

RESUMO

Este trabalho objetiva desenvolver estudos sobre os principais aspectos empregados no planejamento de sistemas móveis celulares, dando ênfase nos padrões já adotados pelo Brasil como o AMPS, o CDMA (*IS-95*) e o TDMA (*IS-54* e *IS-136*). Visa também desenvolver um material didático de conhecimento básico juntamente com um ambiente computacional para análise e planejamento de sistemas móveis celulares. O ambiente computacional proposto deve prover informações quanto ao planejamento de tais sistemas e servir de apoio às disciplinas que tratam de sistemas móveis celulares nos cursos de engenharia elétrica.

Inicialmente será apresentada uma introdução ao conceito celular, onde serão abordadas as principais características dos sistemas celulares. Em seguida, serão abordadas as técnicas de acesso aplicadas nos sistemas celulares e suas implicações no planejamento desses sistemas. Aspectos da rádio-propagação também serão abordados, incluindo as principais características dos tradicionais modelos de predição de perdas. Em seguida, serão abordados os aspectos do balanço de potência em sistemas de rádio-comunicação, destacando-se a determinação dos raios de cobertura dos modelos de predição considerados. Posteriormente, serão abordados os aspectos da engenharia de tráfego assim como os aspectos do planejamento de frequências, envolvendo alocação de canais e os tradicionais padrões de reuso. Na sequência, serão apresentados os principais passos para o planejamento de sistemas móveis celulares, enfatizando-se as diferenças entre o planejamento de sistemas móveis com acesso TDMA e CDMA. Finalizando, o programa computacional desenvolvido, denominado de CELLP, será apresentado e discutido.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 - PLANEJAMENTO DE SISTEMAS MÓVEIS CELULARES

Os Sistemas Móveis Celulares foram umas das redes de telecomunicações que mais cresceram nos últimos anos, e previsões apontam que tais redes assim como as demais tecnologias *wireless* continuarão em crescente evolução. No caso particular do Brasil, as comunicações móveis celulares vem experimentando um rápido desenvolvimento, e após a recente regulamentação da ANATEL para exploração das Bandas C, D e E da telefonia celular, o planejamento desses sistemas vem ganhando uma atenção especial dos engenheiros.

Neste contexto, objetiva-se desenvolver estudos sobre os principais aspectos empregados no planejamento de sistemas móveis celulares, dando ênfase nos padrões já adotados pelo Brasil como o AMPS, o CDMA (IS-95) e o TDMA (IS-54 e IS-136).

1.2 - PROPOSTA DO TRABALHO

Este trabalho tem como proposta desenvolver um material didático de conhecimento básico juntamente com um ambiente computacional para análise e planejamento de sistemas móveis celulares.

O ambiente computacional proposto deve prover informações quanto ao planejamento de tais sistemas e servir de apoio às disciplinas que tratam de sistemas móveis celulares nos cursos de engenharia elétrica.

1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentada uma introdução ao conceito celular, onde são abordadas as principais características dos sistemas celulares, destacando as arquiteturas, as configurações, os padrões de geometria celular, interferências, métodos de expansão do sistema e outras características que são inerentes aos

sistemas móveis celulares e que são de fundamental importância o conhecimento e o controle por parte do engenheiro projetista. Nesse capítulo também é feito um comentário de alguns padrões de sistemas adotados no Brasil e no mundo.

No Capítulo 3 são abordadas as técnicas de acesso aplicadas nos sistemas celulares, destacando-se seus conceitos básicos, suas principais características e suas implicações no planejamento de sistemas móveis celulares.

No Capítulo 4 são abordados alguns aspectos da rádio-propagação, incluindo as principais características dos tradicionais modelos de predição de perdas. Os modelos considerados nesse trabalho são: Espaço-Livre, Okumura-Hata, Okumura-Hata modificado, Walfisch-Bertoni, Walfisch-Ikegami, Maciel-Bertoni-Xia e Ibrahim-Parsons. Nesse capítulo também será dado um enfoque em alguns métodos de análise estatística comparativa que podem ser realizadas para avaliação do desempenho do modelo à uma determinada região em relação à alguma medida de campo (campanha de medições).

No Capítulo 5 são apresentados os aspectos do balanço de potência em sistemas de rádio-comunicação, destacando-se a determinação dos raios de cobertura dos modelos de predição considerados nesse trabalho.

No Capítulo 6 é apresentada uma introdução à teoria de tráfego, apresentando as formulações da engenharia de tráfego telefônico que são comumente utilizadas nos sistemas móveis celulares. Também são apresentadas formas para a determinação e contagem de tráfego em uma determinada região, requisito este que é de fundamental importância para o cálculo do número de canais por célula. Métodos de alocação de canais também são abordados nesse capítulo.

No Capítulo 7 são apresentados aspectos do planejamento de frequências, envolvendo alocação de canais e os tradicionais padrões de reuso de frequências.

No Capítulo 8 os principais passos para o planejamento de sistemas móveis celulares são discutidos, enfatizando as diferenças entre o planejamento de sistemas móveis com acesso TDMA e CDMA.

No Capítulo 9 será apresentado o ambiente computacional educacional CELLP, formado por diversos subprogramas que foram desenvolvidos para auxiliarem no processo do planejamento de sistemas celulares.

Finalizando no Capítulo 10, são estabelecidas as conclusões do trabalho, onde é avaliada a contribuição do mesmo para o fim a que foi proposto, sendo também dadas sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

O CONCEITO CELULAR

2.1 - INTRODUÇÃO

Os primeiros sistemas celulares a operarem tinham como principais características a transmissão da voz por modulação analógica FM e modulação digital FSK para sinalização. A técnica de acesso ao meio era puramente pela multiplexação por divisão de frequência (FDM), mais conhecida por FDMA. Dentre estes sistemas destacam-se o AMPS, RTMS, NMT, C-450, Radiocom 2000, NMT-450, NMT-900 e TACS. Todos estes sistemas eram muito parecidos em sua essência.

A segunda geração de sistemas móvel celular surgiu das técnicas digitais para codificação da voz e compressão. Estas técnicas permitiram a combinação da multiplexação por divisão de tempo (TDM) com o FDM, surgindo o sistema TDMA. Esta geração oferece alto desempenho, com capacidade superior em mais de três vezes aos primeiros sistemas celulares. Posteriormente, foi desenvolvida uma nova técnica de acesso ao meio baseada na codificação de cada canal de voz a taxas elevadas por códigos específicos que geram sinais com baixa correlação, surgindo o então o CDMA. Esta técnica foi herdada das forças armadas onde o sinal a ser transmitido é espalhado em uma faixa de espectro bastante larga (espalhamento espectral), oferecendo entre diversas vantagens a difícil interceptação dos sinais de transmissão e o melhor aproveitamento do espectro disponível.

A Europa procurou convergir em suas pesquisas para o padrão GSM (*Global System Mobile*). Este sistema de arquitetura aberta permite a adoção de equipamentos de diferentes fabricantes, reduzindo os custos de implementação do sistema. Esse é o padrão mais difundido no mundo.

O Brasil iniciou seu sistema de telefonia móvel pelo padrão analógico, seguindo rigorosamente o padrão americano AMPS. Posteriormente, para seu sistema digital de segunda geração, foram adotados também os padrões americanos *IS-54* (TDMA), *IS-136* (TDMA) e *IS-95* (CDMA).

Para a terceira geração dos sistemas móveis celulares (chamada de 3G – *Third Generation*), existem várias tecnologias concorrentes previstas para operarem nas faixas de frequências de 1,8 e 1,9 GHz. Porém, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) regulamentou que as Banda C, D e E da telefonia móvel brasileira serão exploradas por operadoras que seguem o padrão europeu DCS 1800 (padrão GSM em 1,8 GHz).

2.2 - O CONCEITO CELULAR

Os primeiros sistemas rádio móveis terrestres eram compostos basicamente, de um único transmissor com alta potência e com a antena situada em um local alto da cidade para garantir uma grande área de cobertura contendo todo o espectro de frequências, como ilustrado na Figura 2.1. Como o número de canais disponíveis já era limitado pelo espectro de frequências alocado para o serviço, os sistemas operavam com elevados graus de bloqueio, e a lista de candidatos pleiteando um terminal era maior do que a de usuários habilitados ao sistema. Esta situação só foi resolvida mais tarde com a introdução do conceito de células, que deram o nome à telefonia celular [1].

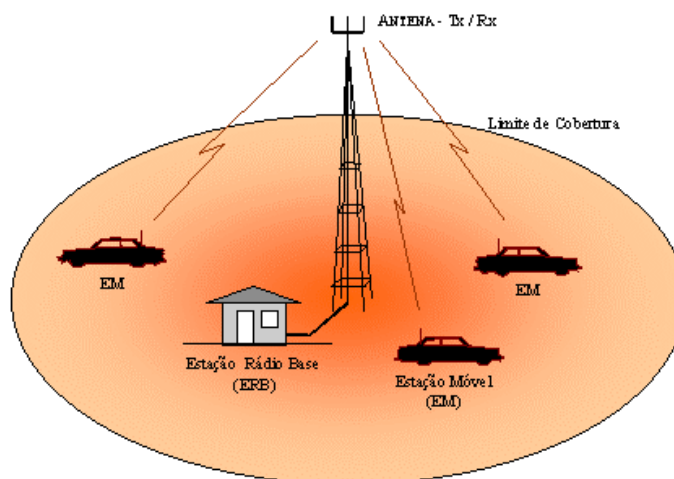


Figura 2.1 – Sistema Móvel Convencional

O grande problema dos primeiros sistemas (conhecidos hoje como sistemas convencionais) era tentar cobrir com um só transmissor uma grande região (uma cidade inteira por exemplo) com um número limitado de canais (devido a restrição regulamentar de uso de espectro de frequências). No sistema celular esta grande

região passa a ser dividida em áreas menores, chamadas de *clusters*, que por sua vez são subdivididas em unidades menores ainda, as células, como indica a Figura 2.2.

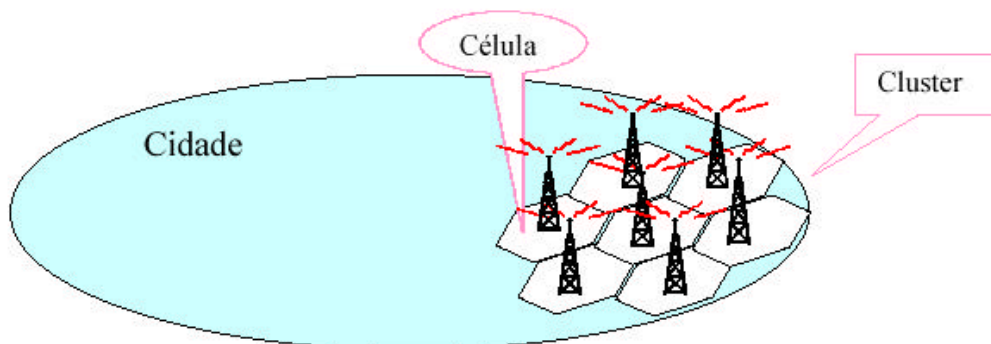


Figura 2.2 – Os Conceitos de Células e Clusters

Dentro do *cluster* todo o espectro disponível pode ser utilizado, sendo os canais disponíveis divididos entre as células de tal maneira que um determinado canal só estará presente em uma única célula do *cluster*.

O tamanho do *cluster* pode ser dimensionado para que o número de canais disponíveis seja suficiente ao atendimento aos usuários locais com o grau de serviço desejado. Como um só *cluster* não cobre toda a cidade sem recair no problema original, é necessário atentar para um novo fator, a distância de reuso. Colocando um *cluster* ao lado do outro, como mostra a Figura 2.3, verifica-se que existe um espaçamento mínimo entre células que usam o mesmo conjunto de canais (mesmas frequências) que limita a interferência entre estes a níveis aceitáveis, viabilizando assim o reuso de frequências entre *cluster* adjacentes.

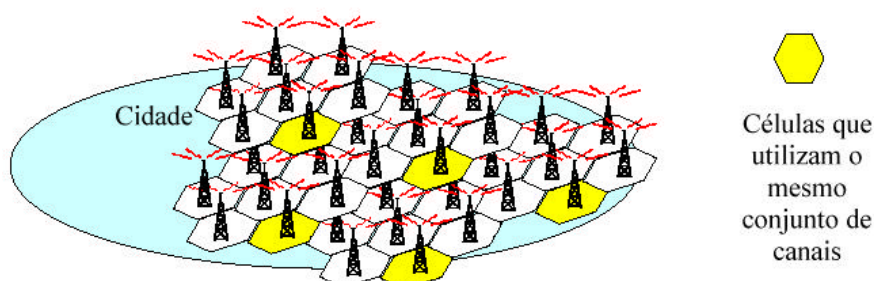


Figura 2.3 – Conceito de Reuso de Frequência

Para cobrir toda a cidade basta então repetir o *cluster* de células quantas vezes for necessário, formando um sistema celular. Utilizando-se então um sistema celular com reuso de frequência pode-se ter cobertura teoricamente ilimitada. A Figura 2.4 mostra o conceito de reuso em relação aos sistemas convencionais.

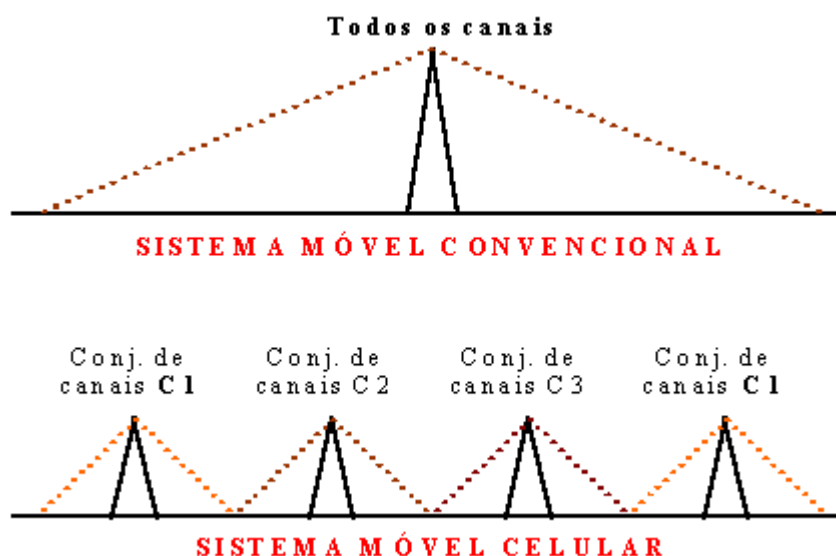


Figura 2.4 - Conceito de Reuso em Relação ao Sistema Convencional

A tabela 2.1 mostra as principais características dos sistemas móveis terrestres.

Tabela 2.1 - Comparação entre os Sistemas Móveis

Sistemas Móveis Convencionais	Sistemas Celulares
Baixa densidade de usuários	Alta densidade de usuários
Não reutilizam frequências	Utilizam reuso de frequências
Alta potência de transmissão	Baixa potência de transmissão
Antenas elevadas	Antenas pouco elevadas
Grande área de cobertura	Área de cobertura dividida em pequenas células
Sem expansão modular	Expansão modular ilimitada (teoricamente)

2.3 - COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA MÓVEL CELULAR

O sistema celular é basicamente composto de 3 elementos principais:

- Estação ou terminal móvel – EM (em inglês *Mobile Station – MS*)
- Estação rádio base – ERB (em inglês *Base Station – BS*)
- Central de comutação e controle – CCC (*Mobile Switching Center – MSC*)

A Figura 2.5 ilustra os componentes básicos de um sistema móvel celular mostrando ainda os conceitos de *handoff*, que permite a continuidade da chamada em andamento quando se atravessa a fronteira entre células, e de *roaming*, que permite o acesso ao sistema em outra área de serviço que não àquela em que o assinante mantém seu registro.

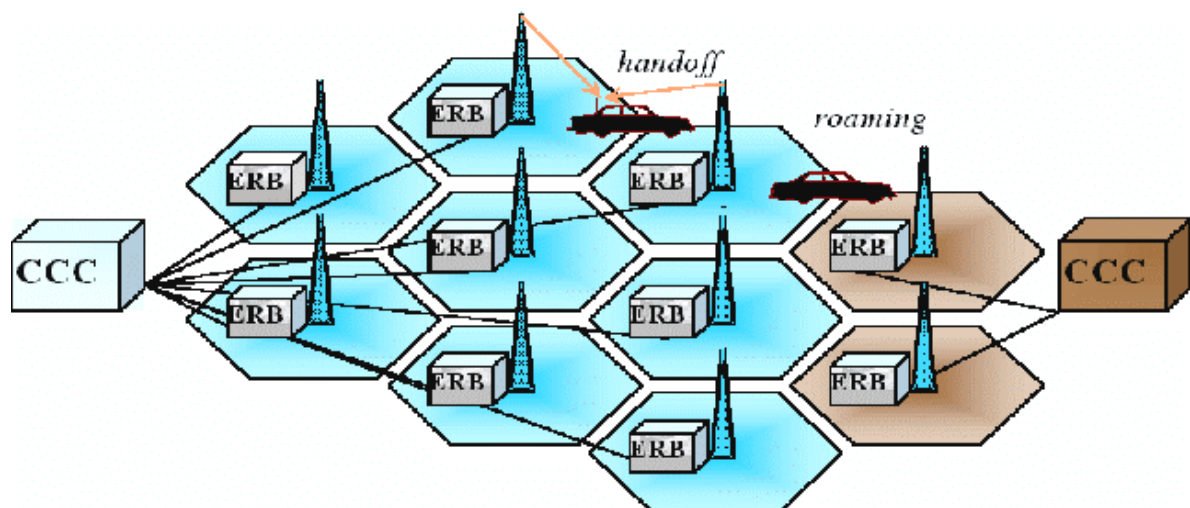


Figura 2.5 – Componentes de um Sistema Celular.

2.3.1 - Estação Móvel (EM)

A estação móvel consiste de um transceptor, que é responsável pela interface entre o usuário e a estação rádio base, convertendo sinais em banda base em sinais de radio frequência (RF) ou vice versa. Além de prover a comunicação de voz ou dados, a EM também realiza funções de controle e sinalização. Ela pode ser classificada de acordo com o tamanho (e potência) em 3 tipos:

Tabela 2.2 - Classes de Estações Móveis

Classe	Potência Máxima Nominal	Tipo
I	3 W	veicular
II	1,2 W	transportável
III	0,6 W	portátil

Embora o sistema tenha sido originalmente desenvolvido para terminais móveis em viaturas (veiculares), atualmente mais de 98 % dos usuários se utilizam terminais portáteis.

2.3.2 - Estação Rádio Base (ERB)

A estação rádio base estabelece o enlace radio elétrico com o terminal móvel dentro da área de cobertura de uma célula. Ela é conectada por um enlace fixo (rádio ou fibra óptica) a CCC.

2.3.3 - Central de Comutação e Controle (CCC)

A central de comutação e controle é a responsável pela coordenação das atividades relacionadas ao estado das chamadas e do sistema. É ela quem controla e interliga várias ERBs, supervisiona e administra o sistema, monitora e controla as chamadas, prove interface entre a Rede Telefônica Pública Comutada - RTPC (ou em inglês *Public Switched Telephone Network - PSTN*) e o sistema celular, comanda e controla o *handoff*.

Todas estas funções são possíveis graças a uma base de dados do sistema, contendo todas as informações necessárias para o funcionamento de forma adequada de todo o Sistema de Telefonia Móvel Celular.

2.4 - ARQUITETURA DO SISTEMA

Um sistema móvel celular pode ser construído com uma arquitetura centralizada ou descentralizada [2]. Na arquitetura centralizada uma única CCC

controla as ERBs (Figura 2.6a). Em uma arquitetura descentralizada o controle é obtido por um conjunto de CCCs que se comunicam entre si (Figura 2.6b).

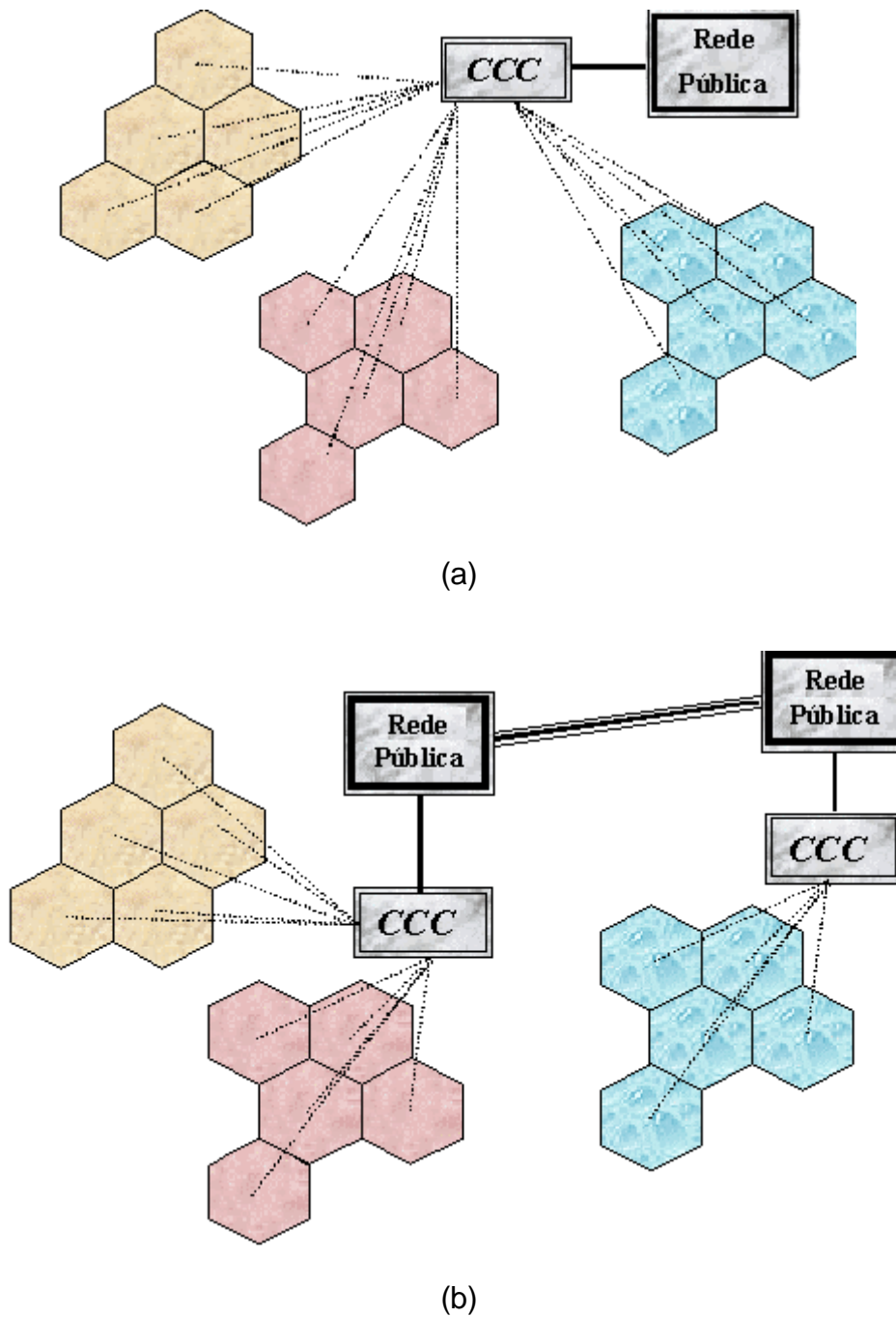


Figura 2.6 – Arquitetura de Sistemas Celulares: (a) Centralizada; (b) Descentralizada

2.5 - GEOMETRIA CELULAR

Idealmente, assumindo que as condições de propagação não mudem ao longo do azimute, a área de cobertura de uma estação rádio base (ERB) é um círculo (cobertura omnidirecional). Entretanto, para um conjunto de células, os círculos não representam a área de cobertura, a não ser que as ERBs sejam dispostas de forma a gerar uma área de cobertura como mostrada na Figura 2.7a, o que provocaria áreas sem cobertura. Para o caso em que há superposição de cobertura de diferentes ERBs (Figura 7b), e considerando as mesmas condições de propagação sobre a área das células, e na ausência de bloqueios naturais ou artificiais ao sinal, o melhor servidor será o que prover menor distância ao terminal móvel, e a fronteira entre áreas de cobertura é o lugar geométrico eqüidistante das estações rádio base (Figura 2.7c).

