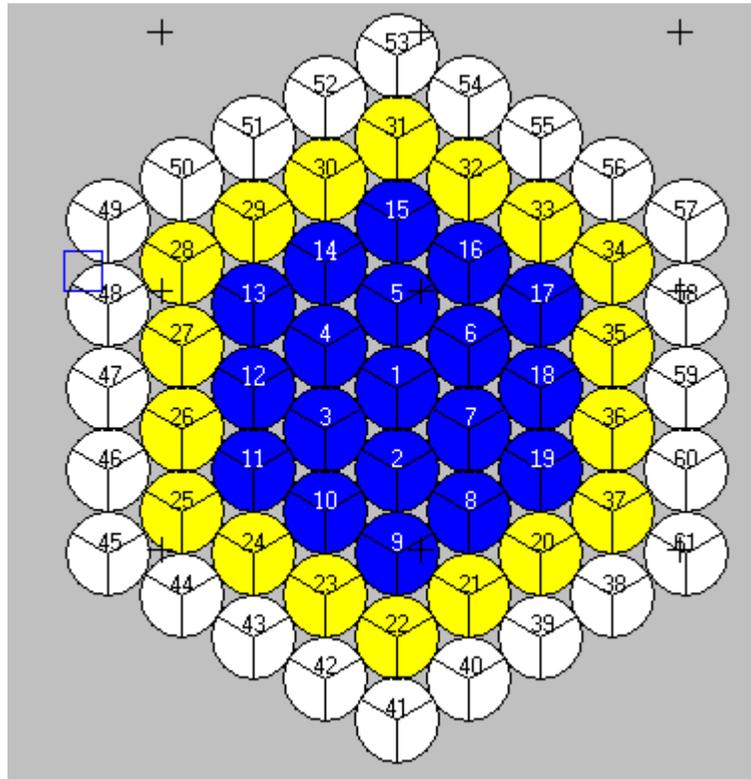
Introduz-se um canal de rádio CDMA nas células do segundo anel. A região de guarda é então formada pelas células do terceiro anel, ou seja, 18 células, como ilustrado na Fig. 4.27. O sistema resultante da 3ª etapa tem:

- $19 + 18 = 37$  células AMPS setorizadas com 16 canais de voz por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes =  $37 \times 983 = 36.371$
- $61 - 37 = 24$  células AMPS setorizadas com 19 canais de voz por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes =  $24 \times 1.233 = 29.592$

Número de assinantes analógicos =  $36.371 + 29.592 = 65.963$

- $7 + 12 = 19$  células CDMA setorizadas que podem atender até 19 chamadas por setor  
 $\Rightarrow$  Número de assinantes digitais =  $19 \times 1.233 = 23.427$

O número de assinantes analógicos + digitais é  $65.963 + 23.427 = 89.390$



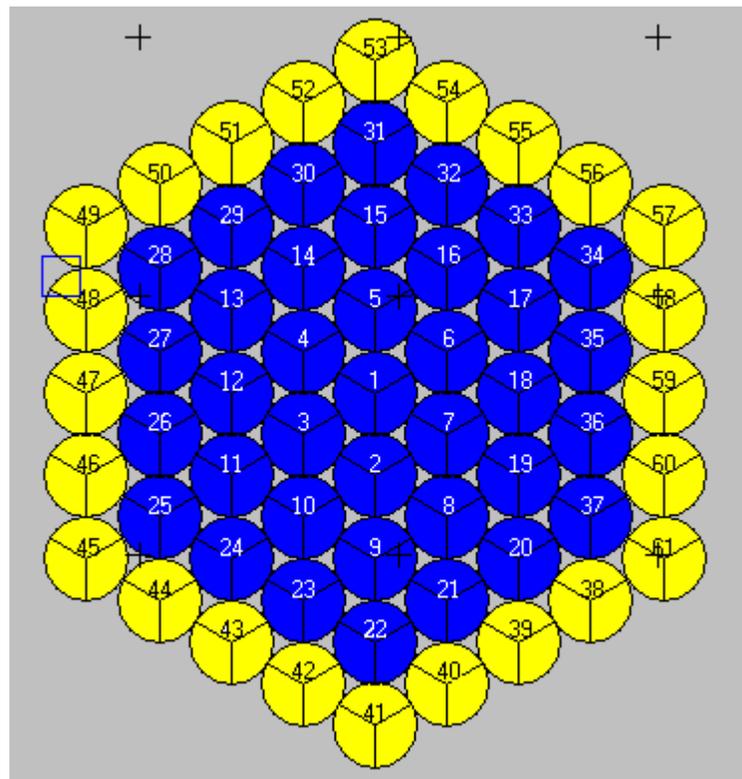
**Figura 4.27** 3ª etapa de migração em um sistema celular composto de 61 células setorizadas. As legendas são as mesmas da Fig. 4.25.

**4ª etapa:**

Introduz-se um canal de rádio CDMA nas células do terceiro anel. A região de guarda é então formada pelas células do quarto anel, ou seja, 24 células, como ilustrado na Fig. 4.28. O sistema resultante da 4ª etapa tem:

- Todas as 61 células AMPS setorizadas com 16 canais de voz por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes analógicos =  $61 \times 983 = 59.963$
- $19 + 18 = 37$  células CDMA setorizadas que podem atender até 19 chamadas por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes digitais =  $37 \times 1.233 = 45.621$

O número de assinantes analógicos + digitais é  $59.963 + 45.621 = 105.584$



**Figura 4.28** 4ª etapa de migração em um sistema celular composto de 61 células setorizadas. As legendas são as mesmas da Fig. 4.25.

### 5ª etapa:

Introduz-se um canal de rádio CDMA nas células do quarto anel. Assim, o sistema digital fica disponível em toda a área de serviço. O sistema resultante da 5ª etapa tem:

- Todas as 61 células AMPS setorizadas com 16 canais de voz por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes analógicos =  $61 \times 983 = 59.963$
- Todas as 61 células CDMA setorizadas podem atender 19 chamadas por setor  $\Rightarrow$  Número de assinantes digitais =  $61 \times 1.233 = 75.213$

O número de assinantes analógicos + digitais é  $59.963 + 75.213 = 135.176$ . Até aqui, somente foi utilizado o canal CDMA número 283.

### 6ª etapa:

Introduz-se o canal CDMA número 242 em todas as células do sistema, que é contíguo ao canal 283.

O número de canais AMPS por setor é reduzido para 14, em média (valor aproximado). A capacidade de cada setor (AMPS) vai para 8,20 erl (bloqueio = 2%). Portanto, cada célula pode

atender até  $\frac{3 \times 8,20}{0,03} = 820$  assinantes analógicos, e o sistema pode atender

até  $61 \times 820 = 50.020$  assinantes analógicos.

O número máximo de chamadas de usuários CDMA por setor aumenta para 38, com capacidade 29,17 erl por setor (assumindo que uma estação móvel localizada em um setor de uma célula tem a possibilidade de ser atendida por qualquer canal de rádio CDMA que esteja disponível

naquele setor). Portanto, o número de assinantes digitais do sistema vai para

$$61 \times \frac{3 \times 29,17}{0,03} = 177.937$$

O número total de assinantes vai para  $50.020 + 177.937 = 227.957$ , que é aproximadamente o triplo do número de assinantes do sistema inicial.

### **Etapas 7<sup>a</sup> a 13<sup>a</sup>**

Em cada uma destas etapas, introduz-se em todas as células do sistema um canal de rádio CDMA na mesma seqüência descrita na Tabela 4.6, sempre mantendo ativos os canais de rádio CDMA já introduzidos e respeitando a banda de guarda. O cálculo do número de assinantes nas etapas 7 a 13 é análogo ao das etapas 5 e 6.

A Tabela 4.11 apresenta o número de assinantes em todas as etapas de migração, do início à 13<sup>a</sup>.