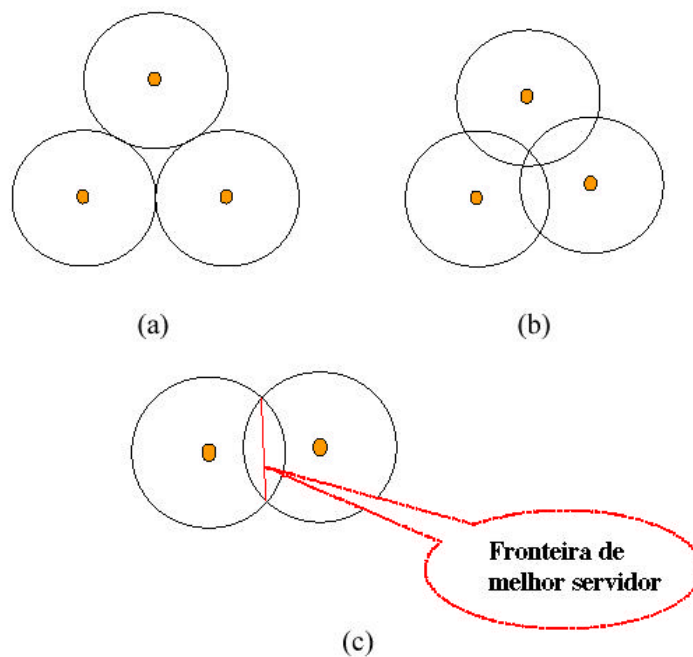


Figura 2.7 – Cobertura em Sistemas de Múltiplas Células.

Assim, num sistema de múltiplas células a cobertura do melhor servidor em cada ponto corresponde a um polígono. Dependendo da simetria escolhida na disposição das ERBs, as células são representadas por padrões regulares de polígonos como por exemplo hexágonos, quadrados ou triângulos (Figura 2.8).

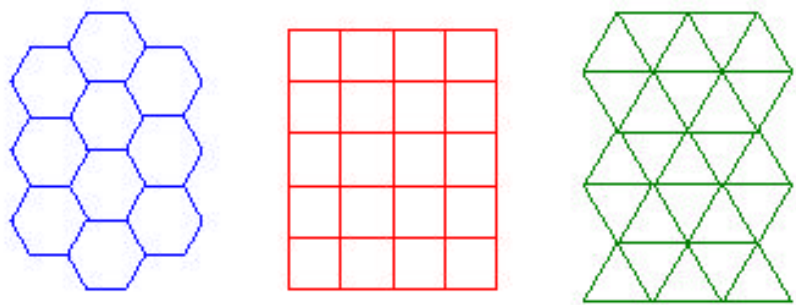


Figura 2.8 – Geometria de Padrões Regulares.

Para a determinação da distância de reuso e o cálculo da interferência em sistemas de múltiplas células, utiliza-se a geometria de padrões regulares, tomando como distância unitária o raio do círculo circunscrito ao polígono considerado. Devido o padrão hexagonal ser o mais utilizado na prática por motivos que serão discutidos nos próximos itens, apenas este padrão será abordado neste trabalho.

2.6 - PADRÃO REGULAR HEXAGONAL

Numa geometria hexagonal, o sistema de coordenadas mais conveniente possui uma inclinação de 60° entre os eixos (Figura 2.9). Considerando este sistema de coordenadas e R o raio maior de um hexágono, pode-se determinar a posição de uma célula por um conjunto de coordenadas (u_n, v_n) . Então, por simetria, verifica-se que a distância D entre duas có-células nas posições (u_1, v_1) e (u_2, v_2) é expressa por

$$D = \sqrt{i^2 + i \cdot j + j^2} \sqrt{3} R^2 \quad (2.1)$$

onde $i = u_1 - u_2$, $j = v_1 - v_2$ e i, j são números inteiros.

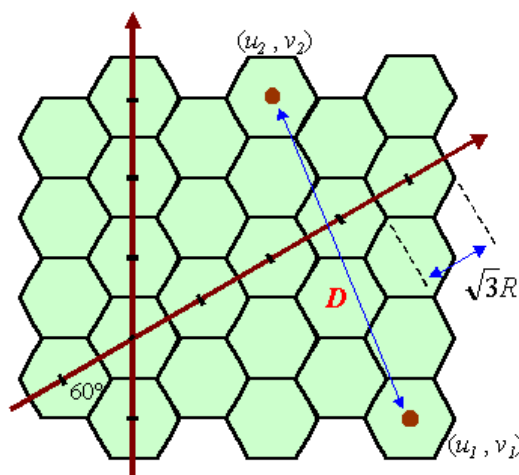


Figura 2.9 - Sistema de Coordenadas do Padrão Hexagonal.

Esta geometria enfatiza a simetria rotacional do sistema, usando a noção de “anéis” hexagonais de células, em volta de uma célula central. A Figura 2.10 exemplifica esta noção mostrando os dois primeiros anéis entorno da célula central.

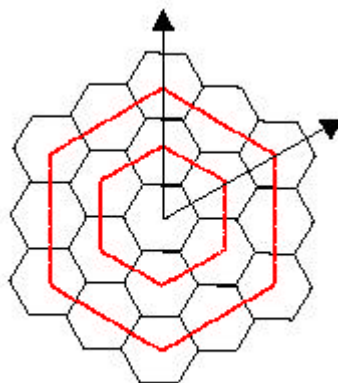


Figura 2.10 - Padrão Regular Hexagonal com Simetria Rotacional

2.7 - CARACTERÍSTICAS DAS CONFIGURAÇÕES CELULARES HEXAGONAIS

Normalmente a geometria utilizada é a hexagonal com simetria rotacional, pois este padrão assegura uniformidade nos níveis de interferência entre células utilizando o mesmo conjunto de canais em *clusters* distintos porque representa a área de cobertura considerando o melhor servidor (*best-server*). A cobertura de um *cluster* básico de 7 células com este tipo é ilustrada na Figura 2.11. Essa configuração básica, embora seja a mais óbvia, não é a única possível, como será mostrado a seguir.

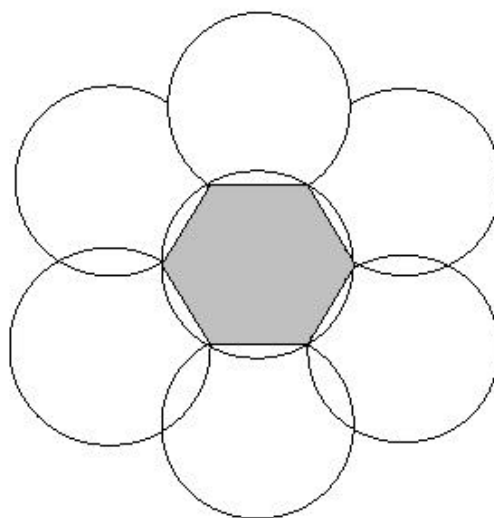


Figura 2.11 – Cobertura de um Grupo Hexagonal de 7 Células.

2.7.1 - Número de Células por *Cluster*

Considerando um *cluster* de formato hexagonal, pode-se determinar o número N de células hexagonais que o compõem. Sendo a a área da célula e A a área do cluster, tem-se:

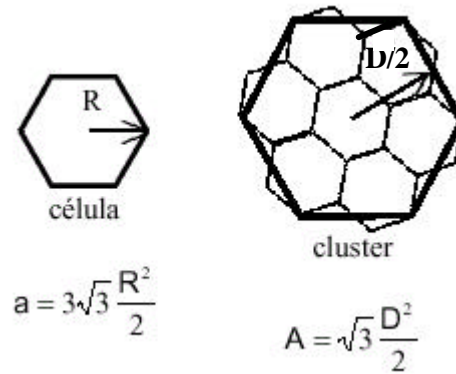


Figura 2.12 – Áreas de uma Célula e de um Cluster

O número de células por *cluster* é diretamente obtido por:

$$N = A / a = \frac{D^2}{3R^2} \quad (2.2)$$

onde :

N = número de células por *cluster*

A = área do *cluster*

a = área da célula

R = raio da célula

D = distância entre dois *clusters* (centro a centro)

Como a distância entre células hexagonais é dada pela Eq.(2.1) tem-se que:

$$N = i^2 + i.j + j^2 \quad (2.3)$$

Como i e j são números inteiros, o *cluster* só irá acomodar apenas um determinado número de células, como por exemplo, **1** ($i=0$ $j=1$ ou $i=1$ $j=0$), **3** ($i=1$ $j=1$), **4** ($i=0$ $j=2$ ou $i=2$ $j=0$), **7** ($i=1$ $j=2$ ou $i=2$ $j=1$), **9** ($i=0$ $j=3$ ou $i=3$ $j=0$), **12** ($i=j=2$),

Padrões de 7 e 12 células por *cluster* são as configurações mais comuns de sistemas celulares. A Figura 2.13 mostra estes padrões e a forma hexagonal hipotética dos correspondentes *clusters*.

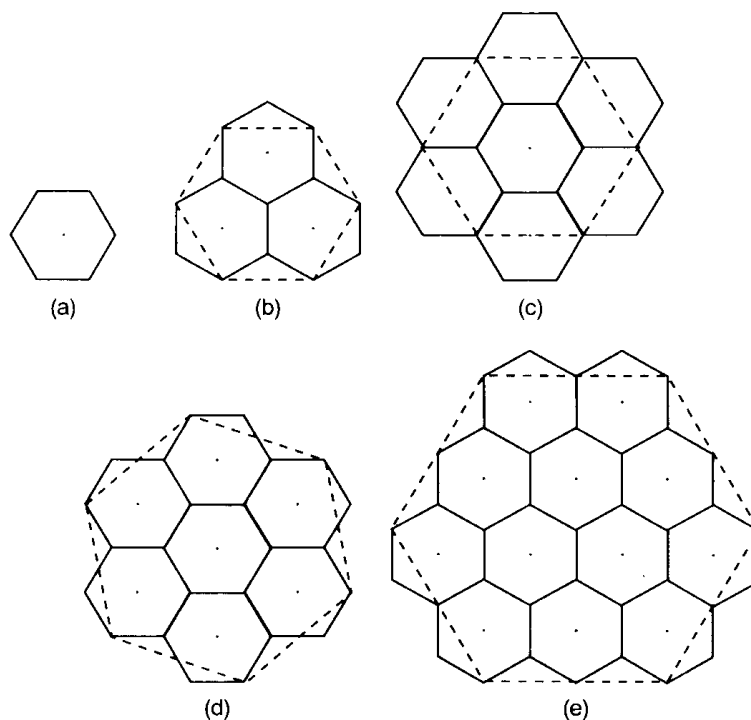


Figura 2.13 - Configurações Celulares Hexagonais: (a) 1 célula por cluster, (b) 3 células por cluster, (c) 4 células por cluster, (d) 7 células por cluster, (e) 12 células por cluster

2.7.2 - Razão de reuso

Um importante parâmetro de uma configuração celular é a relação D/R , que é conhecida como razão de reuso co-canal q e pode ser expressa por:

$$q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (2.4)$$

A razão de reuso co-canal é um parâmetro fundamental no planejamento de sistemas celulares, pois determina a interferência co-canal (interferência entre células que se utilizam do mesmo conjunto de canais) e ao mesmo tempo limita a capacidade de tráfego do sistema. Aumentando-se a razão de reuso, a interferência co-canal se reduz, como será visto a seguir. Entretanto, se o número de células por

cluster aumenta, o número de canais por célula diminui (considerando constante o número total de canais) e, conseqüentemente, diminui também a capacidade de tráfego do sistema.

A escolha da razão de reuso co-canal é, portanto, um compromisso entre a capacidade de tráfego e a qualidade do sistema (quanto menor a interferência co-canal, maior a qualidade do sistema). A tabela 2.3 mostra em valores numéricos este compromisso entre razão de reuso, capacidade de tráfego e qualidade de transmissão.

Tabela 2.3 - Razão de Reuso, Capacidade de Tráfego e Qualidade de Transmissão

Células / Cluster	$D/R = q$	Capacidade de tráfego	Qualidade de transmissão
1	1,73	<div style="text-align: center;"> Maior ↑ Menor </div>	<div style="text-align: center;"> Pior ↓ Melhor </div>
3	3,00		
4	3,46		
7	4,58		
12	6,00		

A separação de células co-canais para diversos padrões de *clusters* é mostrado na Figura 2.14

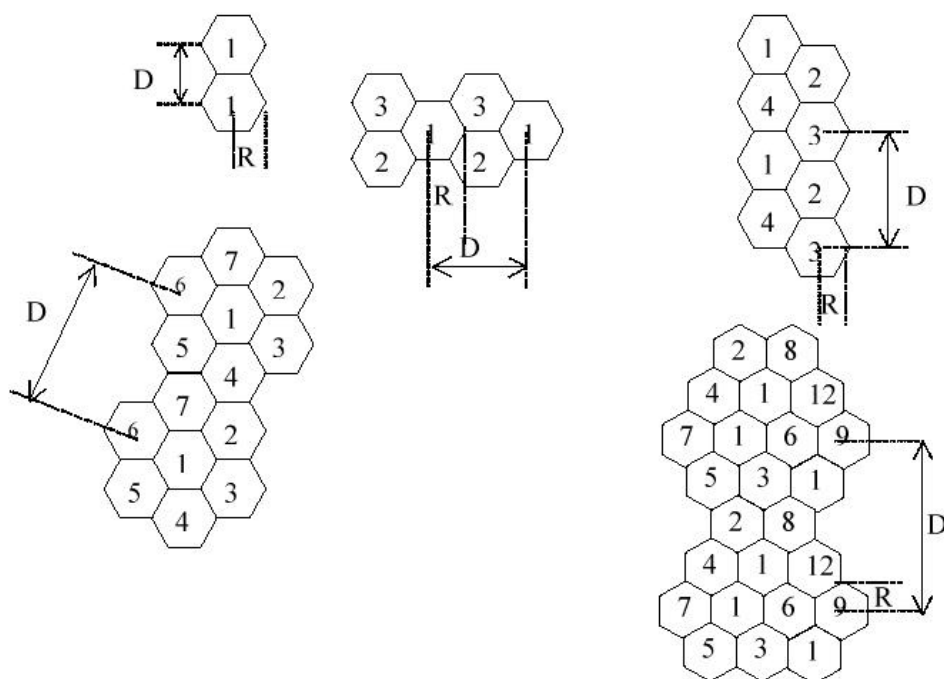


Figura 2.14 - Separação de Células co-canais para diversos Padrões de Reuso.

2.7.3 - Interferência co-canal

Quando se utiliza uma configuração celular com simetria hexagonal, a interferência causada pelo reuso de frequências em *cluster* adjacentes pode ser calculada considerando 6 células interferentes a uma distância D , 12 células interferentes a uma distância $2D$ e assim sucessivamente.

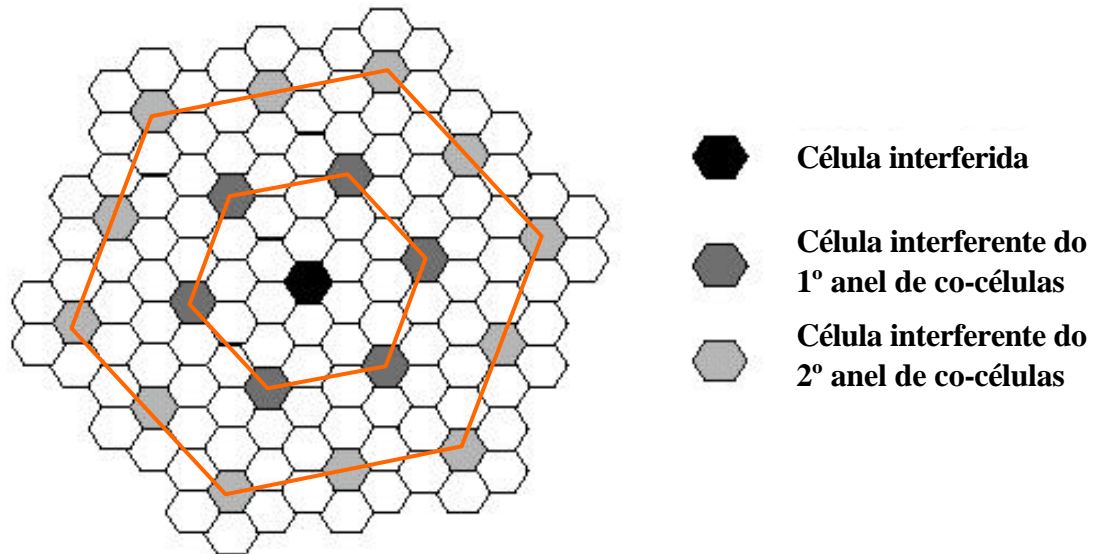


Figura 2.15 - Interferência em Configurações Celulares Hexagonais

Considerando uma lei de potência para a perda de propagação com a distância, a relação entre o sinal desejado e a interferência co-canal (S/I - Sinal-Interferência ou C/I - *Carrier-to-Interference* em inglês) é dada por [1]:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{k_1=1}^6 I_{k_1} + \sum_{k_2=1}^{12} I_{k_2} + \sum_{k_3=1}^{18} I_{k_3} + \dots} \quad (2.5)$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 1º anel 2º anel 3º anel

onde:

$S = C \cdot d^{-g} \Rightarrow$ intensidade do sinal desejado transmitido a uma distância do transmissor,

$I_{k_n} = C \cdot D_{k_n}^{-g} \Rightarrow$ intensidade do sinal interferente devido a uma célula no n -ésimo anel, a uma distância D_{k_n} do transmissor;

g = fator de variação da perda de propagação com a distância, com valor entre 2 (espaço-livre) e 5 (ambiente urbano denso);

C = parâmetro cujo valor depende das características do sistema de transmissão e de fatores de perda de propagação que não a distância;

Considerando um móvel na fronteira da célula (pior caso), tem-se $d \cong R$ e $D_{kn} \cong nD$.

Consequentemente,

$$\frac{S}{I} = \frac{C.d^{-g}}{6.C.D^{-g} + 12.C.(2D)^{-g} + 18.C.(3D)^{-g} + \dots} \quad (2.6a)$$

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6.\left(\frac{D}{R}\right)^{-g} \cdot (1 + 2^{-g} \cdot 2 + 3^{-g} \cdot 3 + \dots)} \quad (2.6b)$$

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6.\left(\frac{D}{R}\right)^{-g} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k^{1-g}} \quad (2.6c)$$

Como o sinal interferente cai proporcionalmente com a distância do transmissor interferente elevada à potência g , as células que mais causam interferência são as mais próximas. Uma aproximação usual consiste em considerar apenas o 1º anel interferente. Nesse caso tem-se:

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{6.\left(\frac{D}{R}\right)^{-g}} = \frac{q^g}{6} \quad (2.7)$$

A Figura 2.16 exemplifica este caso, destacando as distâncias aos transmissores interferentes e ao do desejado.

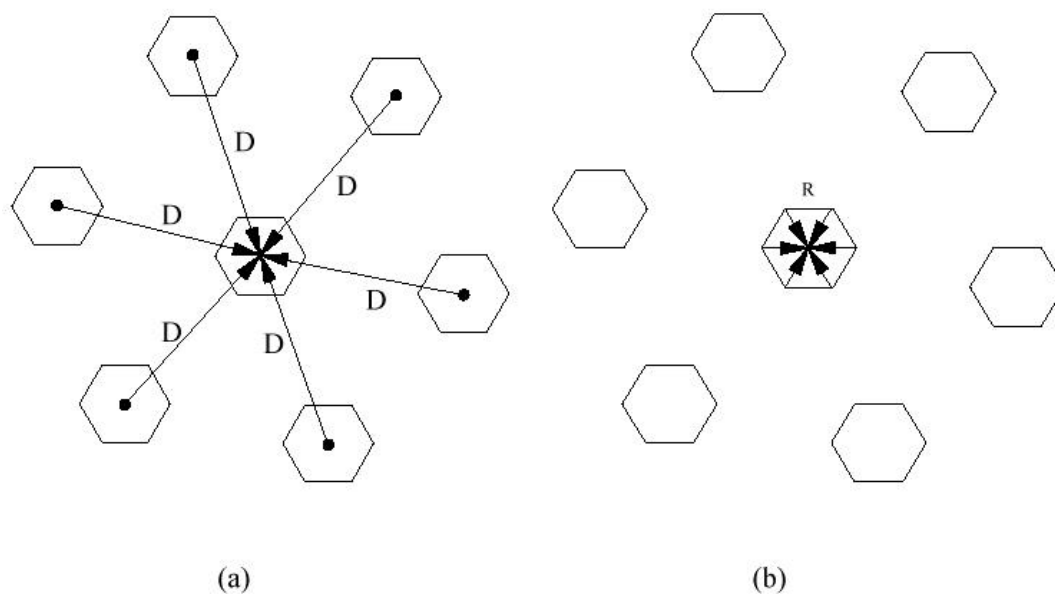


Figura 2.16 – (a) Distância ao Transmissor Interferente; (b) Distância ao Transmissor Desejado

No entanto esta aproximação pode apresentar um erro razoavelmente significativo dependendo do valor de g . Para estimar este erro pode-se considerar o efeito do segundo anel interferente:

$$\frac{S}{I}_{1^\circ \text{ e } 2^\circ \text{ aneis interferentes}} = \frac{1}{6 \cdot \left(\frac{D}{R}\right)^{-g}} \cdot \frac{1}{(1 + 2^{1-g})} \quad (2.8a)$$

$$\frac{S}{I}_{1^\circ \text{ e } 2^\circ \text{ aneis interferentes}} = \frac{S}{I}_{1^\circ \text{ anel interferente}} \cdot \frac{1}{(1 + 2^{1-g})} \quad (2.8b)$$

Assim a degradação causada pelas células do 2º anel varia de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 2.4 - Influência do Segundo Anel Interferente

g	Interferência adicional devida ao 2º anel: $10 \cdot \log(1 + 2^{1-g})$
2	1,74 dB
3	0,97 dB
4	0,51 dB
5	0,26 dB

Da equação (2.6c) observa-se que, para um número fixo de anéis e um mesmo valor de γ , quanto maior é o fator de reuso co-canal, ou seja, maior o valor de N , maior é a relação S/I . Entretanto, um aumento no fator de reuso co-canal (aumento no valor de N) implica num menor número de canais por célula disponíveis para atender o tráfego, acarretando uma redução na capacidade do sistema. Tem-se por tanto, um forte compromisso entre a capacidade, assunto a ser tratado mas adiante, e a interferência.

A Tabela 2.5 apresenta os números de canais por célula n para o sistema celular analógico norte-americano AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), e a relação S/I , calculada pela Eq. (2.7), para os planos de reuso $N = 4, 7, 9, 12$ e 19 .

Tabela 2.5 - Influência co-canal e número de canais por célula para diferentes planos de reuso ($g = 4$, $n = M/N$, com $M = n^\circ$ total de canais = 395, sem setorização)

	$N = 4$	$N = 7$	$N = 9$	$N = 12$	$N = 19$
S/I (dB)	13,8	18,7	20,8	23,3	27,3
n	98	56	43	32	20

2.7.4 - Setorização

Esta técnica consiste em dividir a célula em setores, cada um servido por um conjunto diferente de canais e iluminado por uma antena direcional. Na prática são utilizadas divisões em 3 ou 6 setores.

O grande benefício da setorização é reduzir a interferência. Em sistemas FDMA e TDMA a setorização provoca também uma redução na capacidade de tráfego do *cluster*. Já em sistemas CDMA a redução da interferência se reflete diretamente num aumento (substancial) da capacidade de tráfego. A setorização obriga que se execute um *handoff* quando o móvel passa de um setor para outro da mesma célula, denominado *handoff* intra-celular.

A Figura 2.17 mostra um célula com 3 setores

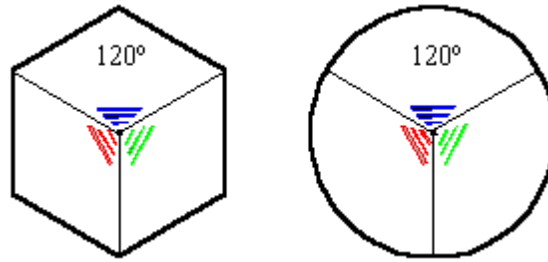


Figura 2.17 – Setorização Celular

2.7.4.1 - Cálculo da Redução da Interferência com Setorização Tripla

Na setorização tripla, a interferência no móvel devido às células adjacentes (considerando as ERBs do 1º anel interferente) e a interferência na ERB devida aos móveis das células adjacentes fica restrita a um dos setores de somente duas células. Então, a relação sinal interferência (S/I) nesse caso pode ser dada por:

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{\sum_{k=1}^2 \left(\frac{D}{R} \right)^{-g}} = \frac{1}{2 \cdot q^{-g}} \quad (2.9)$$

Pode-se então definir ganho de setorização como:

$$G = \frac{S / I_{\text{célula setorizada}}}{S / I_{\text{célula sem setorização}}} \quad (2.10)$$

Nesse caso, o ganho de setorização é:

$$G = \frac{1 / 2 \left(\frac{D}{R} \right)^{-g}}{1 / 6 \left(\frac{D}{R} \right)^{-g}} = 3 \quad (2.11a)$$

e em dB:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(G) = 4,78 \text{ dB} \quad (2.11b)$$

2.7.4.2 - Cálculo da Redução da Interferência com 6 Setores por Célula:

Na setorização sextupla, a interferência no móvel devido às células adjacentes (considerando as ERBs do 1º anel interferente) e a interferência na ERB devida aos móveis das células adjacentes fica restrita a um dos setores de somente uma célula. Então, a relação sinal interferência (S/I) nesse caso pode ser expressa por:

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{\sum_{k=1}^1 \left(\frac{D}{R} \right)^{-g}} = \frac{1}{q^{-g}} \quad (2.12)$$

Nesse caso, o ganho de setorização é dado por:

$$G = \frac{1 / \left(\frac{D}{R} \right)^{-g}}{1 / 6 \left(\frac{D}{R} \right)^{-g}} = 6 \quad (2.13a)$$

e em dB:

$$G(dB) = 10 \cdot \log(G) = 7,78 \text{ dB} \quad (2.13b)$$

2.7.5 - Interferência de Canal Adjacente

O problema causado pela interferência de canal adjacente é significativo se um usuário de uma célula opera num canal adjacente ao canal utilizado por outra célula próxima. A interferência de canal adjacente é dada por [3]:

$$ICA = -10 \log \left[\left(\frac{d_I}{d_C} \right)^g \right] - IC \quad (2.14)$$

onde:

d_I = Distância entre a ERB que contém o canal adjacente interferente e o móvel.

d_C = Distância entre a ERB que possui o canal desejado e o móvel.

IC = Isolamento de canal adjacente, dependente da filtragem (valor típico 26 dB)

O pior caso de interferência de canal adjacente acontece quando o móvel está próximo à fronteira entre duas células que operam em planos de frequência que utilizam canais adjacentes. Nesse caso as distâncias d_i e d_c são aproximadamente iguais e $ICA \cong -IC$.

A Figura 2.18a mostra a versão otimizada do plano de reuso de frequência $N = 7$ do ponto de vista da interferência de canal adjacente, que só é significativo entre duas duplas de células: 1-2 e 1-7. No caso não otimizado da Figura 2.18b, têm-se 7 duplas de células com interferência de canal adjacente. Estas duplas são: 1-2, 1-7, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 e 6-7. O reuso de frequência produz um aumento das duplas de células com interferência de canal adjacente, como ilustra a Figura 2.18c.

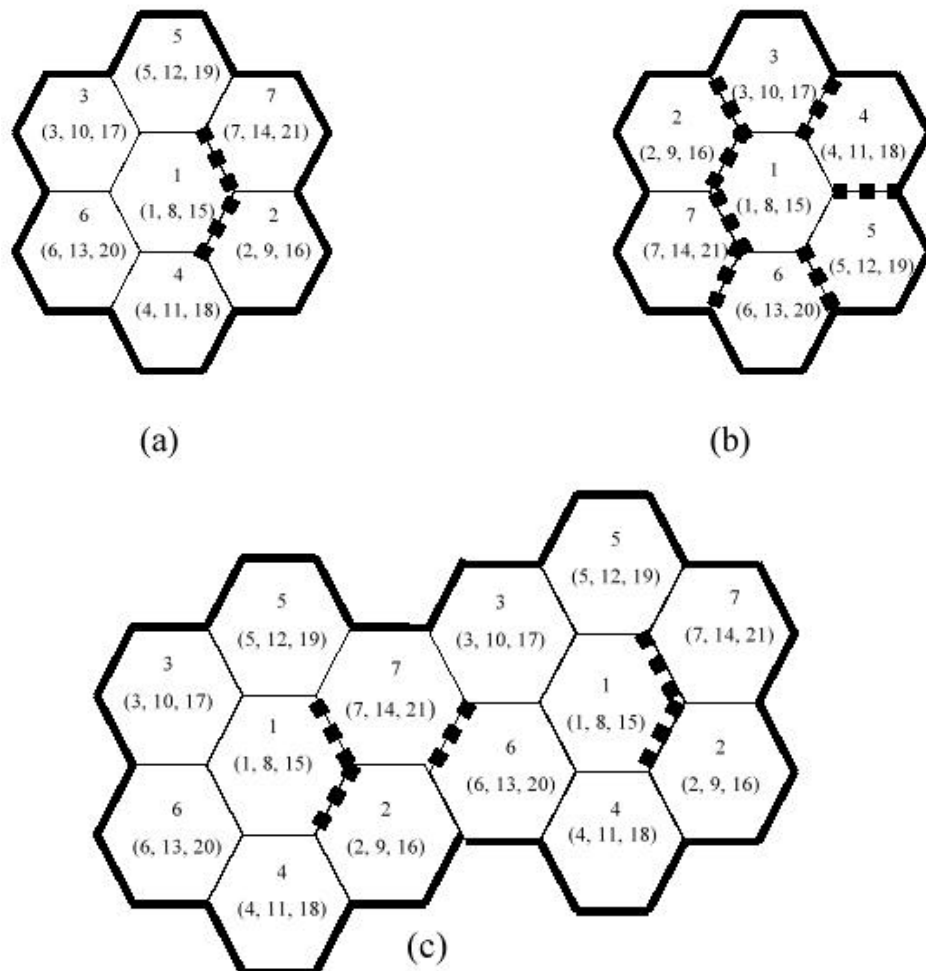


Figura 2.18 – Influência de Canal Adjacente devido ao Reuso de Frequência

2.7.6 - Processo de Divisão Celular

Para se atender o aumento de demanda de tráfego numa região específica pode-se diminuir o tamanho das células, aumentando o número de células e a capacidade de tráfego naquela região. Esta técnica, conhecida como divisão celular (“*cell splitting*”) é ilustrada na Figura 2.19.

Deve-se observar que uma redução do raio da célula por um fator k reduz a área por um fator k^2 , obrigando um aumento do número de estações radio base também por um fator k^2 . Com o crescimento do número de células haverá também o crescimento do número de *handoffs*.

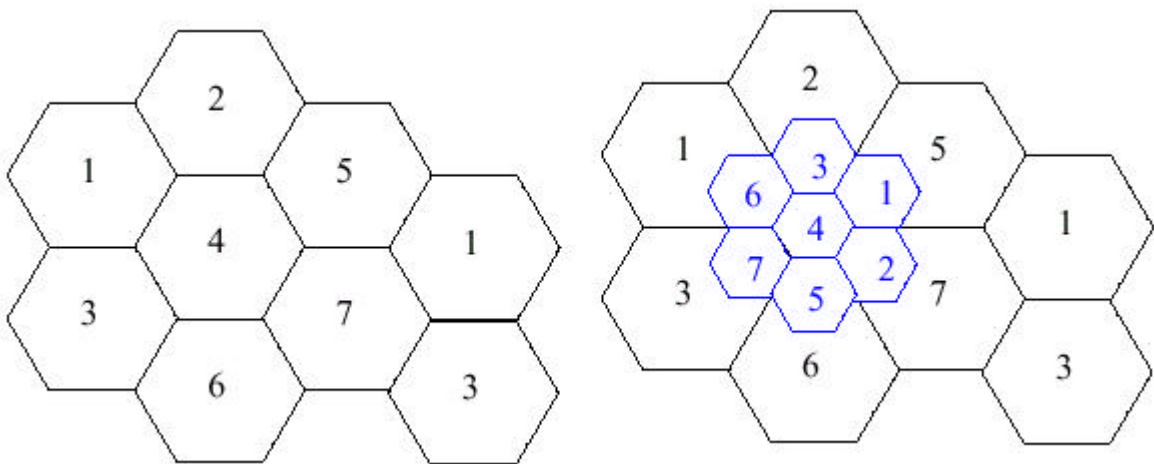


Figura 2.19 – Divisão Celular.

Quando se utiliza o processo de divisão celular, passa-se a ter células com diferentes tamanhos coexistindo na mesma região, alterando a distância entre células que se utilizam dos mesmos canais e, conseqüentemente, a interferência co-canal. Considerando, como exemplo, um sistema com padrão de reuso de 7 células por *cluster* e $r = R/2$, onde R é o raio da célula grande e r o da pequena, a razão D/R permanece constante ($D/R = \sqrt{3 \cdot 7} = 4,6$) entre células grandes e entre células pequenas. No entanto, a razão D/R entre células grandes e pequenas que compartilham os mesmos canais é de $2,3 \cdot R = 4,6 \cdot r$ (Figura 2.20). Este valor satisfaz os requisitos da relação D/R apenas para células pequenas. Assim, apesar das células grandes não sofrerem interferência co-canal superior à normal das células pequenas, a recíproca não é verdadeira.

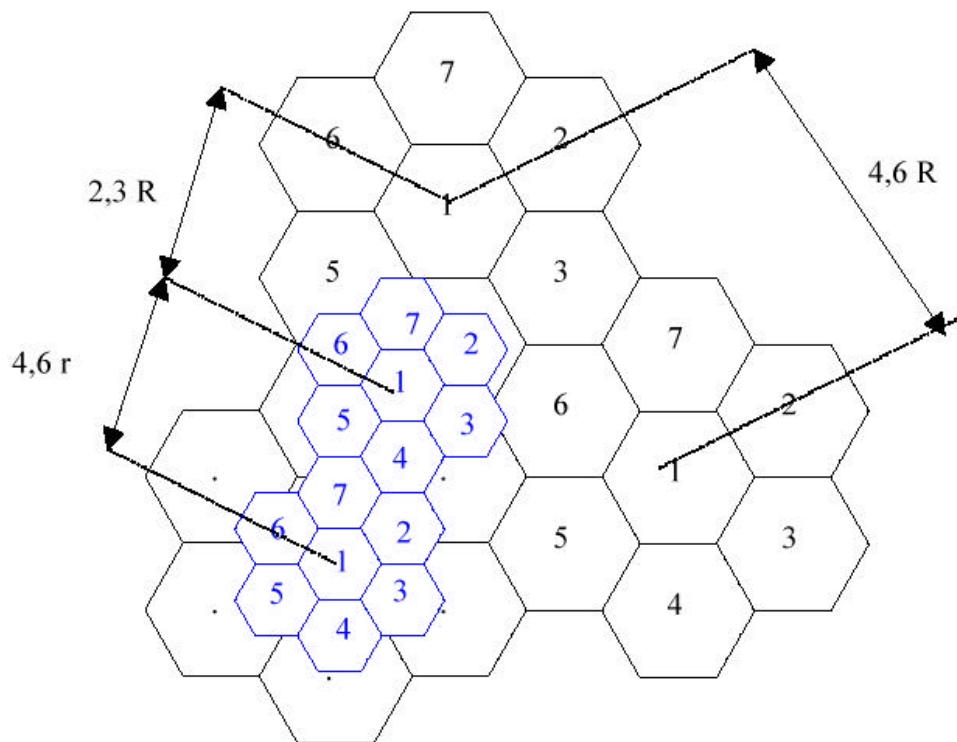


Figura 2.20 – Razão de Reuso com Divisão Celular.

Uma possível solução para este problema é visualizar as células grandes como se elas fossem compostas por duas camadas (Figura 2.21). A área de cobertura da célula permanece a mesma, mas a camada interna e a externa operam com conjuntos de canais distintos. A principal restrição é que a camada externa não pode usar qualquer canal que esteja sendo utilizado nas células pequenas. Supondo que a célula grande use o conjunto de canais **C** dividido em 2 subconjuntos **A** e **B** e a co-célula pequena use o subconjunto **A**, a camada externa pode somente ser servida pelo subconjunto **B**. Pode ser necessário realizar um *handoff* na transição entre a camada externa e interna. Quando o *handoff* é da camada interna para a externa denomina-se *handout* e da externa para a interna *handin*.

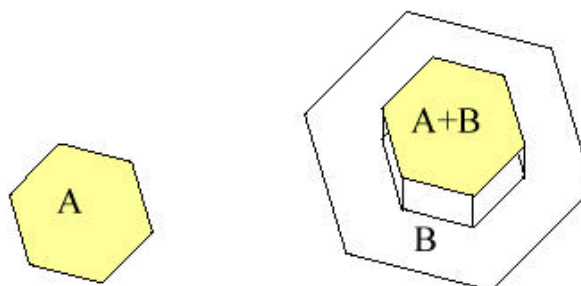


Figura 2.21 – Células com duas Camadas.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE ACESSO

3.1 - INTRODUÇÃO

O compartilhamento de recursos é uma forma muito eficiente de se obter alta capacidade em uma rede de comunicações. No que diz respeito às comunicações móveis, os recursos são os canais disponíveis ou, de forma mais ampla, a banda de frequências. O mecanismo de acesso deve permitir que qualquer terminal acesse o sistema, provendo um sistema de acesso troncalizado. Se canais são designados a usuários por demanda, o esquema é chamado de Acesso Múltiplo com Alocação por Demanda (DAMA, *Demand-Assigned Multiple Access*), ou simplesmente Múltiplo Acesso. De acordo com a forma com que o espectro é disponibilizado aos usuários, tem-se a classificação geral de sistemas em faixa estreita e faixa larga. Em um sistema faixa estreita, a faixa de frequências é subdividida em várias faixas menores, os canais, que são alocadas sob demanda aos usuários. Em sistemas faixa larga, toda ou grande parte da banda de frequências é disponibilizada aos usuários, como um único bloco. Há três formas básicas de se realizar múltiplo acesso, nomeadas de acordo com o mecanismo chave usado para implementá-las [1]:

- Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência (FDMA);
- Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo (TDMA);
- Múltiplo Acesso por Divisão de Código (CDMA).

3.2 - FDMA

A técnica mais comum de múltiplo acesso é o esquema FDMA, onde há a associação dos canais a determinadas portadoras. A esse esquema de associação é dado o nome de Canal Único por Portadora (SCPC - *Single Channel per Carrier*). Neste caso, o espectro é dividido em canais onde cada assinante sintoniza sua portadora, sendo que o número de canais no sistema será função da largura de cada canal. Os canais possuem bandas de guarda nas suas extremidades, que são

pequenas faixas de freqüências destinadas a minimizar o efeito causado por filtros e osciladores imperfeitos, ou seja, minimizar a interferência de canal adjacente gerada pela invasão de um canal na faixa ocupada pelos seus canais adjacentes. Usualmente, o que se chama de “canal” são as duas bandas associadas ao par de portadoras, direta (base para móvel) e reversa (móvel para base). Sistemas FDMA são sempre FDD (*Frequency Division Duplex*) e usualmente implementados segundo a arquitetura faixa estreita. Tanto sistemas analógicos como digitais podem ser implementados com a técnica FDMA. A Figura 3.1 exemplifica o esquema FDMA.

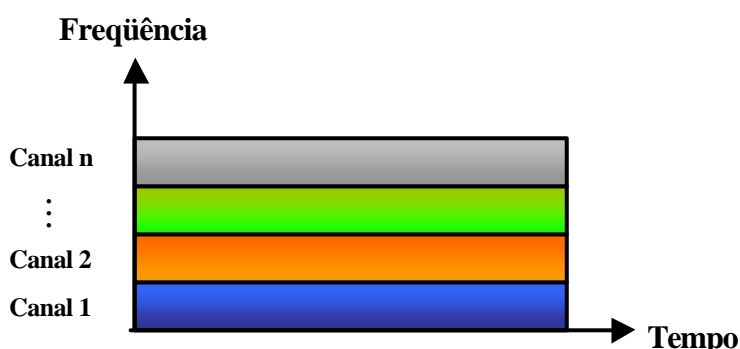


Figura 3.1 - Técnica de Acesso FDMA

3.2.1 - Principais Características do FDMA

- Implementação usual baseada em SCPC;
- Transmissão contínua – uma vez alocados, os canais são usados continuamente pela base e pelo móvel até o fim da comunicação;
- Banda estreita – como cada porção de frequência é utilizada por um único usuário, a banda necessária é relativamente pequena, variando de 25-30 KHz em sistemas analógicos. Em sistemas digitais, o uso de codificação de voz a baixa taxa pode diminuir ainda mais a banda necessária;
- Baixa interferência intersimbólica – problema que afeta apenas sistemas digitais. Devido à característica de sistemas FDMA digitais trafegarem à baixas taxas de transmissão, esse não é um problema importante;
- Baixa sobrecarga de informações de controle (*overhead*) – os canais de voz carregam também mensagens de controle, como *handoff* por exemplo. Pelo

fato dos canais alocados serem usados continuamente, pouco espaço é necessário para controle se comparando ao TDMA, por exemplo;

- Eletrônica simples – pouca ou nenhuma necessidade de processamento digital para combater interferência intersimbólica (em sistemas digitais), entre outras razões, permitem o uso de equipamentos mais simples nas bases e nos terminais;
- Uso de duplexador – como a transmissão é full-duplex e usa-se apenas uma antena para transmissão e recepção, deve-se usar um duplexador para fazer a filtragem entre recepção e transmissão e, assim, evitar interferências entre ambas;
- Alto custo de estações base – a arquitetura SCPC requer que um transmissor, um receptor, dois codecs (codificador / decodificador) e dois modems (modulador / demodulador) sejam usados para cada canal numa estação base. A alocação de mais usuários em uma mesma portadora, tornaria o sistema mais econômico nesse aspecto;
- *Handoff* perceptível – pelo fato da transmissão ser contínua, a comutação entre frequências no processo de *handoff* é perceptível (audível) ao usuário.

3.3 - TDMA

O Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA) reparte um canal físico (portadora) em diversos intervalos de tempo (chamados de *slots*) fazendo com que cada canal possa ser usado por mais de um usuário, cada um em seu instante determinado. Esta técnica permite sua implementação tanto em faixa estreita quanto em faixa larga. No TDMA faixa larga, toda ou grande parte da banda disponível é alocada a cada usuário por determinado *slot* de tempo. Em cada *slot* de tempo apenas um usuário terá acesso a toda (ou grande parte) da banda. No TDMA faixa estreita, o usuário tem acesso a uma pequena porção da banda por determinado intervalo de tempo (*slot*). A Figura 3.2 a seguir, ilustra o conceito TDMA faixa estreita. No TDMA faixa larga não haveria as subdivisões faixa 1, faixa 2, ... faixa M, ou elas seriam em número muito reduzido comparado ao faixa estreita.

O canal TDMA é definido pelas duas combinações [porção da banda (faixa), *slot*] alocadas ao usuário, para o link direto e reverso. O TDMA permite utilização tanto de FDD como de TDD (*Time Division Duplex*).

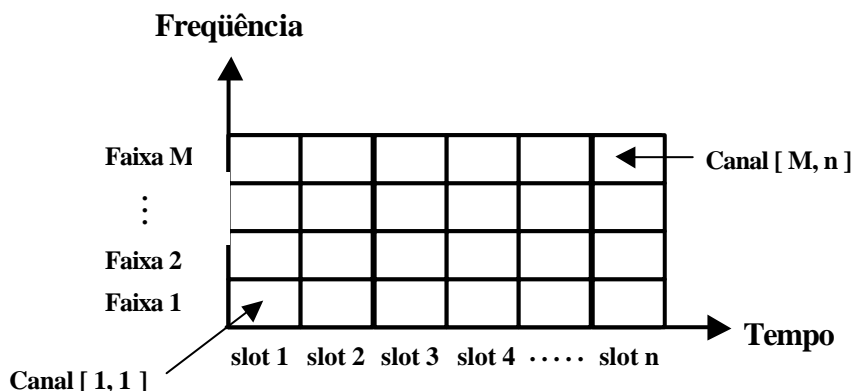


Figura 3.2 - Técnica de Acesso TDMA - (faixa estreita)

A transmissão entre móvel e base é feita de forma não-contínua. A transmissão entre móvel-base é feita em rajadas, ocorrendo apenas no instante de tempo (*slot*) reservado para que o móvel transmita e/ou receba. Nos demais instantes de tempo, outros usuários poderão ter acesso à mesma portadora sem, portanto, que as comunicações interfiram entre si. Pelas características apresentadas, a tecnologia digital é a única adequada para o tipo de transmissão envolvido, de forma que sistemas TDMA são sempre digitais.

3.3.1 - Principais Características do TDMA

- Vários canais por portadora – como dito, uma portadora é utilizada em vários instantes de tempo distintos, cada qual correspondendo a um canal (usuário). No sistema Americano *IS-54* e *IS-136*, usa-se três *slots* por portadora, enquanto que no sistema Europeu GSM cada portadora atende a oito *slots*;
- Transmissão em rajadas (*bursts*) – como cada portadora é compartilhada no tempo, cada usuário transmite ou recebe sua informação numa rajada dentro dos respectivos *slots*. Essa forma de transmissão também leva a uma maior economia de bateria se comparado ao FDMA;

- Faixa larga ou faixa estreita – a banda de cada canal depende de vários fatores, como o esquema de modulação. Dependendo do sistema os canais variam de dezenas a centenas de kHz. Como exemplo, o GSM usa canais de 200 KHz, enquanto que no *IS-54* os canais são de 30 kHz;
- Alta interferência intersimbólica – como a taxa de transmissão é muito mais alta no TDMA do que no FDMA digital, começa a haver problemas pelo fato da duração de símbolos ser comparável ao espalhamento por retardo (*delay spread*), a ser explicado. É requerido tratamento especial para minimizar esse problema, em especial em sistemas com taxas mais altas, como o GSM;
- Alta sobrecarga de informações de controle (*overhead*) – a característica de transmissão em rajadas requer um tratamento mais minucioso no que diz respeito à sincronização. Os bits requeridos nesse tratamento em conjunto com o fato de haver tempos de guarda entre *slots* (equivalente à banda de guarda, na frequência), gera um alto *overhead*;
- Eletrônica complexa – por usar tecnologia digital, muitos recursos podem ser agregados na unidade móvel, aumentando sua complexidade;
- Não requer o uso de duplexador – como transmissão e recepção acontecem em *slots* distintos, é desnecessário o uso de duplexador. O que há é um *switch* que liga / desliga o transmissor / receptor quando este não está em uso. O uso de duplexador é dispensável mesmo no TDMA/FDD pois, nesse caso, o que se faz usualmente é acrescentar intencionalmente alguns intervalos de tempo entre os *slots* de transmissão e recepção para que a comunicação nos dois sentidos não ocorra exatamente no mesmo instante;
- Baixo custo de estações base – como são usados múltiplos canais por portadora, o custo pode ser reduzido proporcionalmente;
- *Handoff* eficiente – o *handoff* pode ser realizado nos instantes em que o transmissor do móvel é desligado, tornando-se imperceptível ao usuário;
- Uso eficiente da potência, por permitir que o amplificador de saída seja operado na região de saturação;
- Vantagens inerentes a sistemas digitais, como capacidade de monitoração da comunicação quadro a quadro, por exemplo.

3.4 - CDMA

A técnica CDMA possui como principal característica básica o fato de que todos os usuários podem transmitir simultaneamente, nas mesmas frequências e utilizando toda a banda disponível. Ao invés de se fazer a separação entre usuários através de frequência (FDMA) ou frequência/tempo (TDMA), a cada usuário é designado um código, de forma que sua transmissão possa ser identificada. Os códigos usados têm baixa correlação cruzada (idealmente zero), ou seja, são ortogonais, fazendo com que as informações contidas nas várias transmissões não se confundam. No outro extremo da comunicação, o receptor tem conhecimento do código usado, tornando possível a decodificação apenas da informação de seu interlocutor. A Figura 3.3 ilustra o método CDMA.