**Tabela 4.11** Número de assinantes em cada etapa de migração.

<b>Etapa</b>	<b>Canais de rádio CDMA ativos</b>	<b>Nº de assinantes digitais no sistema</b>	<b>Nº de assinantes AMPS no sistema</b>	<b>Total de assinantes</b>
Inicial	Nenhum	0	75.213	75.213
1	283	1.233	73.463	74.696
2	283	8.631	70.463	79.094
3	283	23.427	65.963	89.390
4	283	45.621	59.963	105.584
5	283	75.213	59.963	135.176
6	283, 242	177.937	50.020	227.957
7	283, 242, 201	285.602	40.321	325.923
8	283, 242, 201, 160	395.646	30.988	426.634
9	283, 242, 201, 160, 119	507.093	22.143	529.236
10	283, 242, 201, 160, 119, 78	619.577	13.908	633.485
11	283, 242, 201, 160, 119, 78, 37	732.732	6.649	739.381
12	283, 242, 201, 160, 119, 78, 37, 1019	846.497	1.342	847.839
13	283, 242, 201, 160, 119, 78, 37, 1019, 691	960.628	0	960.628

## 4.7 CONCLUSÕES

- O sistema final pode atender 12,8 vezes o número de assinantes do sistema inicial. Na última etapa de migração, o sistema celular não possui canais de voz para atender os assinantes AMPS, o que não é recomendável considerando que dificilmente deixariam de existir estações móveis analógicas.
- No primeiro passo de migração, o número de assinantes que o sistema pode atender quase não varia, e uma fração destes precisa trocar seu telefone analógico por um dual. A análise da estratégia de migração proposta neste trabalho permitiu verificar que o aumento da capacidade não é grande no início da migração devido à perda dos canais AMPS desativados na região de guarda. Esta conclusão não exclui a adoção desta estratégia, e realça a importância de serem evitadas regiões de guarda em excesso.
- O bloco A pode ser melhor aproveitado que o bloco B durante a migração, pois no bloco A é possível ativar até 9 canais de rádio CDMA, ao passo que no bloco B só é possível ativar 8. Tanto no bloco A como no B, o espectro ocupado pelos canais de controle AMPS não foi aproveitado para canais de rádio CDMA, pois os canais de controle serão necessários até o final da migração.
- O último canal de rádio CDMA a ser ativado no bloco A foi o secundário (canal 691), devido aos problemas com banda de guarda apresentados no Item 4.3.
- No exercício sobre migração apresentado no Item 4.6, a partir da 6ª etapa (ativação do canal 242) o número de assinantes digitais cresceu proporcionalmente à Tabela de

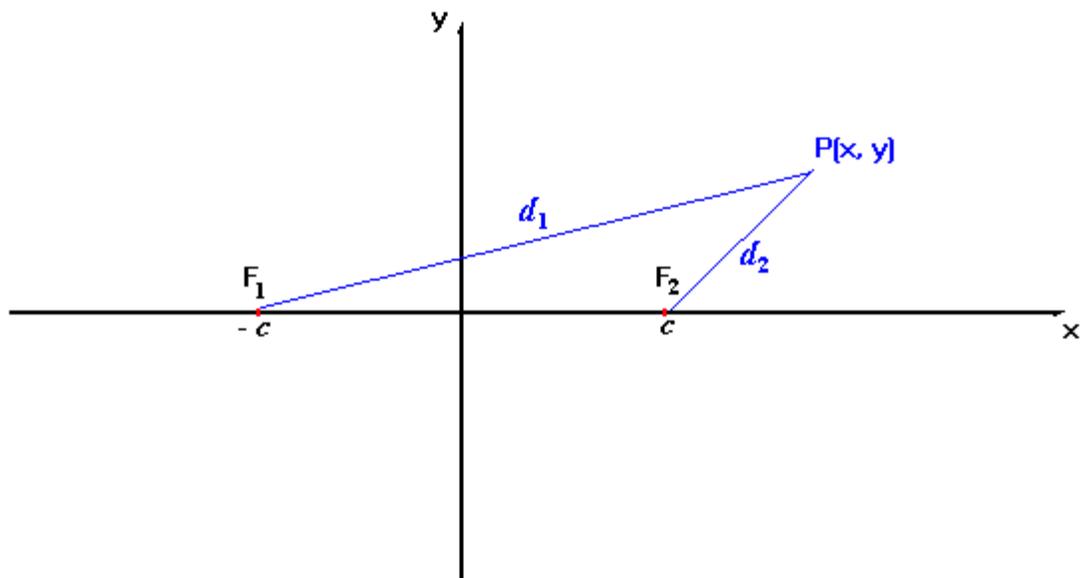
Erlang-B. Caso não fosse adotada a premissa que uma estação móvel localizada em um setor de uma célula tem a possibilidade de ser atendida por qualquer canal de rádio CDMA disponível naquele setor, a eficiência de entroncamento para os usuários CDMA seria reduzida, e o número de assinantes digitais teria crescido linearmente a partir da 6ª etapa.