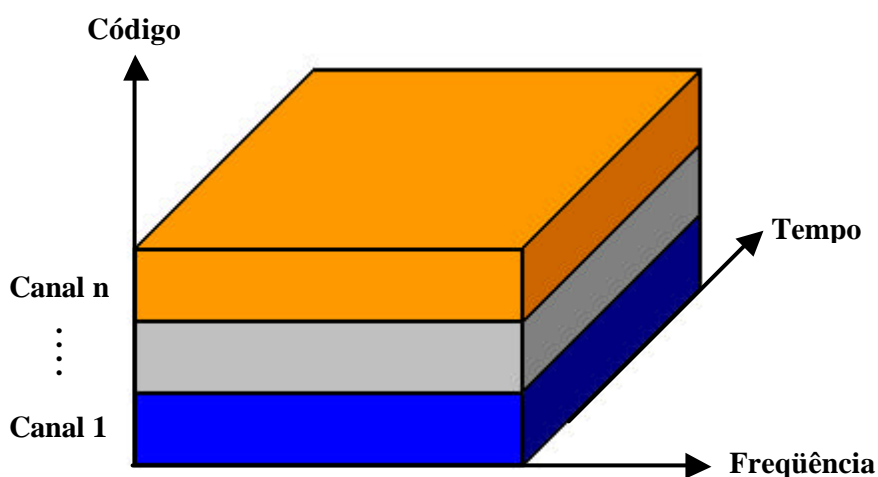


Figura 3.3 - Técnica de Acesso CDMA

O CDMA baseia-se em um conceito denominado Espalhamento Espectral (*Spread Spectrum*). Através dessa técnica, o sinal original que se deseja transmitir é espalhado por uma banda muito maior que a necessária a sua transmissão. Há duas formas principais de se realizar o espalhamento espectral, o Salto em Frequência (*Frequency Hopping – FH*) e Sequência Direta (*Direct Sequency – DS*), entretanto, o que se chama comumente de CDMA é, na verdade, a técnica de múltiplo acesso por sequência direta, motivo este determinante para que neste trabalho só seja abordado esta técnica.

3.4.1 - Espalhamento Espectral por Sequência Direta - CDMA

O Espalhamento Espectral por sequência direta (DS) é baseado na associação de códigos ortogonais aos usuários, por meio de uma sequência pseudo-aleatória (PN – *Pseudo-Noise*) de forma que suas comunicações não interferem entre si mesmo compartilhando o mesmo espectro e tempo. Para um determinado usuário, todos os outros são vistos como sendo ruído. O efeito de espalhamento espectral é obtido pela multiplicação do sinal original por um código com taxa de transmissão muito superior, de forma que o sinal resultante ocupa uma faixa muito larga. A energia total é mantida, sendo distribuída uniformemente por toda a banda, assemelhando-se ao espectro de ruído branco. Todos os sinais oriundos dos diversos usuários / estações base e o próprio ruído agregado à transmissão são superpostos no espectro. Através do código apropriado, a informação do usuário desejado é extraída em meio ao “ruído”. Nessa breve descrição, já é possível observar a alta imunidade intrínseca do espalhamento espectral a ruído e interferência, uma vez que sinais de outros usuários bem como ruído/interferência são tratados da mesma forma e seus danos à informação de determinado usuário são eliminados, teórica e idealmente, quando da aplicação do código de recuperação.

No CDMA, a potência de todos os usuários, com exceção do usuário desejado, é o nível mínimo de ruído no receptor quando do momento da descorrelação (retirada da informação desejada através da aplicação do código apropriado). Se a potência de cada usuário não é controlada, de forma que elas não apareçam com a mesma intensidade no receptor da base, ocorre o problema perto-distante (*near-far*). Se isso ocorre, sinais mais fortes elevarão o nível mínimo de ruído na recuperação dos sinais mais fracos e tenderão a mascará-los, de forma que se reduz a chance de que os sinais mais fracos sejam recuperados. Para combater o problema, é necessário que se adote no CDMA um rígido esquema de controle de potência, através do qual a estação base monitora os terminais de maneira que a potência que chega à base oriunda de cada terminal tenha, idealmente, o mesmo nível. Isso evita que um móvel afastado da base não consiga comunicação pelo fato de um móvel próximo à base estar despejando muita potência.

Os sistemas que utilizam o método CDMA tem como padrão de reuso somente uma célula por *cluster*. Isto dispensa o planejamento de frequências. O que diferencia uma célula de outra são os conjuntos de códigos utilizados já que todas as células utilizam a mesma frequência portadora. Isto facilita a implementação do procedimento de *soft-handoff*. Neste procedimento a EM cruzando a fronteira entre duas células poderá utilizar os sinais das duas ERBs ao mesmo tempo, transmitindo o mesmo código, combinando os sinais recebidos para melhorar a recepção.

Os sistemas que utilizam o CDMA seguem o padrão americano *IS-95* com taxa de espalhamento a 1,2288 Mbps utilizando uma portadora de 1,25 MHz de faixa. O uso de uma taxa básica de 9,6 kbps implica em maior capacidade do sistema e em menor qualidade de transmissão. Utilizando 14,4 kbps teremos uma menor capacidade do sistema, porém uma melhor qualidade de transmissão. Um fato curioso é que as operadoras podem prover serviços em ambas as taxas com tarifas diferenciadas.

Para a expansão de um sistema baseado em CDMA, basta aceitar uma degradação do grau de serviço pelo o aumento do número de usuários no sistema, o que simplesmente aumenta a interferência total, e não implica em nenhuma alteração física do sistema. Apesar disto, estes sistemas apresentam uma capacidade muito superior aos sistemas analógicos.

3.4.2 - Principais Características do CDMA

- Usuários comunicam-se usando as mesmas frequências, simultaneamente, por divisão de código;
- Ao contrário do FDMA e do TDMA, o CDMA não tem um limite de capacidade bem definido, e sim o que se chama de limite *soft*. Ao aumentar o número de usuários, o nível mínimo de ruído é aumentado linearmente, de forma que há um decréscimo gradual de desempenho do sistema, percebido por todos os usuários;
- Efeitos do canal nocivos e seletivos em frequência podem ser minimizados pelo fato do sinal original estar espalhado por uma banda muito grande. E ainda, o receptor utilizado (RAKE) permite que se faça um especial

tratamento nos sinais recebidos por multipercurso, de maneira que o sinal recebido tenha a melhor qualidade possível;

- No caso de *handoff* entre células co canal (todo o espectro é utilizado pelas células – possível no CDMA), o processo pode ser suave. Mais de uma estação base monitora o nível do móvel e a central de controle pode escolher a melhor versão do sinal, sem necessitar comutar frequências;
- Problema perto-distante (*near-far*), caso não haja controle de potência eficiente.

3.5 - COMPARAÇÃO ENTRE FDMA, TDMA E CDMA

Uma vantagem básica do CDMA é sua capacidade muito maior de tolerar sinais interferentes, se comparado a FDMA e a TDMA. Como resultado dessa qualidade, problemas de alocação da banda e interferência entre células adjacentes são simplificados, enquanto que sistemas FDMA e TDMA precisam de cauteloso estudo de alocação de frequência e slots para evitar interferência, exigindo filtros sofisticados e tempos de guarda entre slots. Aumento de capacidade no CDMA pode ser conseguido através do fator de atividade de voz, utilizando-se os instantes de tempo nos quais não é detectada voz para prover aumento de usuários atendidos. Em termos de capacidade, teoricamente o CDMA possui uma vantagem sobre sistemas analógicos por um fator de 10. Por outro lado, toda a vantagem teórica do CDMA exige que uma série de requisitos como, controle de potência eficiente, ortogonalidade entre códigos e necessidade de sincronismo perfeito (bases são sincronizadas por GPS – Sistema de Posicionamento Global, e passam o sincronismo aos móveis), entre outros, sejam atendidos. Na prática, dada a dificuldade de se implementar todos os requisitos, sistemas CDMA em geral não exploram toda a capacidade teórica prevista para essa técnica, embora os avanços tecnológicos os levem cada vez mais próximo a esse ideal.

CAPÍTULO 4

MODELOS DE PROPAGAÇÃO

4.1 - INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma grande variedade de modelos de canal, com fundamentos teóricos e experimentais para previsão da atenuação de percurso (*path loss*) em sistemas de comunicações móveis, consistindo esta em um dos passos mais importantes no planejamento de sistemas móveis celulares. Uma correta previsão possibilita ao projetista de sistemas móveis ter a capacidade de prever a potência mínima que é necessária irradiar de um transmissor para suprir com qualidade aceitável de cobertura uma área predeterminada, o que é de fundamental importância para a melhoria da técnica do reuso de frequência e para a implementação de projetos com banda compartilhada.

Esses modelos diferem na sua aplicabilidade, sobre diferentes tipos de terreno e diferentes condições ambientais. Dessa forma, não existe um modelo adequado para todas as situações. Em casos reais, o terreno sobre o qual se dá a propagação apresenta topografia variada, vegetação e construções distribuídas de forma aleatória. Embora o cálculo da perda de propagação possa ser realizado, ainda que com precisão limitada, utilizando técnicas como a do traçado de raios ou soluções numéricas para aproximações da equação de onda, os métodos mais utilizados para cálculo de cobertura são os empíricos ou semi-empíricos

4.2 - ASPECTOS DA PROPAGAÇÃO

Na propagação de ondas em um ambiente rádio móvel, além das perdas de percurso comuns a outras formas de propagação, os sinais transmitidos sofrem perdas associadas ao relevo do terreno e ao efeito do espalhamento do sinal nas redondezas do receptor móvel. No primeiro caso acontece um desvanecimento lento no nível do sinal, denominado de efeito de sombreamento, enquanto que no segundo ocorrem atenuações rápidas, provocadas pelo fenômeno denominado multipercurso. Outros fenômenos também estão associados ao sinal de rádio móvel,

como a difração e a reflexão. Podemos, entretanto, classificar a influência do terreno sobre o sinal rádio móvel basicamente sob três aspectos:

- 1 - Obstrução: Obstáculos como montanhas, prédios, árvores ou a própria superfície terrestre podem bloquear parcialmente o feixe causando a atenuação por obstrução.
- 2 - Reflexão: Regiões razoavelmente planas como mares, lagos e planícies podem refletir o feixe de ondas com oposição de fase em relação ao sinal direto, causando a atenuação por interferência.
- 3 - Difração: Gumes como o cume de montanhas, canto prédios, ou a própria cunhada podem desviar parcialmente o feixe causando a difração do sinal.

4.3 - MODELOS DE COBERTURA

4.3.1 - Modelo de Okumura

Este modelo foi publicado em 1968 [4], como resultado das pesquisas feitas por Okumura e seus colaboradores, que realizaram nas vizinhanças da cidade de Tóquio (Japão) uma série de medições de intensidade de campo recebido em ambiente de comunicação móvel, que a partir de então, passaram a servir como base para todos os estudos sobre comunicações móveis. Estas medições tiveram como parâmetros a frequência de operação, altura das antenas da Estação Base e a do Terminal Móvel, distância do enlace, e o tipo de área coberta pelo sistema.

A área de cobertura do sistema é classificada de acordo com os obstáculos encontrados no trajeto de propagação em:

- a) Urbana: caracterizada pela grande concentração de obstáculos como edifícios e árvores de grande porte.
- b) Suburbana: caracterizada pela presença não muito concentrada de casas e árvores.
- c) Área aberta ou rural: caracterizada como um espaço aberto, onde não há obstáculos como prédios e árvores de grande porte.

Okumura considera como padrão as medidas de intensidade de campo recebido realizadas num ambiente com área urbana e terreno quase plano. Suas medições tiveram como variáveis: a frequência na faixa de 453 MHz e 1920 MHz; distância entre transmissor e receptor e altura das antenas base e móvel.

Com estas medições Okumura obteve diversos gráficos de intensidade de campo recebido versus distância. Foram também realizadas medições em outros tipos de ambiente, com os parâmetros relativos a cada tipo de terreno para a obtenção de fatores de correção.

4.3.2 - Modelo de Okumura-Hata

Hata [5], visando facilitar o uso do método de Okumura, desenvolveu equações matemáticas empíricas que descrevem com restrições, as informações contidas nos gráficos obtidos por Okumura, uma vez que permitem a predição da atenuação média do sinal apenas em terrenos quase planos, isto é, não levam em consideração as ondulações do terreno.

As equações matemáticas desenvolvidas por Hata e sua faixa de aplicação são mostradas a seguir:

- Perda média de propagação para área urbana:

$$L_p (dB) = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_b + a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d \quad (4.1)$$

- Perda média de propagação para área suburbana:

$$L_{PS} (dB) = L_p - 2 \left\{ \log \left(\frac{f}{28} \right) \right\}^2 - 5.4 \quad (4.2)$$

- Perda média de propagação para área aberta ou rural:

$$L_{PO} (dB) = L_p - 4.78 (\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (4.3)$$

onde: $a(h_m)$: fator de correção da altura da antena móvel

Cidade pequena-média:

$$a_m(h_m) = (0.7 - 1.1 \log f) h_m + (1.56 \log f - 0.8) \quad (4.4)$$

Cidade grande:

$$a_2(h_m) = 1.10 - 8.29 (\log 1.54 h_m)^2 \quad (dB) \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad (4.5)$$

$$a_4(h_m) = 4.97 - 3.2 (\log 11.75 h_m)^2 \quad (dB) \quad f \geq 400 \text{ MHz} \quad (4.6)$$

Os parâmetros do modelo e suas faixas de validade estão mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros do Modelo de Okumura-Hata e suas faixas de validade

Parâmetros	Definição	Faixa de Validade
f	Frequência de operação em MHz	100 – 1.500
h_b	Altura da antena da estação rádio-base (ERB) em metros	30 – 200
h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros	1 – 10
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km	1 – 20

4.3.3 - Modelo de Okumura-Hata Modificado

Posteriormente, foram feitas modificações nas equações de Hata através da incorporação de novos fatores [6], especificados na tabela 4.2, que permitiram que a precisão das fórmulas de Hata pudesse ser elevada sobre a faixa total de validade das curvas de Okumura.

Tabela 4.2 – Parâmetros do Modelo Modificado de Okumura-Hata

Parâmetros	Definição	Faixa de Validade
h_b	altura da antena da estação rádio-base (ERB) em metros	30 – 300
h_m	altura da antena do terminal móvel (TM) em metros	1 – 10
U	0 = cidade pequena/média, 1 = cidade grande	0 ou 1
U_r	0 = área aberta, 0.5 = suburbana, 1 = área urbana	0 – 1
B_1	Porcentagem de prédios sobre o terreno	3 – 50
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km	1 – 100
f	Frequência de operação em MHz	100 – 3.000

As equações modificadas de Hata são mostradas abaixo:

Funções de transição:

$$F_1 = \frac{300^4}{f^4 + 300^4} \quad (4.7)$$

$$F_2 = \frac{f^4}{300^4 + f^4} \quad (4.8)$$

Fator de correção da curvatura da terra

$$S_{KS} = \left[27 + \frac{f}{230} \right] \log \left[\frac{17(h_b + 20)}{17(h_b + 20) + d^2} \right] + 1.3 - \frac{|f - 55|}{750} \quad (4.9)$$

Fator de correção para áreas rurais/suburbanas

$$S_o = (1 - U_r) [(1 - 2U_r)(L_{po} - L_p) + 4U_r(L_{ps} - L_p)] \quad (4.10)$$

Fator geral de correção da altura da antena móvel

$$a_x = (1 - U) a_m(h_m) + U [a_2(h_m)F_1 + a_4(h_m)F_2] \quad (4.11)$$

Fator da porcentagem de prédios sobre o terreno

$$B_o = 25 \log (B_1) - 30 \quad (4.12)$$

Perda média de propagação:

$$L_p (dB) = L_p + S_o + a_x + S_{ks} + B_o \quad (4.13)$$

4.3.4 - Modelo de Walfisch-Bertoni

Este é um modelo de predição tipicamente de ambientes urbanos. Uma de suas limitações está no fato de que o mesmo considera que comunicação neste tipo de ambiente depende entre outras coisas da rádio-propagação entre a antena base localizada acima da altura média dos prédios e a antena móvel situada no nível das ruas. Além desta dependência, este modelo assume que o ambiente urbano é caracterizado por um grande número de prédios enfileirados de altura quase uniforme, de forma que a distância entre os prédios seja pequena comparada com a sua largura, além disso, é feita a consideração de que as ruas são paralelas entre si. Este modelo entretanto, não leva em consideração nenhum efeito da vegetação e/ou obstruções do terreno [7].

Neste modelo, o sinal recebido ao nível das ruas pela unidade móvel não tem componente em linha de visada direta com a antena transmissora, situada normalmente acima da altura dos prédios, sendo portanto, formado predominantemente por reflexões e difrações nos prédios próximos à unidade móvel, conforme mostra a Figura 4.1.

A perda total de intensidade de sinal (equação 4.17) prevista pelo modelo é composta pela soma da perda de espaço livre (equação 4.14) e por uma perda em excesso (equação 4.15), que leva em consideração a atenuação provocada pelas reflexões e difrações que ocorrem nos prédios próximos ao terminal móvel, além da curvatura da terra e da diferença entre a altura da antena transmissora da ERB e a altura média dos prédios. Além dessas considerações, a perda em excesso também incorpora um termo adicional (equação 4.16) onde se é incluído a influência da geometria dos prédios.

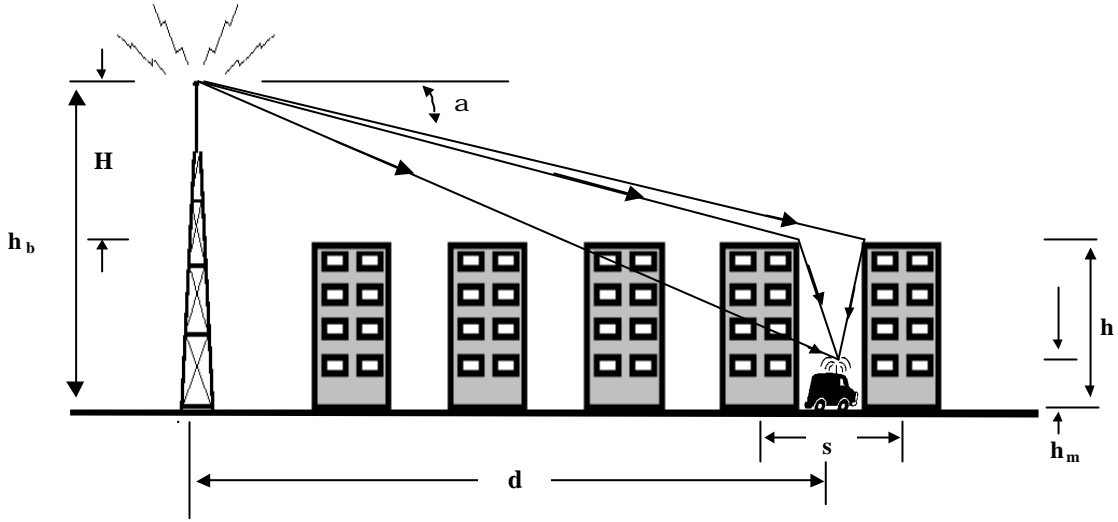


Figura 4.1 - Percurso de propagação com antena base acima dos prédios

As expressões matemáticas do modelo são mostradas a seguir:

Perda de espaço livre:

$$L_0 = 32.44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (4.14)$$

Perda em excesso:

$$L_{ex} = 57.1 + L_A + \log f + 18 \log d - 18 \log H - 18 \log \left[1 - \frac{d^2}{17H} \right] \quad (4.15)$$

Influência da geometria dos prédios:

$$L_A = 5 \log \left[\left(\frac{s}{2} \right)^2 + (h - h_m)^2 \right] - 9 \log s + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h - h_m)}{s} \right] \right\} \quad (4.16)$$

A perda média total da intensidade do sinal prevista pelo o modelo é dada por:

$$L_p = L_0 + L_{ex} \quad (4.17)$$

Na tabela 4.3 são mostrados os parâmetros do modelo.

Tabela 4.3 – Parâmetros do Modelo de Walfisch-Bertoni

Parâmetros	Definição
F	Frequência de operação em MHz
h_b	Altura efetiva da antena da estação rádio-base (ERB) em metros
h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros
H	Altura média dos prédios em metros
H	Diferença entre h_b e h
S	Largura média entre prédios (centro-a-centro) em metros
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em km

4.3.4 - Modelo de Maciel-Bertoni-Xia

Maciel, Bertoni e Xia [8] estenderam o modelo de Walfisch-Bertoni para permitir que a antena base possa ser posicionada tanto acima (como na Figura 4.1), quanto abaixo do topo dos prédios (Figura 4.2).

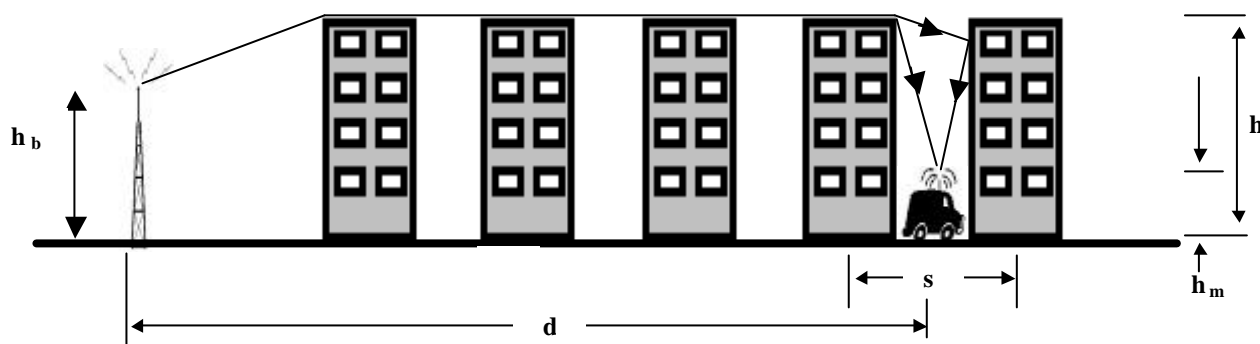


Figura 4.2 – Percurso de propagação com antena base abaixo dos prédios

A seguir são mostradas as equações matemáticas do modelo:

Perda em excesso embaixo do topo dos prédios

$$L_{el} = -10 \log \left[\frac{G_m(q)}{p k \sqrt{(h-h_m)^2 + w^2}} \left[\frac{1}{q} - \frac{1}{2p+q} \right]^2 \right] \quad (4.18)$$

Onde:

$G_m(q)$: é o ganho da antena móvel na direção do topo dos prédios;

K : é o número de onda e

q : é o ângulo entre o topo do prédio e o terminal móvel conforme mostra a Figura 4.3;

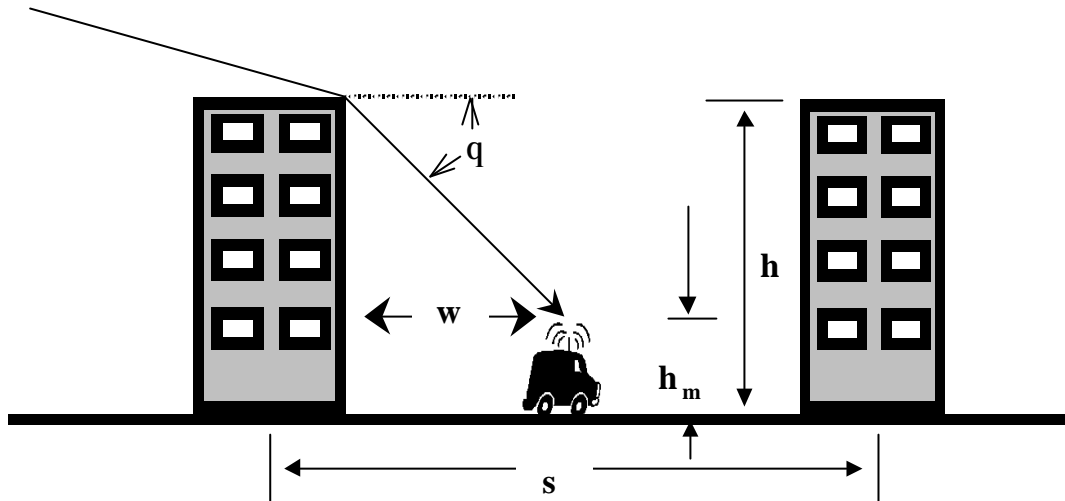


Figura 4.3 – Geometria da vizinhança do terminal móvel

O ângulo θ é calculado através da equação 4.19.

$$q = \text{atan} \left[\frac{h - h_m}{w} \right] \quad (4.19)$$

Perda em excesso ao longo do topo dos prédios

$$L_{e2} = -10 \log [G_b Q^2] \quad (4.20)$$

onde G_b é o ganho da antena base e o fator Q depende da altura da antena base em relação aos prédios, podendo ser dado por Q_L ou Q_E conforme descrito a seguir:

(Q_L) – se h_B está abaixo do nível do topo dos prédios por mais do que $0.5\sqrt{I}s$.

$$Q_L = \frac{\frac{s}{1000d-s}}{\sqrt{2pk\sqrt{(h-h_b)^2+s^2}}} \left[\frac{1}{\tan\left[\frac{h-h_b}{s}\right]} - \frac{1}{2p + \tan\left[\frac{h-h_b}{s}\right]} \right] \quad (4.21)$$

(Q_E) – se h_B está acima do nível do topo dos prédios por mais do que $\sqrt{I}s$.

$$Q_E = 2.35 \left[\tan\left[\frac{h_b}{1000d}\right] \sqrt{\frac{s}{I}} \right]^{0.9} \quad (4.22)$$

A perda média total de propagação do modelo é dada por:

$$L_p \text{ (dB)} = L_o + L_{e1} + L_{e2} + 18 \log \left[\frac{17h_b + d^2}{17h_b} \right] \quad (4.23)$$

Os parâmetros do modelo são mostrados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros do Modelo de Maciel-Bertoni-Xia

Parâmetros	Definição
f	Frequência de operação em MHz
h_b	Altura efetiva da antena da estação rádio-base (ERB) em metros
h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros
h	Altura média dos prédios em metros
s	Largura média entre prédios (centro-a-centro) em metros
w	Distância entre o TM e os prédios na rua
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em km

4.3.5 - Modelo de Ibrahim-Parsons

Este modelo de propagação para ambientes urbanos leva em consideração fatores como o grau de urbanização, utilização do terreno, e a variação de altura entre o terminal móvel e a ERB. Essas características empíricas foram extraídas de medidas realizadas na cidade de Londres, razão pela qual, esse modelo também é conhecido como “Modelo Londrino”.