- O número de assinantes analógicos em cada etapa de transição foi obtido de forma aproximada, calculando a capacidade a partir do número médio de canais de voz AMPS por setor. O número de assinantes analógicos em cada etapa pode ser calculado de forma mais acurada utilizando a capacidade média por setor, em Erlangs.
- A análise de interferências de KIM (1993) para o canal reverso não é tão completa quanto a análise do canal direto por software de predição, que considera dados sobre topografia e um modelo de propagação que pode ser ajustado conforme medidas de intensidade de sinal.
- Uma continuação deste trabalho seria estudar as conseqüências da interferência gerada por células AMPS sobre células CDMA, no sentido direto e reverso. Os efeitos esperados seriam degradação da qualidade do sinal, redução da área de cobertura e redução do número máximo de assinantes atendidos.

## ANEXO A

### Definição de elipse

Considerem-se dois pontos fixos e distintos  $F_1$  e  $F_2$  em um plano. A distância entre estes pontos é igual a  $2c$ . Uma elipse é o lugar geométrico dos pontos desse plano cuja soma da distância a  $F_1$  com a distância a  $F_2$  é uma constante,  $2a$ , maior que  $2c$ .



**Figura A-1** Plano cartesiano. O ponto  $P$  tem coordenadas  $(x, y)$ .  $F_1$  tem coordenadas  $(-c, 0)$ .  $F_2$  tem coordenadas  $(+c, 0)$ .

Na Fig. A-1, as distâncias  $d_1$  e  $d_2$  são dadas por:

$$d_1^2 = (x - c)^2 + y^2 \quad (\text{A-1})$$

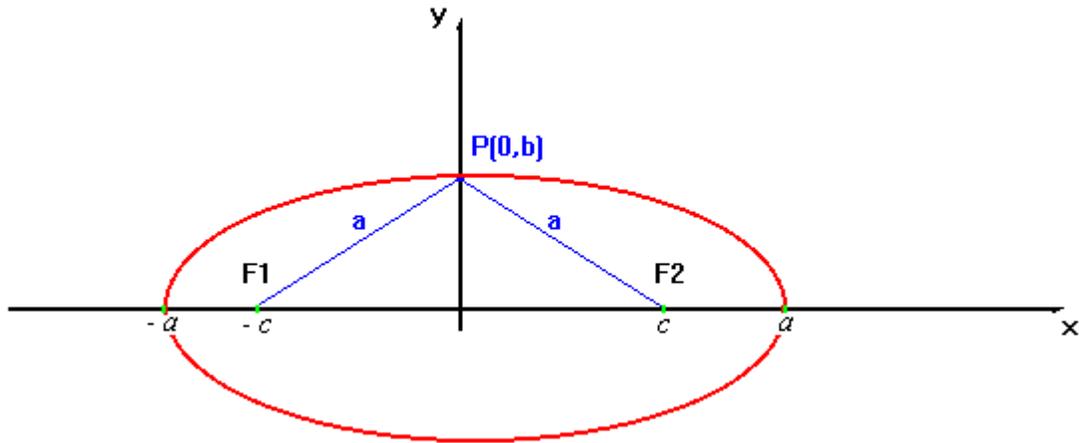
$$d_2^2 = (x + c)^2 + y^2 \quad (\text{A-2})$$

Uma elipse é formada pelos pontos  $P(x, y)$  tais que

$$d_1 + d_2 = 2a \quad (\text{A-3})$$

A Fig. A-2 ilustra uma elipse. Seu raio maior é dado por  $a$ . Seu raio menor é dado por  $b$ .

$$a^2 = b^2 + c^2 \quad (\text{A-4})$$



**Figura A-2** Elipse cujo raio maior é  $a$  e o raio menor é  $b$ .

### Equação de uma elipse

A equação de uma elipse é obtida substituindo (A-1) e (A-2) em (A-3):

$$\sqrt{(x-c)^2 + y^2} + \sqrt{(x+c)^2 + y^2} = 2a \quad (\text{A-5})$$

Desenvolvendo, simplificando e substituindo  $(a^2 - c^2)$  por  $b^2$  vem:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (\text{A-6})$$

A expressão (A-6) é a equação de uma elipse.