Com as medidas e os fatores já mencionados, Ibrahim e Parsons puderam descrever o ambiente urbano quantitativamente, determinando a dependência da perda de percurso com a distância e com a frequência de transmissão.

O melhor ajuste dos dados obtidos na cidade de Londres, é mostrado na equação 4.24, ressaltando-se que a equação foi modificada devido a presença de um erro na equação original encontrada em [9].

$$L_P \text{ (dB)} = -20 \log(0.7 h_b) - 8 \log h_m + \frac{f}{40} + 26 \log \frac{f}{40} + C_1 + C_2 \quad (4.24)$$

onde

$$C_1 = -86 \log \left(\frac{f+100}{156} \right) + \left[40 + 14.15 \log \left(\frac{f+100}{156} \right) \right] \log(1000 d) \quad (4.25)$$

$$C_2 = +0.265 (62.4 - 2.2 d) - \left(\frac{0.37 (-7.475 d^2 + 85.225 d - 91.55)}{7} \right) \quad (4.26)$$

Os parâmetros do modelo são mostrados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros do Modelo de Ibrahim-Parsons

Parâmetros	Definição
f	Frequência de operação em MHz
h_b	Altura efetiva da antena da estação rádio-base (ERB) em metros
h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em km

4.3.6 - Modelo de Walfisch-Ikegami / COST 231

Este modelo foi desenvolvido pelo projeto COST 231, combinando de uma forma integrada os modelos de Walfisch-Bertoni e o de Ikegami para a difração [10]. Além desta integração, este modelo também combina alguns fatores empíricos de correção, sendo que o mesmo pode ser aplicado tanto em células grandes quanto em microcélulas, em terrenos planos ou urbanos. Os parâmetros que são considerados neste modelo são mostrados nas figuras 4.4a e 4.4b e são descritos na tabela 4.6.

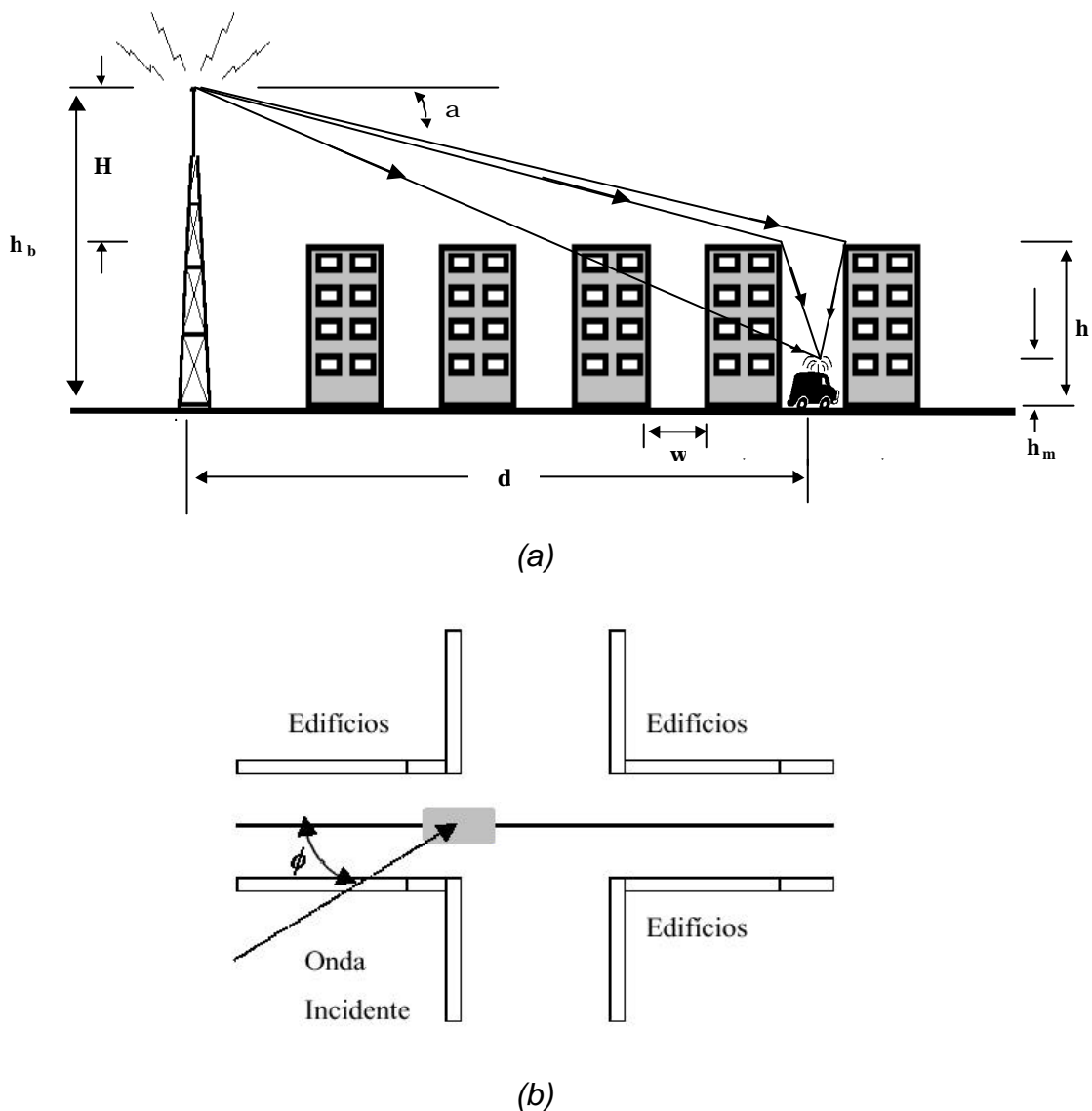


Figura 4.4 – Parâmetros do Modelo Walfisch-Ikegami / COST 231
(a) Geometria do Modelo (b) Orientação do Enlace em relação a rua

Tabela 4.6 – Parâmetros do Modelo de Walfisch-Ikegami / COST 231

Parâmetros	Definição
f	Frequência de operação em MHz
h_b	Altura efetiva da antena da estação rádio-base (ERB) em metros
h_m	Altura da antena do terminal móvel (TM) em metros
H	Altura média dos prédios em metros
W	Largura dos prédios face a face em metros
\hat{f}	Ângulo do enlace em relação a rua em graus
d	Distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em km

Se houver visada direta (propagação LOS - *line-sight*) entre o terminal móvel (TM) e a estação rádio-base (ERB), o modelo de perda se resume à equação (4.27)

$$L_{LOS} (dB) = 42.6 + 26 \log d + 20 \log f \quad (4.27)$$

Para propagação NLOS (*non-line-sight*), ou seja, sem linha de visada, a perda média total de propagação do modelo é expressa por:

$$L_{NLOS} (dB) = L_0 + L_{mult} + L_{diff} \quad (4.28)$$

onde

L_0 : é perda no espaço livre (dB);

L_{mult} : perda adicional devido a múltiplas difrações (dB);

L_{diff} : perda adicional por simples difração e por espalhamento (dB)

As equações pertinentes a esse modelo são mostradas abaixo:

$$L_{diff} = -16.9 + 10 \log f + 10 \log \left(\frac{(h - h_m)^2}{w} \right) + L(f) \quad (4.29)$$

$$L(f) = \begin{cases} -10 + 0.354f & \text{para } 0^\circ < f < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(f - 35^\circ) & \text{para } 35^\circ \leq f < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(f - 55^\circ) & \text{para } 55^\circ \leq f \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4.30)$$

$$L_{mult} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log w \quad (4.31)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log[1 + (h_b - h)] & \text{para } h_b > h \\ 0 & \text{para } h_b \leq h \end{cases} \quad (4.32)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > h \\ 54 - 0.8(h_b - h) & \text{para } d \geq 0.5 \text{ Km e } h_b \leq h \\ 54 - 0.8 \frac{(h_b - h)d}{0.5} & \text{para } d \leq 0.5 \text{ Km e } h_b \leq h \end{cases} \quad (4.33)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h \\ 18 - 15 \frac{(h_b - h)}{h} & \text{para } h_b \leq h \end{cases} \quad (4.34)$$

Para cidades de tamanho médio e centros suburbanos com densidade moderada de árvores:

$$k_f = -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (4.35)$$

Para centros metropolitanos:

$$k_f = -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (4.36)$$

onde k_a representa o aumento da perda de propagação devido a antenas das estações rádio-base localizadas abaixo do topo dos edifícios adjacentes; k_d e k_f controlam a dependência da múltipla difração com a frequência.

A tabela 4.7 apresenta a faixas de validade do modelo.

Tabela 4.7 - Restrições do Modelo

Parâmetros	Validade
f	$800 \text{ MHz} \leq f \leq 2\text{GHz}$
h_b	$4 \text{ m} \leq h_b \leq 50 \text{ m}$
h_m	$1 \text{ m} \leq h_m \leq 3 \text{ m}$
d	$0,02 \text{ km} \leq d \leq 5\text{Km}$

4.4 - Escolha do Modelo Adequado

Para se verificar qual modelo é mais adequado para uma determinada região, pode-se se realizar campanhas de medição na área de interesse e avaliar o desempenho de cada modelo frente as medidas. Esta avaliação pode ser realizada por comparação quantitativa analisando as estatísticas do erro de cada modelo em relação aos valores medidos. O erro absoluto, E , entre medidas e previsões é calculado, para cada faixa de distâncias, por [11]:

$$E_j = |MF_j - K_j| \quad (4.37)$$

onde j é a faixa de distância, MF_j é a média da faixa j e K_j é o valor previsto por um determinado modelo para a faixa j . Os erros médios absolutos são calculados a partir de (4.38) por:

$$\bar{E} = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^F E_j \quad (4.38)$$

onde F é o número de faixas medidas e j é a faixa de distância. O desvio absoluto, σ , é calculado a partir do erro absoluto (4.37) e do erro médio absoluto (4.38) por:

$$s = \sqrt{\frac{1}{F-1} \left(\sum_{i=1}^F E_i^2 - F\bar{E}^2 \right)} \quad (4.39)$$

O erro RMS é uma associação dos parâmetros anteriores. Assim, usando (4.38) e (4.39) tem-se:

$$E_{RMS} = \sqrt{\bar{E}^2 + S^2} \quad (4.40)$$

Através destes parâmetros estatísticos pode-se construir uma tabela comparativa entre os modelos considerados, possibilitando assim, determinar por uma análise estatística qual modelo mais se ajusta a referida região de estudo. A tabela 4.8 mostra um exemplo de construção da tabela comparativa.

Tabela 4.8 – Comparação Estatística dos Modelos em Relação às Medições

Modelos	Erro Médio Absoluto (dB)	Desvio Absoluto (dB)	Erro RMS (dB)
Regressão Linear	2,84	2,54	3,81
Okumura-Hata	5,57	3,40	6,53
Ibrahim-Parsons Empírico	20,24	7,76	21,68
Ibrahim-Parsons Semi-Empírico	4,42	3,83	5,85
Walfisch-Bertoni	4,71	3,95	6,15
Região A			

4.5 - Modelos Ajustados Localmente

A precisão do modelo de propagação utilizado no processo de planejamento celular, é fundamental para a execução de um projeto eficiente, tanto do ponto de vista da qualidade do sistema como sob o aspecto de custos de implantação. Na prática é muito comum selecionar um modelo de cálculo para o pré-projeto mas, antes da execução do projeto definitivo, realizar medidas de campo em um grande número de pontos da região a ser coberta e ajustar os parâmetros (coeficientes) do método de cálculo de modo a minimizar o erro de predição [1].

CAPÍTULO 5 BALANÇO DE POTÊNCIA

5.1 - INTRODUÇÃO

O balanço de potência (*Link Power Budget*) é uma ferramenta fundamental de um enlace de rádio. Ele determina se as margens de potência são suficientes para o funcionamento perfeito do sistema, sendo capaz de avaliar se o sinal transmitido atenuado no percurso pode alcançar o receptor com uma potência maior que a mínima potência detectável.

5.2 - EQUAÇÃO DO BALANÇO DE POTÊNCIA

A equação básica do cálculo de enlace para qualquer sistema rádio relaciona o nível de sinal recebido (RSL) com a potência efetiva irradiada (ERP) e a perda de propagação (L) através da seguinte expressão [1]:

$$RSL(dBm) = ERP(dBm) - L(dB) \quad (5.1)$$

onde a potência efetivamente irradiada (ERP) é normalmente definida como a potência com a qual devem ser alimentados os terminais de uma antena hipotética sem perdas e omnidirecional, de modo a conseguir a mesma densidade de potência irradiada obtida com a antena direcional em seu lóbulo principal [10]. Pelo exposto, pode-se expressar a ERP como:

$$ERP = P_T - L_T + G_T \quad (5.2)$$

onde:

$P_T(dBm)$: é a potência transmitida por canal

$L_T(dB)$: é a perda de alimentação (cabos) na transmissão

$G_T(dBi)$: é o ganho da antena transmissora

De modo análogo pode-se expressar o nível de sinal recebido (RSL) através de:

$$RSL = P_R + L_R - G_R \quad (5.3)$$

onde:

$P_R(dBm)$: é a potência recebida por canal

$L_R(dB)$: é a perda de alimentação (cabos) na recepção

$G_R(dBi)$: é o ganho da antena receptora

O mínimo sinal detectável é definido como sendo o sinal que é exatamente igual ao nível de ruído do receptor (RS), ou seja, pela sensibilidade do mesmo. Pode-se também definir que o limiar de potência na recepção (P_{Rmin}) é expresso pelo mínimo sinal detectável mais uma margem de segurança desejada, sendo esta última normalmente denominada de margem para desvanecimentos (M_D). Em termos matemáticos têm-se [1]:

$$P_{Rmin}(dBm) = RS(dBm) + M_D(dB) \quad (5.4)$$

onde

$$RS = \left[\frac{E_b}{N_0 + I_0} \right]_{req} (dB) + 10 \log r_b + 10 \log \left[10^{\frac{F-174}{10}} + 10^{\frac{I_0}{10}} \right] \quad (5.5)$$

$\left[\frac{E_b}{N_0 + I_0} \right]_{req} (dB)$: é a relação entre a energia (transmitida) por bit e a densidade de potência de ruído mais interferente necessária para satisfazer o requisito de qualidade (limite de taxa de erro) do sistema;

$r_b(bps)$: é a taxa de transmissão de bit;

$F(dB)$: é a figura de ruído do receptor;

$N_0(dBm / Hz)$: é a densidade de ruído térmico;

$I_0(dBm / Hz)$: é a densidade de potência interferente no receptor

De (5.1) a (5.5), a máxima perda de propagação admissível para o sistema é expressa por:

$$L_{\max} = P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - RS - M_D \quad (5.6)$$

ou de uma forma mais compacta:

$$L_{\max} = ERP + G_R - L_R - P_{R\min} \quad (5.7)$$

5.3 - CÁLCULO DO RAIOS MÁXIMO DAS CÉLULAS

Na grande maioria dos modelos de propagação desenvolvidos para previsão da perda de propagação em ambientes urbanos, suburbanos e rurais, a perda de propagação cresce com a distância segundo uma lei de potência, que varia de modelo para modelo. Assim, é possível escrever uma expressão generalizada para a perda de propagação em função da distância na forma [1]:

$$L(dB) = L_0(dB) + 10g \log d \quad (5.8)$$

onde g e L_0 dependem do modelo considerado, das características do terreno e da morfologia da região e da frequência de operação. O parâmetro g representa a taxa de variação da perda com a distância, assumindo normalmente valores entre 2 (espaço livre) e 5 (áreas fortemente urbanizadas). De (5.7) e (5.8), a distância máxima d_{\max} (Km) entre transmissor e receptor que produz o RSL desejado, é expressa por:

$$R = d_{\max} = 10^{\frac{L_{\max} - L_0}{10g}} \quad (5.9)$$

O cálculo deve ser realizado tanto para o enlace de descida ou *down-link* (estação rádio base - unidade do usuário) como para o enlace de subida ou *up-link* (unidade do usuário - estação rádio base), pois os terminais tem em geral características distintas. Adota-se o menor raio obtido que, em geral, corresponde ao enlace de subida.

A seguir, serão mostradas algumas formas de obtenção dos raios máximos para alguns dos modelos de predição descritos no Capítulo 4.

5.3.1 - Cálculo do Raio Máximo Para os Modelos de Propagação

Para a obtenção do raio máximo das células para um determinado modelo, basta somente colocar o referido modelo na representação geral descrita pela equação (5.8) e determinar os parâmetros equivalentes à L_0 e g da mesma e aplicá-los na equação (5.9). A Tabela 5.1 mostra os parâmetros equivalentes de alguns modelos de predição.

Tabela 5.1 - Parâmetros equivalentes de alguns modelos de predição em relação ao modelo generalizado

Modelos	Equivalente L_0	Equivalente g
Espaço Livre	$32.44 + 20 \log f$	2
Okumura-Hata (área urbana)	$C_1 + C_2 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_m)$	$4.49 - 0.655 \log h_b$
Okumura-Hata (área urbana densa)	$C_0 + C_1 + C_2 f - 13.82 \log h_b - a(h_m)$	$4.49 - 0.655 \log h_b$
Walfisch-Ikegami (LOS)	$42.6 + 20 \log f$	2.6
Walfisch-Ikegami (NOS)	$L_0 + L_{diff} + L_{bsh} + k_a + k_f \log f - 9 \log w$	$2 + 0.1 k_d$

Onde os termos f , C_0 , C_1 , C_2 , h_b , $a(h_m)$, L_0 , L_{diff} , L_{bsh} , k_a , k_f , k_d e w já foram definidos no Capítulo 4.

5.4 - ALGORITMO GERAL PARA DETERMINAÇÃO DO RAIOS MÁXIMO

Para os modelos que não se enquadram na generalização descrita em (5.8), ou seja, modelos em que o equivalente do termo L_0 é função da distância d , a determinação analítica da expressão do raio máximo é inviabilizada, requerendo o uso de alguma solução numérica. Para estes casos, o algoritmo baseado no Método de Newton-Raphson é proposto. Como esse método consiste na estimação de raízes reais de uma equação é estimada, deve-se portanto, adaptar a equação do balanço de potência de modo que a mesma apresente como variável a distância d , e

que sua raiz corresponda ao raio máximo estimado para um determinado modelo. A equação adaptada para a determinação do raio máximo pode ser expressa por:

$$L(d) - ERP + P_{Rmin} - G_R + L_R = 0 \quad (5.10)$$

onde $L(d)$ é o modelo considerado em função da distância d . A raiz estimada corresponderá ao raio máximo estimado para modelo de propagação adotado.

CAPÍTULO 6

TRÁFEGO

6.1 - INTRODUÇÃO

O problema da engenharia de tráfego consiste em prover serviços de comunicação, numa determinada área geográfica e para um determinado número de usuários caracterizados por certos hábitos de utilização, com um certo grau de serviço. O grau de serviço (GOS) é definido como o valor percentual da probabilidade de bloqueio, ou seja, a probabilidade de que o assinante não consiga acesso imediato ao serviço por inexistência de canal disponível ou incapacidade do sistema de completar a conexão. Um sistema superdimensionado (sistema com um número de canais maior ou igual ao de assinantes) pode prover graus de serviço baixíssimos (no limite, uma rede de transmissão sem falhas terá grau de serviço igual a zero) mas não será economicamente viável. Por outro lado, um sistema com alto grau de serviço também perderá receita, seja pela insatisfação do usuário, sua redução de utilização do serviço, eventual migração para uma operadora concorrente ou pela própria perda das conexões demandadas. Estabelecer e garantir um grau de serviço que represente um bom compromisso entre, de um lado, o custo de implantação e operação do sistema e, de outro, uma boa receita e satisfação do usuário, é o objetivo da engenharia de tráfego [1].

6.2 - INTENSIDADE E UNIDADES DE TRÁFEGO

A informação fundamental para a engenharia de tráfego é a demanda pelo serviço na região a ser atendida. Esta demanda, ou intensidade de tráfego, pode ser determinada a partir de dados demográficos e características de utilização do serviço pelo usuário, sendo normalmente expressa em alguma unidade de tráfego por unidade de área. Unidades usuais de tráfego são:

- ERLANGS: 1 Erlang é definido como um circuito de comunicação em uso por uma hora.
- CCS: 1 CCS é definido é definido como um circuito de comunicação em uso por cem segundos.

O tráfego é definido para estas unidades como:

$$\text{Tráfego(Erlangs)} = \frac{\text{Número de chamadas} \times \text{Tempo médio de chamada (min)}}{60} \quad (6.1)$$

$$\text{Tráfego(CCS)} = \frac{\text{Número de chamadas} \times \text{Tempo médio de chamada (seg)}}{100} \quad (6.2)$$

Tanto Erlangs como CCS podem ser usadas na determinação do número total de canais requeridos para satisfazer o GOS desejado no sistema. Porém, em 1946, o CCITT padronizou o erlang (Erl) como unidade oficial.

6.3 - CARACTERÍSTICAS DE TRÁFEGO

A principal dificuldade no dimensionamento do sistema reside no fato de que o tráfego passa por grandes variações horárias, diárias e até sazonais. O pico de tráfego, para o qual deve ser dimensionada a probabilidade de bloqueio do sistema, varia dependendo do tipo de área (comercial, industrial ou residencial) considerada, porém, normalmente ocorre no final da manhã e no final da tarde. Durante a noite o tráfego de voz é, evidentemente, muito baixo mas, em alguns sistemas, observa-se um alto tráfego de dados. Um exemplo de possível característica de tráfego é mostrado na Figura 6.1.