### Raio da Primeira Zona de Fresnel na ordenada $x$

Conforme visto no Item (2.2), a Primeira Zona de Fresnel é uma elipse tal que os focos  $F_1$  e  $F_2$  são respectivamente as antenas transmissora e receptora, e

$$2a = 2c + \frac{\lambda}{2} \quad (\text{A-7})$$

O raio da Primeira Zona de Fresnel na ordenada  $x$  é  $y(x)$ . Isolando  $y$  na expressão (A-6), obtém-se:

$$y^2 = (a^2 - c^2) \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} \right)$$

Substituindo  $a$  por  $c + \frac{\lambda}{4}$ , como mostra a expressão (A-7):

$$y^2 = \left[ \left( c + \frac{\lambda}{4} \right)^2 - c^2 \right] \left[ 1 - \frac{x^2}{\left( c + \frac{\lambda}{4} \right)^2} \right] = \left[ c \frac{\lambda}{2} + \left( \frac{\lambda}{4} \right)^2 \right] \left[ \frac{c^2 + c \frac{\lambda}{2} + \left( \frac{\lambda}{4} \right)^2 - x^2}{c^2 + c \frac{\lambda}{2} + \left( \frac{\lambda}{4} \right)^2} \right]$$

Considerando que na faixa de freqüências utilizada pelo serviço celular,  $\lambda$  é da ordem de 0,35 m, e que  $c$  é metade da distância entre o transmissor e o receptor, fazem-se a seguir duas aproximações, considerando  $\lambda \ll c$ :

1ª aproximação: desprezar as parcelas iguais a  $\left( \frac{\lambda}{4} \right)^2$

$$y^2 = c \frac{\lambda}{2} \left( \frac{c^2 + c \frac{\lambda}{2} - x^2}{c^2 + c \frac{\lambda}{2}} \right)$$

2ª aproximação: desprezar, no fator à direita, as parcelas multiplicadas por  $\frac{\lambda}{2}$

$$y^2 = c \frac{\lambda}{2} \left( \frac{c^2 - x^2}{c^2} \right)$$

Portanto:

$$y = \sqrt{\lambda \frac{(c+x)(c-x)}{2c}} \tag{A-8}$$

A expressão (A-8) é equivalente a (2.2.6), alterando somente a notação utilizada.

## ANEXO B

Explica-se a seguir como isolar  $d_{\#}$ , ponto em que o primeiro Elipsóide de Fresnel intercepta o chão, na expressão (2.2.21), que pode ser reescrita como (B-1):

$$\sqrt{(H+h)^2 + d_{\#}^2} = \sqrt{(H-h)^2 + d_{\#}^2} + \frac{\lambda}{2} \quad (\text{B-1})$$

Para simplificar os cálculos, definem-se:

$$\Sigma = H + h$$

$$\Delta = H - h$$

Substituindo  $\Sigma$  e  $\Delta$  em (B-1) e isolando  $\frac{\lambda}{2}$ , obtém-se:

$$\sqrt{\Sigma^2 + d_{\#}^2} = \frac{\lambda}{2} + \sqrt{\Delta^2 + d_{\#}^2}$$

Elevando ambos os termos ao quadrado, vem:

$$\Sigma^2 + d_{\#}^2 = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \lambda\sqrt{\Delta^2 + d_{\#}^2} + \Delta^2 + d_{\#}^2$$

$$\Sigma^2 - \Delta^2 - \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 = \lambda\sqrt{\Delta^2 + d_{\#}^2}$$

Elevando novamente ao quadrado, vem:

$$(\Sigma^2 - \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 - \Delta^2)\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^4 = \lambda\Delta^2 + \lambda^2 d_{\#}^2$$

$$\lambda^2 d_{\#}^2 = (\Sigma^2 - \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 - \Delta^2)\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 - \lambda\Delta^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^4$$

$$\lambda^2 d_{\#}^2 = (\Sigma^2 - \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 + \Delta^2) \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^4$$

Isolando  $d_{\#}$  obtém-se:

$$d_{\#} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(\Sigma^2 - \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 + \Delta^2) \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^4} \quad (\text{B-2})$$

Na faixa de 800 a 900 MHz,  $\lambda = \frac{c}{f} \approx 35\text{cm}$ , e assim a expressão (B-2) pode ser simplificada

considerando-se  $\lambda \ll h$  e  $\lambda \ll H$ :

$$d_{\#} \approx \frac{1}{\lambda} \sqrt{(\Sigma^2 - \Delta^2)^2} = \frac{4Hh}{\lambda} \quad (\text{B-3})$$

## ANEXO C

Apresenta-se a rotina para o software Matlab utilizada para calcular o fator de eficiência do reuso  $K^\#$  definido no Item 4.4. O fator  $K^\#$  pode ser calculado pela expressão (4.4.23), que está transcrita a seguir como (C-1)<sup>15</sup>:

$$K^\# = \frac{N_c}{N} = 1 + \frac{I_{oc}}{\alpha N S_c} = 1 + 12 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n G[L] \quad (C-1)$$

$G[L]$  é dado pela expressão (4.4.18), que é transcrita a seguir como (C-2):

$$G[L] = 2L \ln\left(\frac{L}{L-1}\right) - \left[ \frac{4L^2 - 6L + 1}{2(L-1)^2} \right] \quad (C-2)$$

e  $L$  é dado pela expressão (4.4.11), transcrita a seguir como (C-3):

$$L = 4(n^2 + i^2 - ni) \quad (C-3)$$

As expressões (C-1), (C-2) e (C-3) foram calculadas para os primeiros 300 anéis, ou seja, com  $n$  variando de 1 até 300, utilizando a rotina para Matlab listada a seguir (alguns comandos foram alterados, somente para facilitar o entendimento da rotina):

```

eficienc.m

for n=1:300

    for i=1:n

        l[n,i]=4*(n*n+i*i-n*i);

    end;

end;
```

```

for n=1:300
    for i=1:n
        L=l[n,i];
        G[n,i]=-2*L*ln(1-1/L)-0.5*(4*L*L-6*L+1)/(L-1)^2;
    end;
end;
Ksustenido = 1+12*sum(sum(G))
end

```

A seguir, cópia da janela de comando, para mostrar o resultado obtido:

```
» eficienc
```

```
Ksustenido =
```

```
1.3265
```

Observação: Para cada valor de  $n$ ,  $G[n,i]$  é calculado para  $i$  variando de 1 a  $n$ , havendo portanto valores repetidos. O cálculo de  $G[n,i]$  somente seria necessário para o grupo de células consecutivas contidas entre o eixo " $n$ " e o eixo de simetria representado na Fig. 2.28.

---

<sup>15</sup> A diferença da expressão (4.4.23) para a expressão (C-1) é que nesta, para cada valor de  $n$ ,  $i$  varia de 1 a  $n$ , e não de 0 a  $(n - 1)$  porque o software Matlab não aceita índice zero para elementos de vetores ou matrizes. Esta modificação da expressão não irá alterar o resultado.