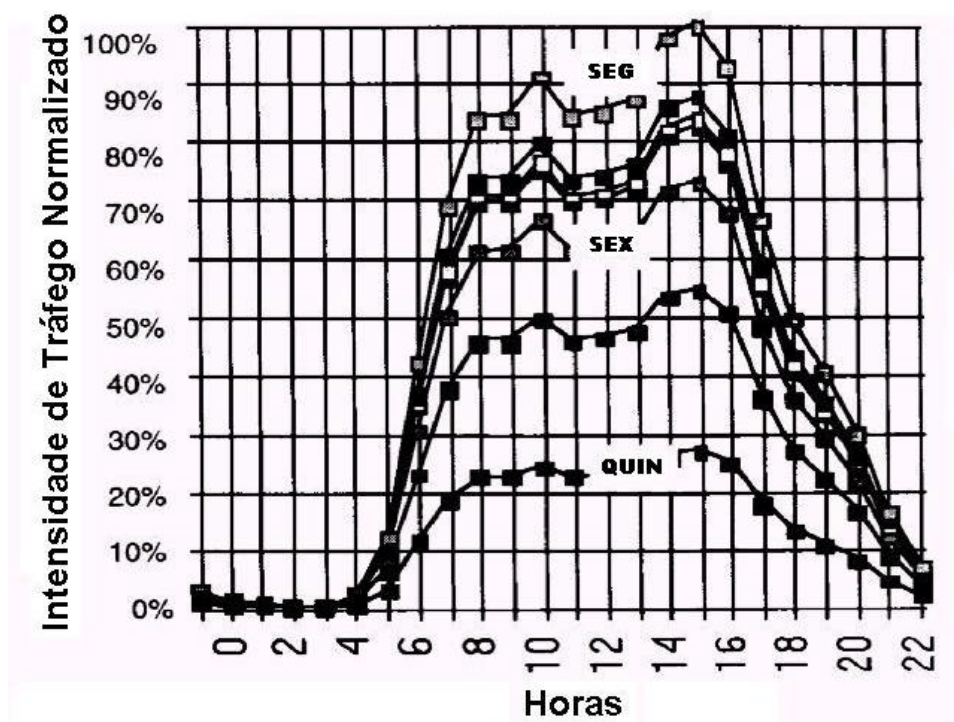


Figura 6.1 - Exemplo de característica de tráfego [3]

Um período importante na avaliação da característica do tráfego é onde há tráfego máximo durante 60 minutos (1 hora). Este período é denominado de **Hora de Maior Movimento** (HMM), e não é necessariamente iniciado em horas inteiras, podendo iniciar-se em qualquer minuto da hora. O importante é que sua duração seja 60 minutos contínuos.

6.4 - PROBABILIDADE DE BLOQUEIO (GRAU DE SERVIÇO)

A probabilidade de bloqueio do sistema depende das distribuições estatísticas do número de chamadas solicitadas pelos usuários, do tempo de duração das chamadas e o destino dado às chamadas bloqueadas. Em teoria de tráfego telefônico, ou seja, tráfego de voz em redes comutadas por circuitos, é amplamente aceito e testado que a distribuição de chegada de chamadas é uma distribuição de *Poisson* e que os tempos de retenção apresentam uma distribuição do tipo exponencial negativa [1]. A partir destas suposições, é possível mostrar que a probabilidade de bloqueio apresenta um de dois comportamentos, dependendo do destino das chamadas bloqueadas:

Se as chamadas bloqueadas são abandonadas, ou seja, cada tentativa de chamada é tratada como um novo assinante, a probabilidade de bloqueio é dada pela fórmula ERLANG-B [1]:

$$P_B(n;T) = \frac{T^n}{n! \sum_{k=0}^{n-1} \frac{T^k}{k!}} \cong \frac{T^n e^{-T}}{n!} \quad (6.3)$$

Se as chamadas bloqueadas são retardadas, ou seja, cada chamada não completada é colocada em espera até que um canal seja liberado, a probabilidade de bloqueio é dada pela fórmula ERLANG-C [1]:

$$P_B(n;T) = \frac{\frac{T^n}{n!} \frac{1}{1-T/n}}{n! \sum_{k=0}^{n-1} \frac{T^k}{k!} + \frac{T^n}{n!} \frac{1}{1-T/n}} \quad (6.4)$$

onde:

n = número de canais

T = tráfego em Erlang (capacidade de tráfego)

Na prática utiliza-se geralmente a fórmula de ERLANG-B. Uma tabela de tráfego associada a esta fórmula é mostrada na Tabela 6.1, onde n representa o número de canais e cada elemento em fundo branco representa a carga de tráfego suportada por aquele número de canais em um correspondente grau de serviço.

Tabela 6.1 – Tabela de tráfego ERLANG-B [1]

n	Grau de Serviço (GOS)				
	1%	2%	3%	5%	10%
1	0.01	0.02	0.031	0.053	0.111
2	0.153	0.223	0.282	0.381	0.595
3	0.455	0.602	0.715	0.899	1.27
4	0.87	1.09	1.26	1.52	2.05
5	1.36	1.66	1.88	2.22	2.88
6	1.91	2.28	2.54	2.96	3.76
7	2.5	2.94	3.25	3.74	4.67
8	3.13	3.63	3.99	4.54	5.6
9	3.78	4.34	4.75	5.37	6.55
10	4.46	5.08	5.53	6.22	7.51
11	5.16	5.84	6.33	7.08	8.49
12	5.88	6.61	7.14	7.95	9.47
13	6.61	7.4	7.97	8.83	10.5
14	7.35	8.2	8.8	9.73	11.5
15	8.11	9.01	9.65	10.6	12.5
16	8.88	9.83	10.5	11.5	13.5
17	9.65	10.7	11.4	12.5	14.5
18	10.4	11.5	12.2	13.4	15.5
19	11.2	12.3	13.1	14.3	16.6
20	12	13.2	14	15.2	17.6
21	12.8	14	14.9	16.2	18.7
22	13.7	14.9	15.8	17.1	19.7
23	14.5	15.8	16.7	18.1	20.7
24	15.3	16.6	17.6	19	21.8
25	16.1	17.5	18.5	20	22.8
26	17	18.4	19.4	20.9	23.9
27	17.8	19.3	20.3	21.9	24.9
28	18.6	20.2	21.2	22.9	26
29	19.5	21	22.1	23.8	27.1

n	Grau de Serviço (GOS)				
	1%	2%	3%	5%	10%
30	20.3	21.9	23.1	24.8	28.1
31	21.2	22.8	24	25.8	29.2
32	22	23.7	24.9	26.7	30.2
33	22.9	24.6	25.8	27.7	31.3
34	23.8	25.5	26.8	28.7	32.4
35	24.6	26.4	27.7	29.7	33.4
36	25.5	27.3	28.6	30.7	34.5
37	26.4	28.3	29.6	31.6	35.6
38	27.3	29.2	30.5	32.6	36.6
39	28.1	30.1	31.5	33.6	37.7
40	29	31	32.4	34.6	38.8
41	29.9	31.9	33.4	35.6	39.9
42	30.8	32.8	34.3	36.6	40.9
43	31.7	33.8	35.3	37.6	42
44	32.5	34.7	36.2	38.6	43.1
45	33.4	35.6	37.2	39.6	44.2
46	34.3	36.5	38.1	40.5	45.2
47	35.2	37.5	39.1	41.5	46.3
48	36.1	38.4	40	42.5	47.4
49	37	39.3	41	43.5	48.5
50	37.9	40.3	41.9	44.5	49.6
55	42.4	44.9	46.7	49.5	55
60	46.9	49.6	51.6	54.6	60.4
65	51.5	54.4	56.4	59.6	65.8
70	56.1	59.1	61.3	64.7	71.3
75	60.7	63.9	66.2	69.7	76.7
80	65.4	68.7	71.1	74.8	82.2
90	74.7	78.3	80.9	85	93.1
100	84.1	88	90.8	95.2	104.1

O Grau de Serviço (GOS) do sistema é definido por:

$$GOS (\%) = P_B(n; T) \times 100 \quad (6.5)$$

A Figura 6.2 mostra a capacidade de tráfego em função do número de canais do sistema para graus de serviço de 1%, 2% e 5%.

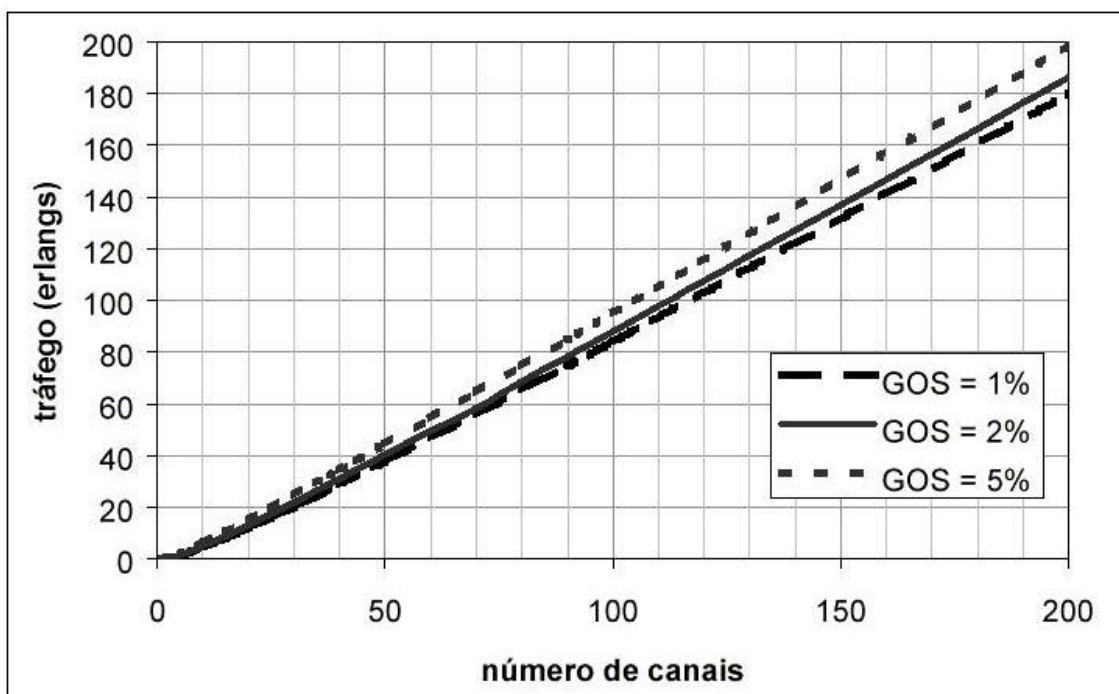


Figura 6.2 - Tráfego (ERLANG-B) em função do número de canais [1]

6.5 - EFICIÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DO CANAL

A eficiência da utilização do canal é também uma medida da eficiência da estação radio-base (ERB). É determinada pela soma do tráfego por canal, definida como [3]:

$$Eficiência (\%) = \frac{Tráfego (Erlangs)}{Número de Canais} \times 100 \quad (6.6)$$

A relação entre a eficiência e a capacidade de tráfego para um GOS igual a 2% é mostrada na Figura 6.3. Nota-se também, que para um dado GOS, a eficiência aumenta a medida que o número de canais (circuitos de voz) aumenta, entretanto, a partir de um determinado número, este aumento é menos significativo, verificando-se uma saturação.

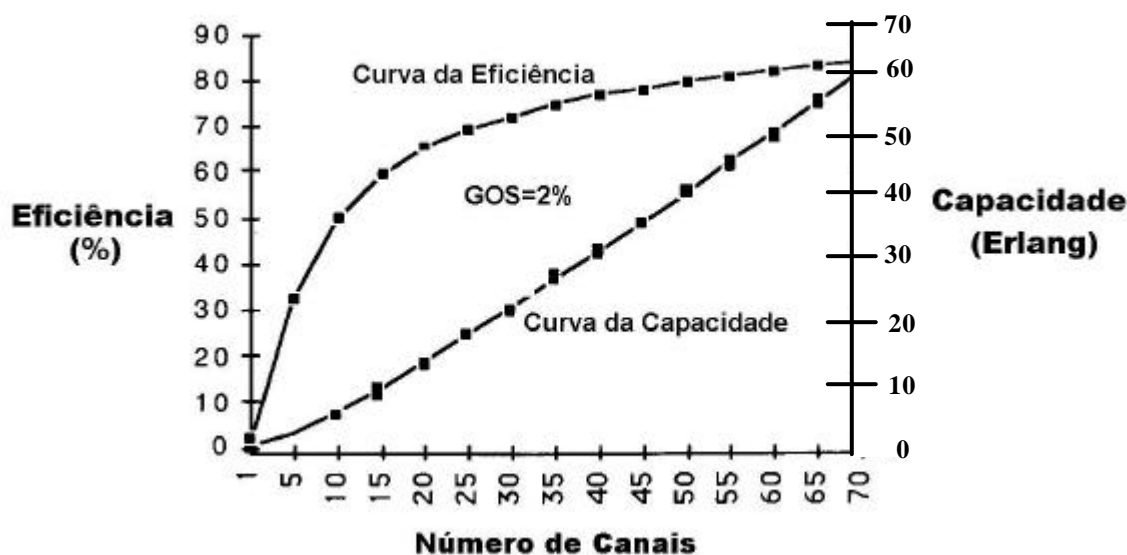


Figura 6.3 - Eficiência na Utilização do Canal [3]

6.6 - PROJETO DE TRÁFEGO EM SISTEMAS CELULARES

Para o projeto de tráfego nos sistemas móveis celulares o primeiro passo a ser realizado é o de dispor de um mapa de distribuição de tráfego para a região de interesse. Geralmente, este tipo de mapa é definido a partir de dados da distribuição de densidade populacional e de outros fatores relevantes como distribuição de renda e tipo de atividade econômica. Usando o conceito de intensidade de tráfego, todos estes dados são então relacionados e transformados em tráfego por alguma unidade de área, geralmente em Km^2 . A título de exemplo, um mapa da distribuição de tráfego de uma região hipotética é mostrada na Figura 6.4. Neste mapa, a região de estudo é dividida em quadrículas com seus respectivos valores de tráfego.

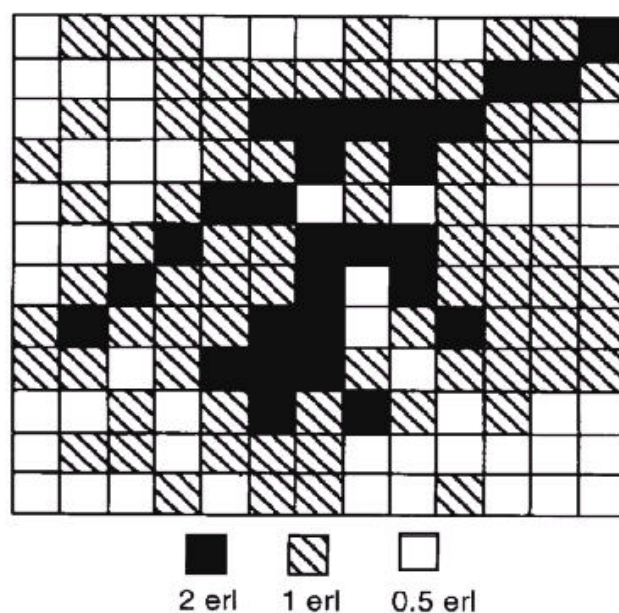


Figura 6.4 - Mapa (esquemático) de tráfego

O próximo passo do projeto consiste na superposição de uma grade hexagonal de lado igual ao raio máximo determinado a partir da formulação do capítulo anterior considerando algum modelo de propagação. Este procedimento é ilustrado na Figura 6.5.

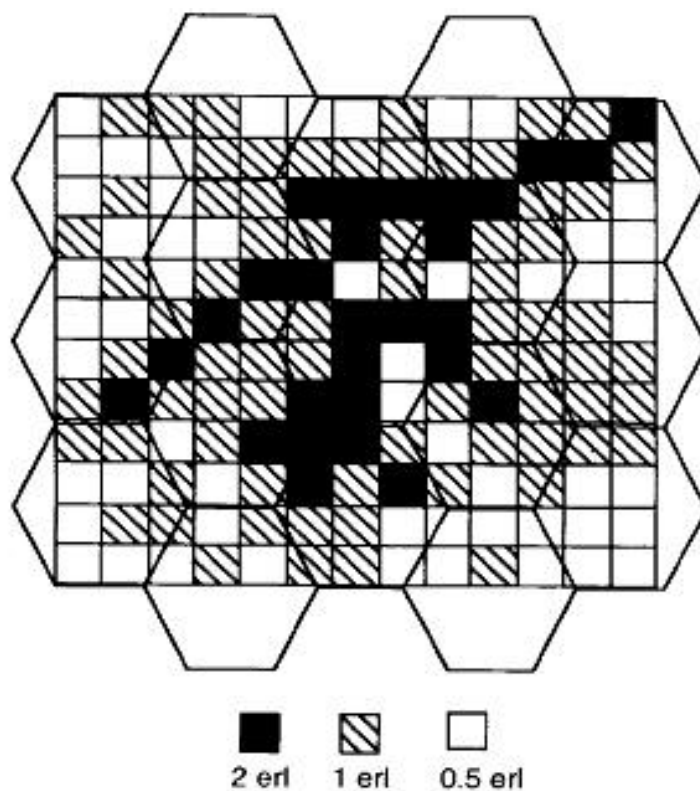


Figura 6.5 - Superposição da grade hexagonal

Após esta superposição, pode ser realizada a contagem de tráfego por célula, somando-se o tráfego das quadrículas contidas em cada hexágono. O resultado, para o exemplo considerado, é mostrado na Figura 6.6.

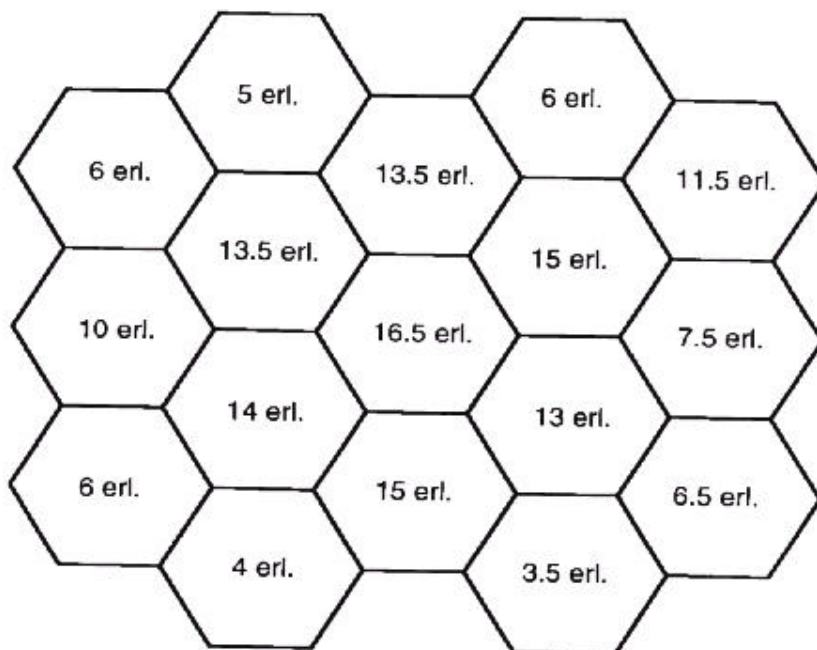


Figura 6.6 - Tráfego por célula

O número de canais necessários para atendimento do tráfego com o grau de serviço estipulado em cada célula é obtido a partir das fórmulas de tráfego de ERLANG. A equação de tráfego mais utilizada na prática é a de ERLANG-B, definida por

$$GOS = \frac{T^n e^{-T}}{n!} \text{ onde } n = \text{número de canais por célula} \quad (6.7)$$

O resultado do cálculo do número de canais necessários obtidos para este exemplo é mostrado na Figura 6.7.

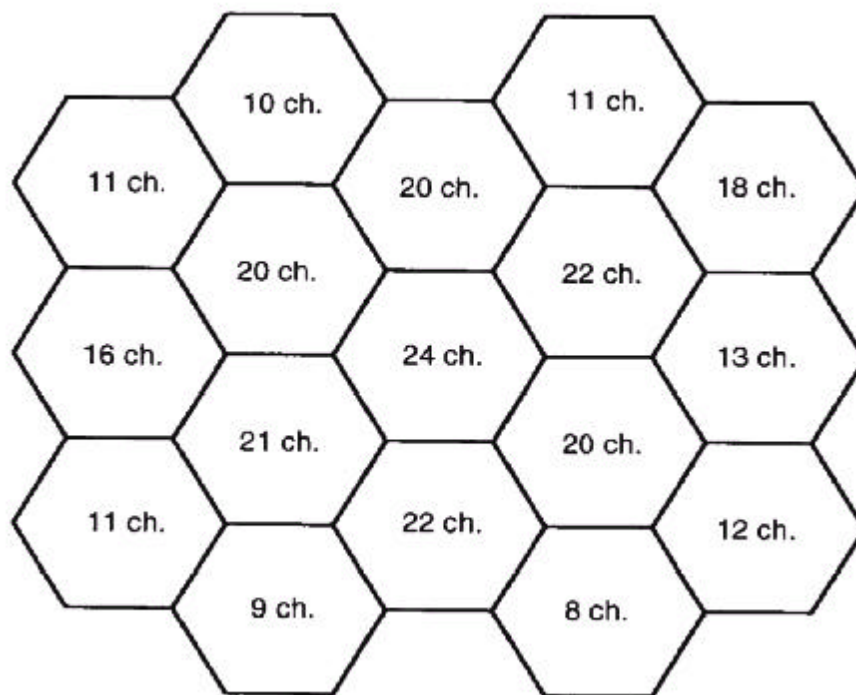


Figura 6.7 - Número de canais necessários por célula

6.7 - TÉCNICAS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS

O eficiente uso dos canais determina o bom desempenho do sistema e pode ser obtido por diferentes técnicas. Uma grande parte dos estudos e cálculos na área de tráfego, tem mostrado que existe um notável crescimento da ocupação do canal sendo necessário aplicar alguns algoritmos de alocação dinâmica. As principais técnicas para alocação de canais são descritas brevemente a seguir [2].

6.7.1 - Alocação Fixa de Canal

Nesta técnica, um subconjunto de canais disponíveis no sistema é alocado para cada célula. Um mesmo subconjunto é realocado para outra célula à uma distância de reuso requerida (para evitar a interferência co-canal). Se todos os canais estão ocupados em uma célula a chamada é bloqueada. Dado que cada célula tem um número fixo conjunto de canais, o controle da alocação de canal para as chamadas pode ser distribuída entre as ERBs. O principal problema da alocação fixa de canais é a não habilidade frente a alteração do padrão de tráfego. Devido a mobilidade dos assinantes, algumas células podem experimentar um súbito

crescimento no tráfego oferecido, com uma conseqüente deterioração do grau de serviço (GOS), enquanto outras células podem ter canais livres que não podem ser usadas pelas células congestionadas. Quando o perfil de tráfego é bem conhecido, a alocação de canais pode ser otimizada para oferecer um melhor desempenho. Entretanto, qualquer variação inesperada pode causar distúrbio no sistema.

6.7.2 - Alocação Dinâmica de Canal

Este algoritmo de fato compreende um número de estratégias com a característica de que todos os canais do sistema estão disponíveis para todas as células. A alocação é conduzida de acordo com a dinâmica demanda de tráfego dos assinantes. Embora este algoritmo possa apresentar bons resultados frente a variação espacial não-uniforme da distribuição de tráfego, ele apresenta baixo desempenho para altas cargas de tráfego.

6.7.3 - Alocação Híbrida de Canal

Esta técnica é a combinação das duas técnicas anteriores. Cada célula tem um fixada percentagem de canais pre-alocados, enquanto que o resto dos canais são alocados dinamicamente. O desempenho desta técnica depende tanto da distribuição de tráfego assim como da proporção de canais fixos para dinâmicos.

6.7.4 - Alocação por Empréstimo de Canal

Esta técnica prevê que se uma célula tiver todos seus canais ocupados, ela poderá utilizar os canais livres das células vizinhas. Se não existirem canais disponíveis, então a chamada é bloqueada. O desempenho desta técnica pode ser melhorada se houver a "obrigação" de empréstimo da célula adjacente até mesmo se a célula estiver bloqueada. Isto fará a célula bloqueada a "obrigar" o empréstimo de outra célula em sua volta, e assim por diante.

CAPÍTULO 7

PLANEJAMENTO DE FREQUÊNCIAS

7.1 - INTRODUÇÃO

O uso do espectro de frequências é regulado por diversos organismos, tais como a FCC (*Federal Communications Commission*) e a ITU, que determinam que porções do espectro podem ser utilizadas para cada serviço. Assim, o serviço móvel celular dispõe de faixas bem definidas e limitadas para sua implementação. A fim de otimizar o uso do espectro, assim como de aumentar a capacidade dos sistemas celulares e reduzir a interferência, recorre-se ao planejamento de frequências.

É fundamental manter um adequado isolamento do canal para manter a qualidade e disponibilidade do sistema dentro de níveis recomendados. Desta forma, a interferência de canal adjacente que se produz, é mínima. Além disso, deve-se garantir uma aceitável interferência co-canal mediante uma adequada distância de reuso, sem esquecer o compromisso com a capacidade, a qual deve ser a maior possível.