ANEXO D

Tabela de Erlang-B para bloqueio de 2%					
Número de canais	Capacidade (em Erlangs)	Número de canais	Capacidade (em Erlangs)	Número de canais	Capacidade (em Erlangs)
1	0.02	31	22.83	61	50.59
2	0.22	32	23.73	62	51.53
3	0.60	33	24.63	63	52.48
4	1.09	34	25.53	64	53.43
5	1.66	35	26.44	65	54.38
6	2.28	36	27.34	66	55.32
7	2.94	37	28.25	67	56.27
8	3.63	38	29.17	68	57.23
9	4.35	39	30.08	69	58.18
10	5.08	40	31.00	70	59.13
11	5.84	41	31.92	71	60.08
12	6.61	42	32.84	72	61.04
13	7.40	43	33.76	73	61.99
14	8.20	44	34.68	74	62.94
15	9.01	45	35.61	75	63.90
16	9.83	46	36.53	76	64.86
17	10.66	47	37.46	77	65.81
18	11.49	48	38.39	78	66.77
19	12.33	49	39.32	79	67.73
20	13.18	50	40.26	80	68.69
21	14.04	51	41.19	81	69.65
22	14.90	52	42.12	82	70.61
23	15.76	53	43.06	83	71.57
24	16.63	54	44.00	84	72.53
25	17.50	55	44.94	85	73.49
26	18.38	56	45.88	86	74.45
27	19.27	57	46.82	87	75.42
28	20.15	58	47.76	88	76.38
29	21.04	59	48.70	89	77.34
30	21.93	60	49.64	90	78.31

Tabela de Erlang-B para bloqueio de 2%					
Número de canais	Capacidade (em Erlangs)	Número de canais	Capacidade (em Erlangs)	Número de canais	Capacidade (em Erlangs)
91	79.27	121	108.40	151	137.79
92	80.24	122	109.37	152	138.77
93	81.20	123	110.35	153	139.75
94	82.17	124	111.32	154	140.74
95	83.13	125	112.30	155	141.72
96	84.10	126	113.28	156	142.70
97	85.07	127	114.26	157	143.69
98	86.04	128	115.23	158	144.67
99	87.00	129	116.21	159	145.66
100	87.97	130	117.19	160	146.64
101	88.94	131	118.17	161	147.63
102	89.91	132	119.15	162	148.61
103	90.88	133	120.12	163	149.60
104	91.85	134	121.10	164	150.58
105	92.82	135	122.08	165	151.57
106	93.79	136	123.06	166	152.55
107	94.76	137	124.04	167	153.54
108	95.73	138	125.02	168	154.52
109	96.71	139	126.00	169	155.51
110	97.68	140	126.98	170	156.50
111	98.65	141	127.97	171	157.48
112	99.62	142	128.95	172	158.47
113	100.60	143	129.93	173	159.46
114	101.57	144	130.91	174	160.44
115	102.54	145	131.89	175	161.43
116	103.52	146	132.87	176	162.42
117	104.49	147	133.85	177	163.41
118	105.47	148	134.84	178	164.39
119	106.44	149	135.82	179	165.38
120	107.42	150	136.80	180	166.37

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CELTEC Tecnologia de Telecomunicações: "Sistemas CDMA e o Padrão IS-95", Versão 2.0, 1996.
- FERRARI, A. M., "Telecomunicações: Evolução & Revolução", Ed. Érica, 1991.
- FINANCIAL TIMES MOBILE COMMUNICATIONS, Issue no. 206, November 14, 1996.
- GILHOUSEN, K. S.; JACOBS, I. M.; PADOVANI, R.; VITERBI, A. J.; WEAVER Jr., L. A. ; WHEATLEY III, C. E., "On the Capacity of a Cellular CDMA System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, no. 2, May 1991, pp. 303 - 312.
- HALPERN, S. W; GOLEMBESKI, J. J.; KILGORE, D. E. ; NELSON, E. A. ; WILLIS, B. E., "The IS-95 CDMA Digital Cellular Communications System", AT&T CC 1360 Version 1.3, 1994.
- JANSEN, M. G.; PRASAD, R., "Capacity, Throughput, and Delay Analysis of a Cellular DS CDMA System With Imperfect Power Control and Imperfect Sectorization", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 44, no. 1, Feb 1995, pp. 67 - 75.
- JESZENSKY, P. J. E., "Uma Revisão Sobre Geradores Lineares de Seqüências para uso em Comunicação por Espalhamento Espectral", 9º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 02 a 05 de setembro de 1991.
- JESZENSKY, P. J. E., "Comunicação por Espalhamento Espectral: Uma Motivação para o Estudo de Seqüências de Códigos", apostila do curso PEE-710 - Comunicação por Espalhamento Espectral, 1992.
- JESZENSKY, P. J. E., "Comunicação por Espalhamento Espectral: Teoria Básica Sobre Seqüências de Códigos", apostila do curso PEE-710 - Comunicação por Espalhamento Espectral, 1994.
- KIM, K. I., "CDMA Cellular Engineering Issues", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, no. 3, Aug. 1993, pp. 345 - 350.
- KRAUS, J. D., "Antennas", McGraw-Hill Book Company, 1950.
- LEE, W. C. Y., "Mobile Communications Design Fundamentals", John Wiley & Sons, 1993.
- LEE, W. C. Y., "Mobile Cellular Telecommunications - Analog and Digital Systems", McGraw-Hill, Segunda Edição, 1995.
- LUCENT TECHNOLOGIES, document number 401-614-012, "CDMA RF Engineering Guidelines", 1997.

MACDONALD, V. H., "Advanced Mobile Phone Service - The Cellular Concept", Bell System Technical Journal, Jan. 1979, pp. 15 - 41.

MILSTEIN, L. B.; SCHILLING, D. L.; PICKHOLTZ, R. L.; ERCEG, V.; KULLBACK, M.; KANTERAKIS, E. G.; FISHMAN, D. S.; BIEDERMAN, W. H.; SALERNO, D. C., "On the Feasibility of a CDMA Overlay for Personal Communications Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 10, no. 4, May 1992, pp. 655 - 668.

NEWSON, P. E.; HEATH, M. R., "The Capacity of a Spread Spectrum CDMA System for Cellular Mobile Radio with Consideration of System Imperfections", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 12, no. 4, May 1994, pp. 673 - 684.

O ESTADO DE SÃO PAULO, edição de 13 de abril de 1997.

ORSINI, L. Q., "Circuitos Elétricos", vol. I - apostila do curso PEE-311 - Circuitos Elétricos I, Escola Politécnica - Dep. Engenharia de Eletricidade. 2ª Edição, 1986.

PICKHOLTZ, R. L.; SCHILLING, D. L.; MILSTEIN, L. B., "Theory of Spread-Spectrum Communications - A Tutorial", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-30, no. 5, May 1982, pp. 855 - 884.

QUALCOMM, Document Number EX60-10010, "An Overview of the Application of Code Division Multiple Access (CDMA) to Digital Cellular Systems and Personal Cellular Networks", 1992.

RAPPAPORT, T. S.; MILSTEIN, L. B., "Effects of Radio Propagation Path Loss on DS-SS-CDMA Cellular Frequency Reuse Efficiency for the Reverse Channel", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 41, no. 3, Aug. 1992, pp. 231 - 241.

RAPPAPORT, T. S., "Wireless Communications: Principles and Practice", Prentice Hall, 1996.

SARWATE, D. V.; PURSLEY, M. B., "Crosscorrelation Properties of Pseudorandom and Related Sequences", Proceedings of the IEEE, Vol. 68, no. 5, May 1980, pp. 593 - 619.

SIMON, M. K.; OMURA, J. K.; SCHOLTZ, R. A.; LEVITT, B. K., "Spread Spectrum Communications Handbook", McGraw-Hill, 1994.

TIA/EIA/IS-95, "Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System", Telecommunications Industry Association, 1993.

TIA/EIA/IS-97, "Recommended Minimum Performance Standards for Base Stations Supporting Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular Mobile Stations", Telecommunications Industry Association, 1994.

XIA, H. H.; BERTONI, H. L.; MACIEL, L. R.; LINDSAY-STEWART, A.; ROWE, R., "Radio Propagation Characteristics for Line-of Sight-Microcellular and Personal Communications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 41, no. 10, Oct. 1993, pp. 1439 - 1447.

YACOUB, M. D., "Foundations of Mobile Radio Engineering", CRC Press, 1993.

## BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

BRADY, P. T., "A Statistical Analysis of on-off Patterns in 16 Conversations ", Bell System Technical Journal, vol. 47, Jan. 1968, pp. 73 - 91.

BRAUN, H. J.; COSIER, G.; FREEMAN, D.; GILLOIRE, A.; SERENO, D.; SOUTHCOTT, C. B.; VAN DER KROGT, A., "Voice Control of the Pan-European Digital Mobile Radio System", CSELT Tech. Rep., Vol. XVIII, no. 3, Jun 1990, pp. 183 - 187.