Outro aspecto importante do planejamento de frequências está relacionado com os sistemas que utilizam a técnica de acesso CDMA, pois como foi já mencionado no capítulo 3, estes sistemas tem como padrão de reuso somente uma célula por *cluster*, dispensando-se assim, o planejamento de frequências. O que diferencia uma célula de outra são os conjuntos de códigos utilizados, já que todas as células utilizam a mesma frequência portadora de banda-larga.

7.2 - ALOCAÇÃO DA BANDA E A NUMERAÇÃO DOS CANAIS

O sistema celular é um sistema *full-duplex* no qual a banda alocada é dividida em duas partes iguais, uma delas para os canais diretos (da ERB para o móvel) e outra para os canais reversos (do móvel para a ERB). Em um sistema *full-duplex* deve existir uma banda (*banda de guarda*) para evitar a interferência entre os canais das duas direções (diretos e reversos), que no caso dos padrões de sistemas celulares adotados no Brasil é de 45 MHz (AMPS, IS-54, IS-136 e IS-95).

Nos primeiros sistemas celulares a banda regulada pela FCC utilizava um espectro básico de 666 canais *Duplex* divididos igualmente em duas bandas, *A* e *B*, para exploração do serviço por duas operadoras. Posteriormente foram acrescentados novos canais ao sistema que atualmente utiliza um espectro expandido com 832 canais *Duplex*. Cada banda (*A* e *B*) ocupa hoje uma largura de faixa de 12.5 MHz com 416 canais (ver Figura 7.1), o que representa que cada canal tem uma largura de faixa de 30 KHz. A maior parte destes canais são canais dedicados à voz. Originariamente, 21 destes canais *Duplex* de cada banda são canais de controle do espectro básico (Canais *Set-Up*), com a função de transmitirem sinalização na forma digital.

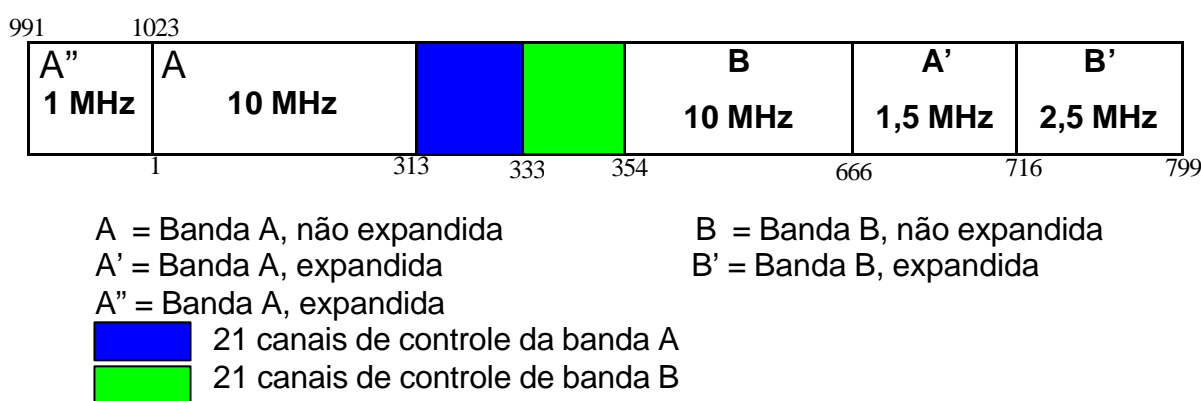


Figura 7.1 – Alocação de frequências para o sistema AMPS [3]

A relação entre o número do canal físico e a frequência é governada pelas relações mostradas na tabela 7.1, válidas para os sistemas AMPS e TDMA (*IS-54* e *IS-136*) [3]. Entretanto, é importante ressaltar que cada canal AMPS é compartilhado por 3 usuários no sistema TDMA (*IS-54* e *IS-136*):

Tabela 7.1 - Portadoras no espectro disponível

Espectro Expandido		
Transmitido pela ERB	$f = 0,03.N + 870$ (MHz)	$001 \leq N \leq 799$
Transmitido pela ERB	$f = 0,03.(N - 1023) + 870$ (MHz)	$991 \leq N \leq 1023$
Transmitido pela EM	$f = 0,03.N + 825$ (MHz)	$1 \leq N \leq 799$
Transmitido pela EM	$f = 0,03.(N - 1023) + 825$ (MHz)	$991 \leq N \leq 1023$

onde *N* é o número do canal.

Os 42 canais de controle (21 em cada direção do enlace) estão compreendidos entre os canais 313 e 354, conforme mostra a tabela 7.2:

Tabela 7.2 - Canais de controle de 30 kHz cada.

Canais de Controle (42 canais Set-up)	
Banda A	313 a 333
Banda B	334 a 354

7.2.1 - Bandas de Frequências CDMA (IS-95)

Para os sistemas baseados no padrão CDMA (IS-95), as bandas celulares existentes (A e B) de 12,5 MHz cada, são usadas para derivar 10 diferentes bandas CDMA de 1,25 MHz. Cada banda CDMA suporta 64 códigos ortogonais, onde cada código é designado como sendo um canal. Não são permitidos a reutilização desses códigos na mesma banda CDMA, porém podem ser reusados nas outras bandas. Outro aspecto importante é que diversas bandas de frequências CDMA podem ser usadas em uma mesma célula ou setor para aumentar a capacidade do sistema. A Figura 7.2 mostra as bandas de frequências CDMA alocadas em uma banda celular de 1,25 MHz (A ou B) [3].



Figura 7.2 – Bandas de Frequências CDMA

7.3 - PLANOS DE REUSO DE FREQUÊNCIAS

Ao conjunto de vários canais que é designado a uma determinada ERB dá-se o nome de *grupo de canais*. Para aumentar a capacidade do sistema, estes grupos de canais são reutilizados a uma distância suficiente para minimizar a interferência, denominada distância de reuso. O reuso dos grupos de canais é governado por um plano de reuso de frequências, entre os quais os mais utilizados são os de 4, 7, 9 e 12 células por *cluster*.

Este conceito de reuso de grupos de canais pelo planejamento de frequências só é válido nos sistemas analógicos (AMPS por exemplo) e em sistemas digitais baseados na técnica de acesso TDMA, visto que os sistemas que utilizam a técnica de acesso CDMA, os canais são designados por códigos e não por frequências, e todas as células utilizam a mesma frequência portadora de banda-larga.

7.3.1 - Plano de Reuso de Frequências $N = 4$ Omni (4/24).

Este plano de reuso é baseado em *clusters* formados por quatro células, ou seja, o total de canais disponíveis são igualmente divididos nas 4 células que os formam. Neste plano, o conjunto total de frequências disponíveis são divididos em 24 grupos de frequências que são agrupados em quatro conjuntos de grupos (A, B, C e D). Portanto, cada um desses conjuntos serão formados por um total de seis grupos de frequências, conforme mostrado na tabela 7.3. Assim, cada uma das quatro células do *cluster* será formada por um conjunto de grupos distinto (vide Figura 7.3), sendo portanto, designado por célula um total de 6 grupos de frequências. Observe que os canais de controle estão em fundo azul nas tabelas mencionadas.

Tabela 7.3- Grupos de frequências para o plano de reuso Omni 4/24 [3]

GRUPOS DE FREQUENCIAS																							
A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2	A3	B3	C3	D3	A4	B4	C4	D4	A5	B5	C5	D5	A6	B6	C6	D6
CANALIS DA BANDA B																							
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													
CANALIS DA BANDA A																							
333	332	331	330	329	328	327	326	325	324	323	322	321	320	319	318	317	316	315	314	313			
312	311	310	309	308	307	306	305	304	303	302	301	300	299	298	297	296	295	294	293	292	291	290	289
288	287	286	285	284	283	282	281	280	279	278	277	276	275	274	273	272	271	270	269	268	267	266	265
264	263	262	261	260	259	258	257	256	255	254	253	252	251	250	249	248	247	246	245	244	243	242	241
240	239	238	237	236	235	234	233	232	231	230	229	228	227	226	225	224	223	222	221	220	219	218	217
216	215	214	213	212	211	210	209	208	207	206	205	204	203	202	201	200	199	198	197	196	195	194	193
192	191	190	189	188	187	186	185	184	183	182	181	180	179	178	177	176	175	174	173	172	171	170	169
168	167	166	165	164	163	162	161	160	159	158	157	156	155	154	153	152	151	150	149	148	147	146	145
144	143	142	141	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131	130	129	128	127	126	125	124	123	122	121
120	119	118	117	116	115	114	113	112	111	110	109	108	107	106	105	104	103	102	101	100	99	98	97
96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73
72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49
48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25
24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1023	1022	1021	1020	1019	1018	1017	1016	1015	1014	1013	1012	1011	1010	1009	1008	1007	1006	1005	1004	1003	1002	1001	1000
999	998	997	996	995	994	993	992	991	990	989	988	987	986	985	984	983	982	981	980	979	978	977	976
701	700	699	698	697	696	695	694	693	692	691	690	689	688	687	686	685	684	683	682	681	680	679	678
677	676	675	674	673	672	671	670	669	668	667													

A distância de reuso neste plano é igual a $D = \sqrt{3 \times NR} = \sqrt{3 \times 4R} = 3,46R$.

Esta solução também pode obtida da geometria do sistema, como mostrado na Figura 7.3.

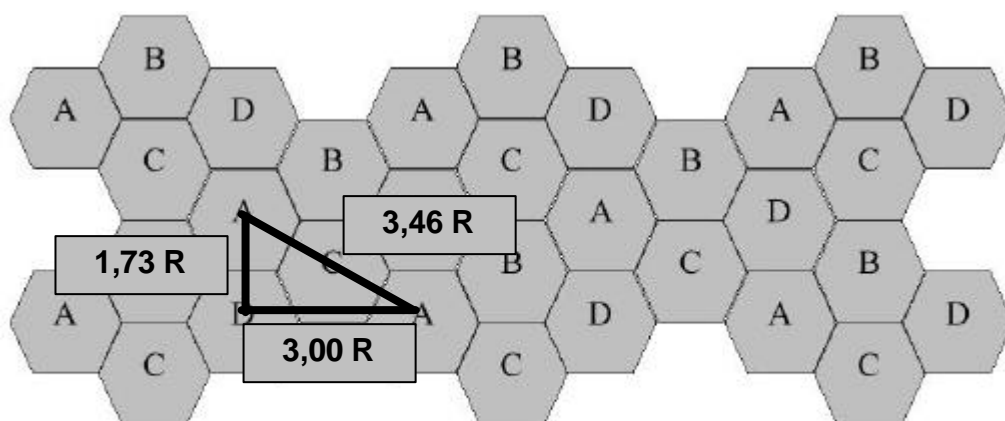


Figura 7.3 – Plano de reuso Omni 4/24

A relação sinal interferência (S/I) neste plano considerando apenas o 1º anel interferente pode ser expressa por:

$$\frac{S}{I} \approx 10 \log \left[\frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^6 \right] = 13,8 \text{ dB para } \gamma = 4 \quad (7.1)$$

7.3.1.1 - Capacidade no Plano de Reuso de Frequências $N = 4$ Omni.

A capacidade dos sistemas celulares é obtida a partir dos canais de voz disponíveis por célula, ou do tráfego oferecido correspondente expresso em Erlangs. A tabela 7.4 apresenta a capacidade para o plano de reuso $N = 4$ para diferentes graus de serviço e para as duas bandas (expandida - ES e a não expandida - NES).

Tabela 7.4 – Capacidade (Erlangs) para o plano de reuso $N = 4$ Omni

Nº de canais por célula	GOS = 1%	GOS = 2%	GOS = 3%	GOS = 5%
78 (NES)	63,5	66,8	69,1	72,8
98 (ES)	82,2	86,0	88,8	93,2

7.3.2 - Plano de Reuso de Frequências $N = 7$ Omni (7/21).

Este plano de reuso é baseado em *clusters* formados por sete células, ou seja, o total de canais disponíveis são igualmente divididos nas 7 células que os

formam. Devido a existência de 21 canais de controle, este plano de frequência é baseado na divisão do conjunto total de frequências disponíveis em 21 grupos de frequências que podem ser agrupados em três conjuntos de grupos (A, B e C), como mostram as tabelas 7.5a (Banda A) e 7.5b (Banda B). Os grupos de frequências por célula do *cluster* serão formados pelos subconjuntos de grupos determinados pelas colunas $A_J + B_J + C_J$, onde J é número da célula ($J=1,2,...,7$). Observe que os canais de controle estão em fundo azul nas tabelas mencionadas.

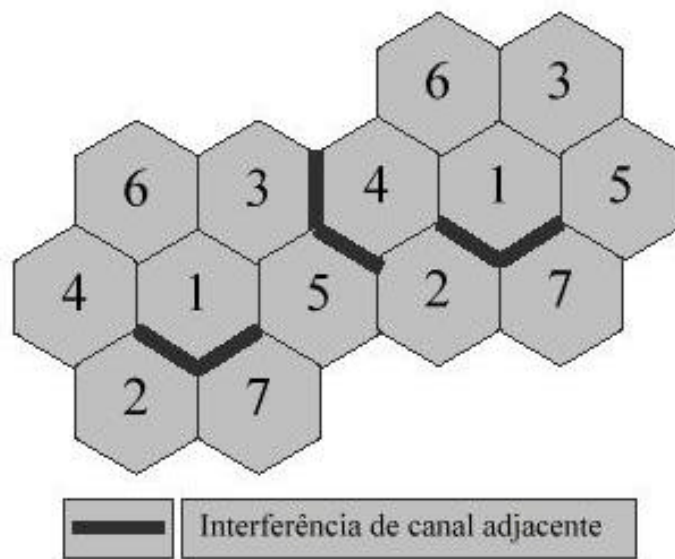
Tabela 7.5a – Grupos de frequências da banda A, para o plano de reuso $N = 7$ Omni [3]

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
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	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147
148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189
190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
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			
313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333
															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																			
									991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002
1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023

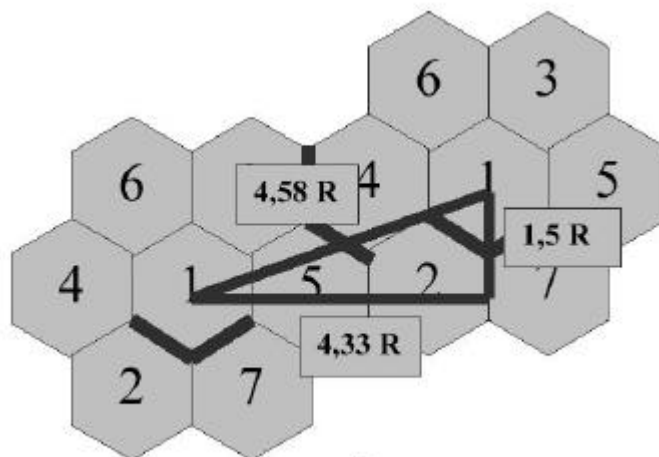
Tabela 7.5b - Grupos de freqüências da banda B, para o plano de reuso $N=7$ Omni [3].

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
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																	

Então, para cada célula do *cluster* serão designados um total de 3 grupos de freqüências. A Figura 7.4a mostra uma versão otimizada do plano de reuso $N = 7$, pois a mesma apresenta o menor número de células com interferência de canal adjacente. A distância de reuso neste plano é igual a $D = \sqrt{3 \times NR} = \sqrt{3 \times 7}R = 4,58R$. Esta solução também pode obtida da geometria do sistema, como mostrado na Figura 7.4b.



(a)



(b)

Figura 7.4 – Plano de reuso $N=7$: (a) interferências de canal adjacente e (b) distância de reuso

A relação sinal interferência (S/I) neste plano considerando apenas o 1º anel interferente pode ser expressa por:

$$\frac{S}{I} \approx 10 \log \left[\frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^6 \right] = 18,6 \text{ dB para } \gamma = 4 \quad (7.2)$$

7.3.2.1 - Capacidade no Plano de Reuso de Frequências $N = 7$ Omni.

Neste plano, o número de canais de voz por célula é igual a $395/7 = 56$ para a banda expandida (ES) e igual a $312/7 = 44$ para a banda não-expandida (NES). A capacidade de tráfego deste plano para diferentes graus de serviço considerando as duas bandas (expandida - ES e a não expandida - NES) é mostrada na tabela 7.6

Tabela 7.6 – Capacidade (Erlangs) para o plano de reuso $N = 7$ Omni

Nº de canais por célula	GOS = 1%	GOS = 2%	GOS = 3%	GOS = 5%
44 (NES)	32,5	35,0	37,0	39,6
56 (ES)	42,3	46,0	48,0	50,0

7.3.3.- Plano de Reuso de Frequências $N = 7$ Omni Trapezoidal

Neste plano de frequências, as 7 células do *cluster* são dispostas em duas filas, designando-se os grupos de canais de forma alternada. Como pode ser observado na Figura 7.5, neste plano não há interferência de canal adjacente e sua distância de reuso pode ser determinada pela da geometria do plano, chegando-se a um valor de $D = 6,25R$.

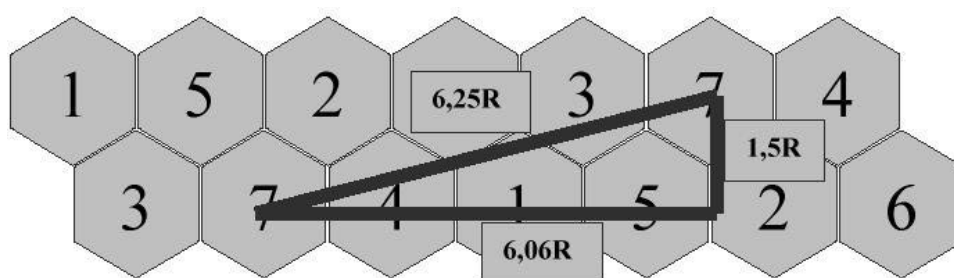


Figura 7.5 – Plano $N=7$ trapezoidal

A denominação de configuração trapezoidal é devida a aparência do *cluster*. Tal configuração apresenta a característica de que o 1º anel interferente é formado apenas por duas células co-canais, melhorando consideravelmente a relação S/I , podendo então ser expressa por:

$$\frac{S}{I} \approx 10 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{D}{R} \right)^g \right] = 28,8 \text{ dB para } \gamma = 4 \quad (7.3)$$

Este plano todavia, permite somente o crescimento horizontal ou vertical, sendo de aplicação restrita, por exemplo para zonas costeiras ou ao longo de rodovias.

7.3.4 - Plano de Reuso de Frequências $N = 7$ Setorizado em 120°

Este plano segue a mesma distribuição de canais do plano $N = 7$ omni, entretanto, cada setor recebe um dos 21 grupos de canais como ilustra a Figura 7.6.

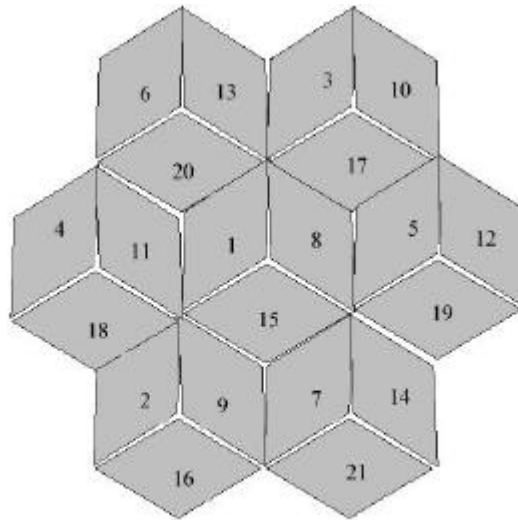


Figura 7.6 – Distribuição de canais no plano $N=7$ setorizado em 120°

Com a setorização tripla, a interferência co-canal proveniente do 1º anel será devido a somente duas células co-canais, podendo assim a relação sinal interferência (S/I) neste plano ser expressa por:

$$\frac{S}{I} \approx 10 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{D}{R} \right)^g \right] = 23,4 \text{ dB para } \gamma = 4 \quad (7.4)$$

Como pode ser verificado comparando as equações (7.2) e (7.4), a setorização reduz a interferência, fornecendo um ganho de 4,8 dB na relação S/I

para $\gamma = 4$. Entretanto, há uma perda de capacidade de tráfego por célula, como pode ser verificado comparando as tabelas 7.6 e 7.7.

Tabela 7.7 - Capacidade (Erlangs) para o plano de reuso $N = 7$ setorizado em 120°

Nº de canais por célula	GOS = 1%	GOS = 2%	GOS = 3%	GOS = 5%
44 (NES)	$3 \times 7,35 = 22$	$3 \times 8,2 = 24,6$	$3 \times 8,8 = 26,4$	$3 \times 9,73 = 29,19$
56 (ES)	$3 \times 10,4 = 31,2$	$3 \times 11,5 = 34,5$	$3 \times 12,2 = 36,6$	$3 \times 13,4 = 40,2$

7.3.5 - Plano de Reuso de Frequências $N = 9$ Omni (9/18)

Este plano de reuso é baseado em *clusters* formados por nove células, sendo então, o total de canais disponíveis igualmente divididos nas 9 células que os formam. Nesta configuração, são necessários apenas 18 canais de controle, podendo os 3 canais restantes ($21 - 18 = 3$) serem utilizados como canais de voz. Devido a esta característica, este plano de frequência é baseado na divisão do conjunto total de frequências disponíveis em 18 grupos de frequências, como mostram as tabelas 7.8a (Banda A) e 7.8b (Banda B). Este plano utiliza um esquema alternado de distribuição dos grupos de canais, formando arranjos (matrizes) de tamanho 3×3 de nove grupos de frequências. Observe que os canais de controle estão em fundo azul nas tabelas mencionadas.

Tabela 7.8a – Grupos de frequências da banda A, para o plano de reuso $N = 9/18$ Omni [3].

GRUPOS DE FREQUÊNCIAS																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
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	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162
163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198
199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	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	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324
325	326	327	328	329	330	331	332	333									
									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													
					991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003
1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021
1022	1023																

Tabela 7.8b – Grupos de frequências da banda B, para o plano de reuso $N = 9/18$ Omni [3].

GRUPOS DE FREQUÊNCIAS																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
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	

Para cada célula do *cluster* então, serão designados um total de 2 grupos de frequências. A distância de reuso neste plano é igual a $D = \sqrt{3 \times NR} = \sqrt{3 \times 9R} = 5,52R$. Ao contrário dos outros planos, este plano de frequência não tem canais adjacentes dentro do *cluster*. Conseqüentemente, o desempenho em relação à interferência de canal adjacente (ICA) deste plano é melhor que qualquer dos planos existentes, sendo portanto, bem adequado para sistemas TDMA.

A Figura 7.7 mostra um exemplo da designação alternada de canais para este plano considerando nove grupos de frequências:

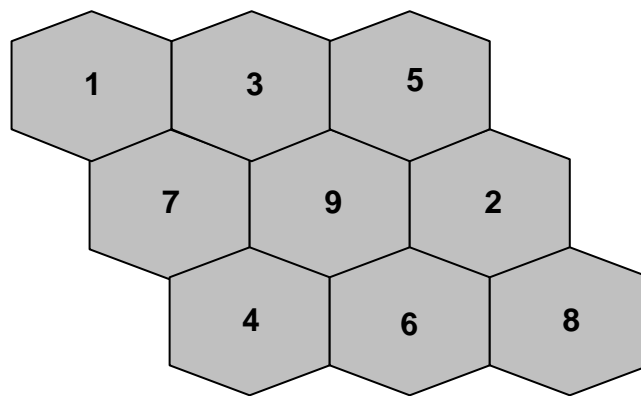


Figura 7.7 – Plano de reuso $N=9$ (9/18)

Esta configuração (*cluster* de $N=9$), apresenta a característica de que o 1º anel interferente é formado por quatro células co-canal. Então, a relação sinal interferência (S/I) neste plano considerando apenas o 1º anel interferente pode ser expresso por:

$$\frac{S}{I} \approx 10 \log \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{R} \right)^g \right] = 22,6 \text{ dB para } \gamma = 4 \quad (7.5)$$

7.3.5.1 - Capacidade no Plano de Reuso de Frequências $N=9$ *Omni*.

Como neste plano são necessários somente 18 canais de controle, os 3 canais restantes podem ser usados como canais de voz. Então, o número de canais de voz na banda não-expandida (NES) será igual a 315 (333-18) e atingirá um valor de 398 canais (416-18) para a banda expandida (ES). Assim, a capacidade de deste plano pode ser computada conforma mostrado na tabela 7.9:

Tabela 7.9 – Capacidade (Canais/célula e Erlangs) para o plano de reuso $N = 9$ Omni

Banda	Capacidade (canais/célula)	Capacidade (Tráfego) para GOS = 2%
NES	$315/9 = 35$	26,4 Erl
ES	$398/9 \approx 44$	34,7 Erl

7.3.6 - Plano de Reuso de Frequências $N=12$ Omni (12/24)

Este plano de reuso é baseado em *clusters* formados por doze células, isto equivale dizer que o total de canais disponíveis são igualmente divididos nas 12 células que os formam. Neste plano, faz-se uso dos mesmos grupos de frequências utilizados no plano Omni 4/24, porém, apenas 2 grupos de frequências são designados para cada uma das 12 células do *cluster* [1]. A Figura 7.8 mostra um exemplo da designação de canais para este plano considerando doze grupos de frequências:

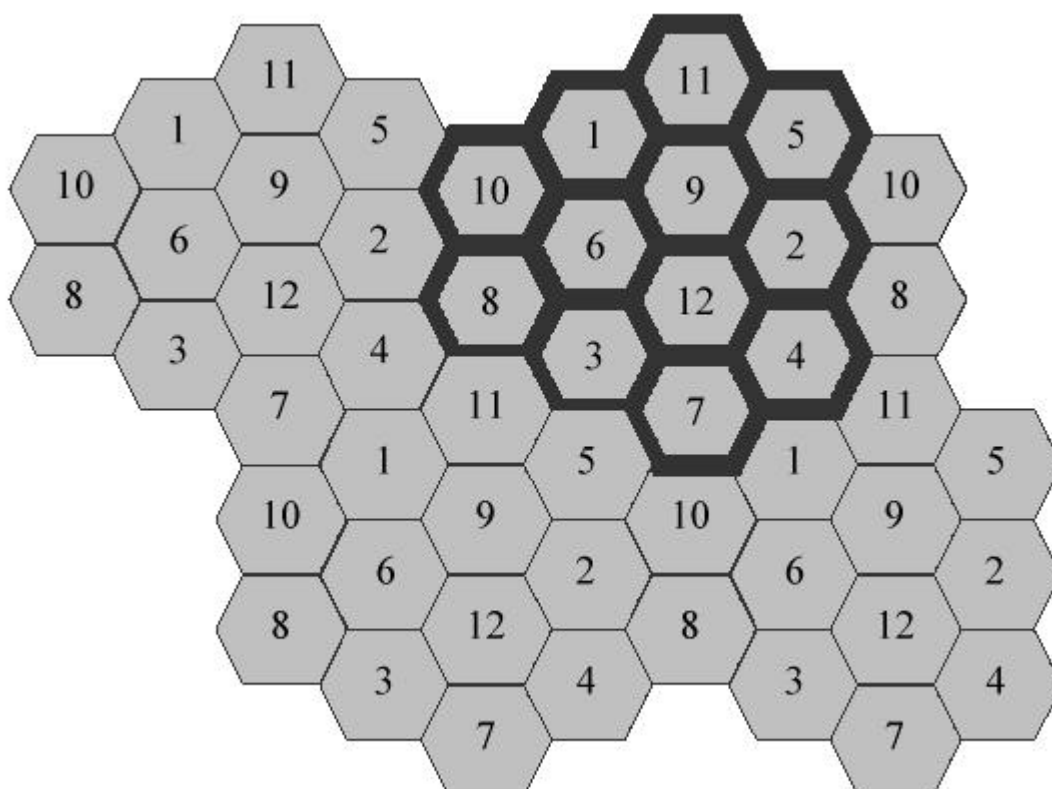


Figura 7.8 – Plano de reuso $N=12$ (12/24)

A distância de reuso neste plano é igual a $D = \sqrt{3 \times NR} = \sqrt{3 \times 12}R = 6R$. Então, a relação sinal interferência (S/I) neste plano considerando apenas o 1º anel interferente pode ser expressa por:

$$\frac{S}{I} \approx 10 \log \left[\frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^6 \right] = 23,34 \text{ dB para } \gamma = 4 \quad (7.6)$$

7.3.6.1 - Capacidade no Plano de Reuso de Frequências $N=12$ Omni

A tabela 7.10 apresenta a capacidade para o plano de reuso $N = 12$ para diferentes graus de serviço e para as duas bandas (expandida - *ES* e a não expandida - *NES*).

Tabela 7.10 – Capacidade (Erlangs) para o plano de reuso $N = 12$ Omni

Nº de canais por célula	GOS = 1%	GOS = 2%	GOS = 3%	GOS = 5%
26 (NES)	17	18,4	19,4	21
32 (ES)	22	23,7	25	26,7

CAPÍTULO 8

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS CELULARES

8.1 - INTRODUÇÃO

O planejamento de sistemas móveis celulares dentre vários aspectos objetiva principalmente definir um plano de reuso e uma distribuição de canais por célula que atenda a demanda de tráfego e posicionar estações rádio bases (ERBs) que garantam a cobertura de uma área especificada respeitando os limites de interferências e de qualidade do sistema. Outros aspectos estão fora do controle do projetista e são estudados como estratégia de implementação.

O projeto de um sistema pode ser dirigido pela tecnologia. Desta forma as características do sistema são ditadas pela tecnologia e equipamentos disponíveis no mercado. Isto traz a grande vantagem de um cronograma de implementação curto. Por outro lado o usuário deve adaptar suas necessidades aos equipamentos existentes.

Em uma outra abordagem, o projeto dirigido pelas aplicações busca o entendimento das necessidades do usuário. As atenções estão voltadas para o grau de serviço (GOS) esperado, a qualidade de serviço (QoS) contratada, o tipo de informação a ser trafegada, largura de faixa disponível ao usuário, a privacidade na comunicação, as características do tráfego da informação (velocidade, duração, atraso), etc.

Para fins de custo procura-se projetar um do sistema celular com a quantidade mínima de ERBs cobrindo a área definida, GOS e qualidade compatíveis com o anseio do usuário. Deve-se considerar que as áreas de maior tráfego devem ter maior atenção no projeto. Os parâmetros como área efetivamente coberta, GOS, grau de mobilidade e qualidade do sinal recebido são conceitos relevantes quando a satisfação do usuário é o fim.

8.2 - ETAPAS DO PLANEJAMENTO

O processo de planejamento de sistemas móveis não é estático, ou seja, não existem etapas ordenadas definidas para sua execução, entretanto, alguns passos são considerados de grande importância e podem servir de base para o projeto inicial. Tais passos são mostrados na Tabela 8.1:

Tabela 8.1 – Passos do Planejamento de Sistemas Celulares

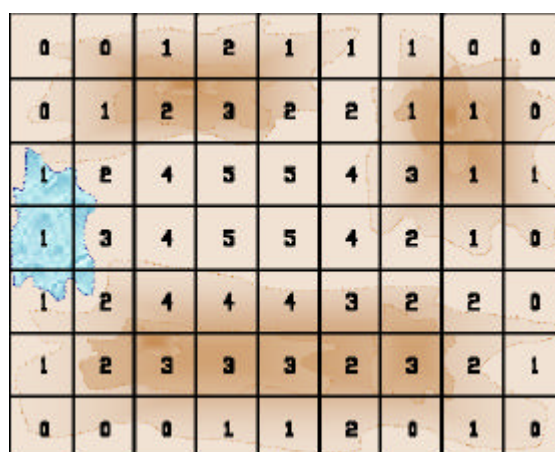
Passos do Planejamento	
1º	- Determinação de um mapa de tráfego;
2º	- Determinação da área de serviço do sistema em função da distribuição de tráfego determinado no passo anterior;
3º	- Determinação do modelo de predição a ser utilizado;
4º	- Realização de testes de campo para ajustes locais do modelo de propagação;
5º	- Cálculo do raio máximo da célula em função das características do equipamento e da topografia e morfologia da região;
6º	- Superposição da grade celular hexagonal no mapa de tráfego já determinado;
7º	- Contagem de tráfego por célula;
8º	- Determinação do número de canais necessários por célula;
9º	<ul style="list-style-type: none">- Para sistemas analógicos e digitais TDMA: Definição de um plano de reuso que atenda a demanda de tráfego respeitando os limites de interferência do sistema. Caso contrário, deverá ser realizado o redimensionamento do raio das células e retorno à contagem de tráfego;- Para sistemas digitais CDMA: Verificação se a capacidade <i>soft</i> do sistema suporta a demanda de tráfego respeitando os limites de interferência e qualidade do sistema (BER). Caso contrário, deverá ser realizado o redimensionamento do raio das células e retorno à contagem de tráfego;
10º	- Determinação da cobertura rádio-elétrica para verificar regiões de sombra e níveis de interferência;
11º	- Caso o resultado seja satisfatório o planejamento está concluído, caso contrário é necessário redimensionar o raio das células e recomeçar a partir da contagem de tráfego.

O procedimento descrito acima, e a própria seqüência de passos apresentada, não precisa ser seguido rigorosamente e, em geral, não o é. A execução do projeto envolve variações e está submetida a condições de natureza prática, a procedimentos específicos utilizados pela empresa e pelo projetista, às características da região a ser coberta e à quantidade e precisão das informações disponíveis.

8.2.1 - Determinação do Mapa de Tráfego

Um das primeiras tarefas do projetista no processo de planejamento celular consiste em iniciar seus estudos pela estimação do volume e perfil do tráfego na região de concessão para a exploração do serviço de comunicação móvel celular. Para isto, um grupo responsável pela pesquisa de mercado deve apresentar informações precisas sobre a distribuição do tráfego na região, incluindo estudos em Hora de Maior Movimento (HMM). Conforme já descrito no Capítulo 6, a definição da distribuição do tráfego da região de interesse é geralmente determinada a partir de dados da distribuição de densidade populacional e de outros fatores relevantes como distribuição de renda e tipo de atividade econômica. Usa-se portanto, o conceito de intensidade de tráfego para associar todos estes dados.

Estes estudos podem ser apresentados, por exemplo, em forma de mapa geográfico, apresentando a região estudada dividida em quadrículas, cada qual contendo sua respectiva densidade de tráfego média e/ou em HMM, conforme mostrado na Figura 8.1. Para o projeto de áreas urbanas utiliza-se quadrículas de área em torno de 4 km².



0	0	1	2	1	1	1	0	0
0	1	2	3	2	2	1	1	0
1	2	4	5	5	4	3	1	1
1	3	4	5	5	4	2	1	0
1	2	4	4	4	3	2	2	0
1	2	3	3	3	2	3	2	1
0	0	0	1	1	2	0	1	0

Figura 8.1 - Levantamento local do perfil do tráfego

Outro procedimento importante é associar às quadrículas o seu fator de mobilidade, ou seja, tais volumes de tráfego podem sofrer variações devido a mobilidade do sistema. É comum estimar este fator na ordem de 8% a 20%.

8.2.2 - Determinação da Área de Serviço do Sistema

A definição da área geográfica que será atendida pelo serviço de comunicação móvel celular leva em consideração tanto o volume de tráfego a ser atendido quanto a relevância de atender regiões com baixo volume de tráfego. Restringir a área de serviço a regiões com alto volume de tráfego pode trazer insatisfação aos assinantes do serviço por considerarem este com pouca mobilidade. Se por um lado as áreas de serviço extensas oferecem grande mobilidade aos usuários, por outro, quanto maior a área, maior a quantidade de estações a serem utilizadas, mais caro fica a implantação do sistema. Daí a importância de se obter informações sobre perfil do assinante.

A determinação do número de ERBs necessária ao sistema depende, além da definição da área de serviço, também do número máximo canais por ERB e das condições de propagação do sinal de rádio móvel nas determinadas regiões do sistema. A Figura 8.2 mostra a título de exemplo a definição da área de serviço do sistema considerando o mapa de tráfego da Figura 8.1.

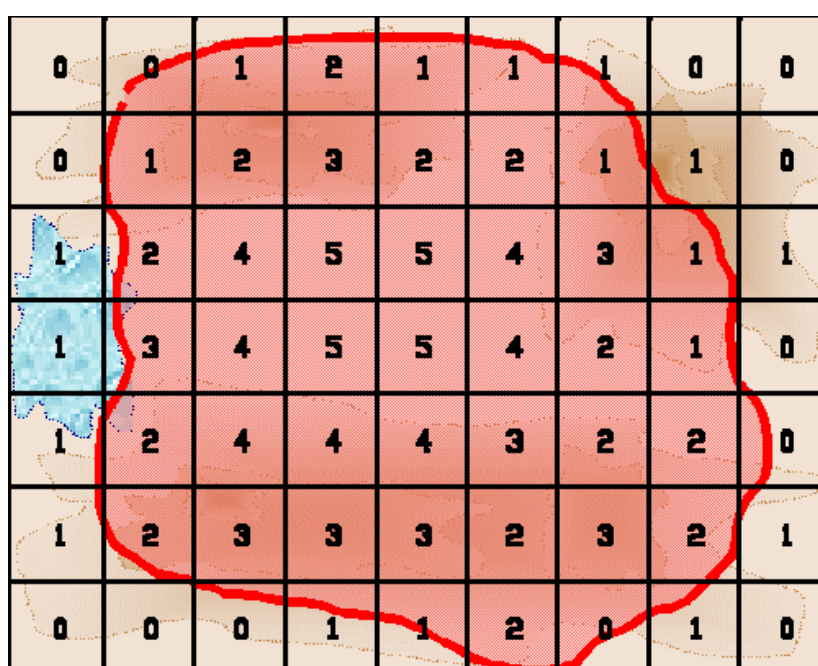


Figura 8.2 - Definição da área de serviço do sistema.

8.2.3 - Determinação do Modelo de Predição

A precisão do modelo de propagação utilizado no processo de planejamento celular é de fundamental importância para a execução de um projeto eficiente, tanto do ponto de vista da qualidade do sistema como sob o aspecto de custos de implantação. Para isto, torna-se necessário algum método de avaliação do modelo de predição a ser utilizado. Para se fazer esta avaliação, pode-se realizar campanhas de medição na área de interesse e avaliar o desempenho de cada modelo frente às medidas. Esta avaliação consiste na comparação quantitativa das estatísticas do erro de cada modelo em relação aos valores medidos. Esta análise foi descrita detalhadamente no Capítulo 4.

8.2.4 - Campanhas de Medições

É importante enfatizar que na prática o modelo selecionado é utilizado somente para o pré-projeto, sendo que antes da execução do projeto definitivo, um grande número de novas campanhas de medições são realizadas na região a ser coberta, com a finalidade principal de minimizar o erro de predição. Normalmente utiliza-se estas campanhas no ajuste do modelo escolhido.

Para a realização destes testes (campanhas), é necessário uma equipe especializada para manusear e programar equipamentos como computador, *scanner* de frequência, equipamento GPS (*Global Position System*) e analisador de espectro. As ERBs são simuladas com o uso de transmissores em torres provisoriamente instaladas nos locais pré-definidos. Os sinais transmitidos são capturados por rádio receptores. A equipe de teste circula em torno da região com veículos equipados com os equipamentos já citados gravando os parâmetros dos sinais recebidos e sua localização.

São estes testes que apontam o real comportamento do sistema e assim são feitos os ajustes finos nos modelos.

8.2.5 - Cálculo do Raio Máximo das Células

A determinação do raio máximo das células é baseada no balanço de potência (*Link Power Budget*) do sistema. Este balanço tem a propriedade de determinar se as margens de potência são suficientes para o funcionamento perfeito do sistema, sendo capaz de avaliar se o sinal transmitido atenuado no percurso pode alcançar o receptor no limite da célula (raio máximo) com uma potência maior que a mínima potência detectável.

Considerando o modelo de predição generalizado descrito no Capítulo 5, o raio máximo das células pode ser determinado pela equação (5.9), repetida aqui por conveniência:

$$R = d_{\max} = 10^{\frac{L_{\max} - L_0}{10g}} \quad (8.1)$$

onde L_{\max} representa a máxima perda de propagação admissível para o sistema, g e L_0 dependem do modelo considerado, das características do terreno e da morfologia da região e da frequência de operação. O parâmetro g representa a taxa de variação da perda com a distância, assumindo normalmente valores entre 2 (espaço livre) e 5 (áreas fortemente urbanizadas).

É importante ressaltar que o cálculo deve ser realizado tanto para o enlace de descida ou *down-link* (estação rádio base - unidade do usuário) como para o enlace de subida ou *up-link* (unidade do usuário - estação rádio base), pois os terminais tem, em geral características distintas. Adota-se o menor raio obtido que, em geral, corresponde ao enlace de subida.

A descrição completa para a determinação do raio máximo foi descrita no Capítulo 5.

8.2.6 - Projeto de Tráfego nos Sistemas Celulares

O projeto de tráfego nos sistemas celulares consiste em uma das principais etapas no processo do planejamento celular, pois realiza duas funções básicas:

- contagem de tráfego por célula (considerando células com raio igual ao raio máximo determinado anteriormente) e
- determinação do número de canais necessários por célula;

Este projeto compreende o 6º, 7º e o 8º passo das etapas do planejamento celular mostradas na Tabela 8.1. A completa descrição sobre o projeto de tráfego foi descrita no Capítulo 6.

8.2.7 - Definição do Plano de Reuso

O plano de reuso deve ser escolhido de modo a atender o limite de relação sinal-interferência que garanta o requisito de qualidade do sistema e, ao mesmo tempo, assegurar um número de canais por célula que permita o escoamento da demanda de tráfego. É preciso considerar basicamente dois fatores [1]:

1º - Quanto menor a razão de reuso q maior o número canais por célula, acarretando maior capacidade de tráfego para um dado grau de serviço. Como já descrito no Capítulo 6, o grau de serviço do sistema pode ser expresso como:

$$GOS = \frac{T^n e^{-T}}{n!} \quad (8.2)$$

onde

$$n = \frac{M}{N_T} = \frac{3M}{q^2}$$

n = número de canais por célula;

M = número total de canais;

N_T = número máximo de células por *cluster* para atender o tráfego

2º - Quanto maior a razão de reuso q menor a interferência co-canal e, conseqüentemente, melhor a qualidade de transmissão. Considerando apenas o 1º anel interferente, a relação sinal-interferência (S/I) pode ser expressa por:

$$\frac{S}{I} = \frac{q^6}{6}; \quad 2 \leq \gamma \leq 5; \quad \text{onde } q = \sqrt{3N_I} \quad (8.3)$$

Através da equação (8.2) determina-se o número n mínimo de canais por célula para atender a demanda de tráfego T com o grau de serviço GOS desejado. Conhecido o número total M de canais disponíveis, pode-se determinar o número máximo N_T de células por *cluster* associado ao tráfego. Entretanto, a equação (8.3) estabelece o número mínimo de células por *cluster* N_I para atender o requisito de relação sinal interferência do sistema. Se $N_I < N_T$, o projetista pode escolher qualquer valor inteiro N no intervalo $N_I < N < N_T$ para o número de células por *cluster*. Se $N_I > N_T$ é necessário fazer o número de células por *cluster* igual ao menor inteiro maior ou igual a N_I de modo a manter a interferência dentro do limite aceitável. Neste caso, a demanda de tráfego não será atendida, sendo necessário aceitar um grau de serviço maior que o originalmente desejado ou reduzir o raio da célula de modo a diminuir o número de usuários e, conseqüentemente, a demanda de tráfego por célula. É importante ressaltar que, a redução do raio da célula por um fator Δr reduzirá sua área de cobertura por um fator $(\Delta r)^2$, aumentando significativamente o número de ERBs necessária e, como conseqüência, o custo do sistema.

Considerando uma constante de propagação $\gamma = 4$ e um GOS=2% a Figura 8.3 mostra a relação entre a S/I (dB), a capacidade (Erlangs) e o número de canais por célula em função do plano de reuso de frequência omni N .

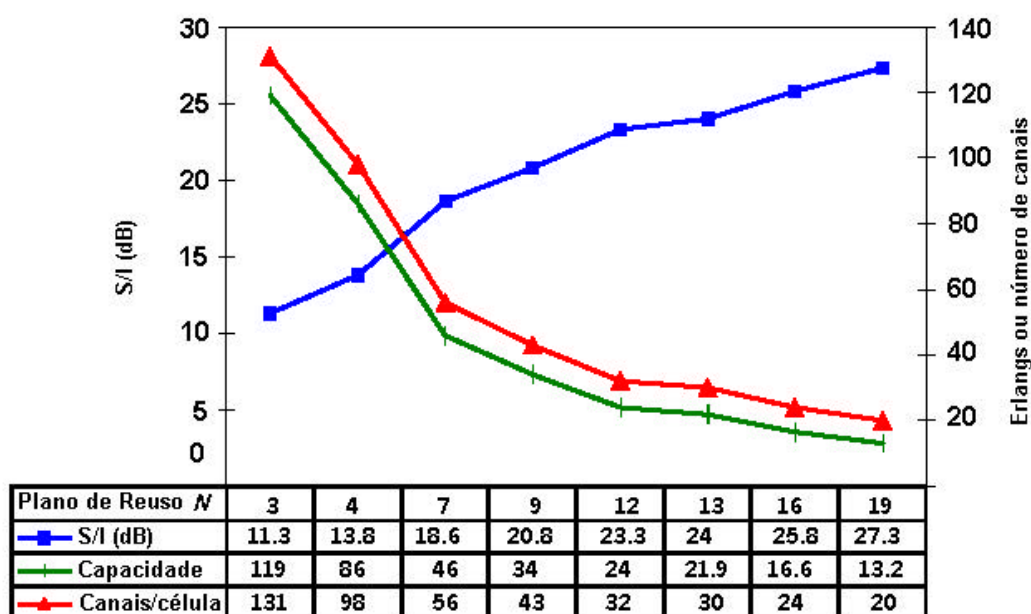


Figura 8.3 - S/I , capacidade e número de canais por célula em função do fator de reuso [1]

Para efeito de exemplo, se em um determinado projeto de tráfego determinou-se que o maior número de canais necessários por célula foi 24, ou em outras palavras, determinou-se que o número mínimo de canais por célula para atender a demanda de tráfego T com o grau de serviço GOS desejado foi igual a 24, tem-se para este caso a possibilidade de se usar o plano $N = 16$. Caso isto seja insatisfatório do ponto de vista de interferências, será necessário reduzir o raio da célula para diminuir o tráfego por célula ou alternativamente, permanecer com o mesmo raio, porém aceitar um grau de serviço mais elevado. É importante lembrar da implicação que resulta da redução de raio por um fator Δr . Por outro lado, se o limite para a relação sinal-interferência do sistema for inferior a 25,8 dB neste exemplo, deve-se utilizar um fator de reuso menor, permitindo futuro crescimento do tráfego no sistema. Considerando o sistema AMPS, onde o limite da relação S/I é normalmente fixado em 18 dB, seria possível utilizar neste exemplo o plano de reuso $N=7$.

O valor da relação sinal-interferência S/I depende, além do plano de reuso N , do grau de urbanização. A tabela 8.2 mostra a relação S/I em função de γ para diferentes planos de reuso. O mesmo tipo de resultado é mostrado na Figura 8.4, enquanto que a Figura 8.5 ilustra o efeito da setorização.

Tabela 8.2 - Interferências, plano de reuso e urbanização [1]

Omni					
γ	$N = 4$	$N = 7$	$N = 9$	$N = 12$	$N = 19$
2	3.0	5.4	6.5	7.8	9.8
2.5	5.7	8.7	10.1	11.7	14.2
3	8.4	12.1	13.7	15.6	18.6
3.5	11.1	15.4	17.3	19.5	22.9
4	13.8	18.7	20.8	23.3	27.3
4.5	16.5	22.0	24.4	27.2	31.7
3 Setores					
γ	$N = 4$	$N = 7$	$N = 9$	$N = 12$	$N = 19$
2	7.8	10.2	11.3	12.6	14.5
2.5	10.5	13.5	14.9	16.4	18.9
3	13.2	16.8	18.5	20.3	23.3
3.5	15.9	20.1	22.0	24.2	27.7
4	18.6	23.4	25.6	28.1	32.1
4.5	21.3	26.7	29.2	32.0	36.5
6 Setores					
γ	$N = 4$	$N = 7$	$N = 9$	$N = 12$	$N = 19$
2	10.6	13.0	14.1	15.4	17.4
2.5	13.3	16.3	17.7	19.3	21.8
3	16.0	19.7	21.3	23.2	26.2
3.5	18.7	23.0	24.9	27.1	30.5
4	21.4	26.3	28.4	30.9	34.9
4.5	24.1	29.6	32.0	34.8	39.3

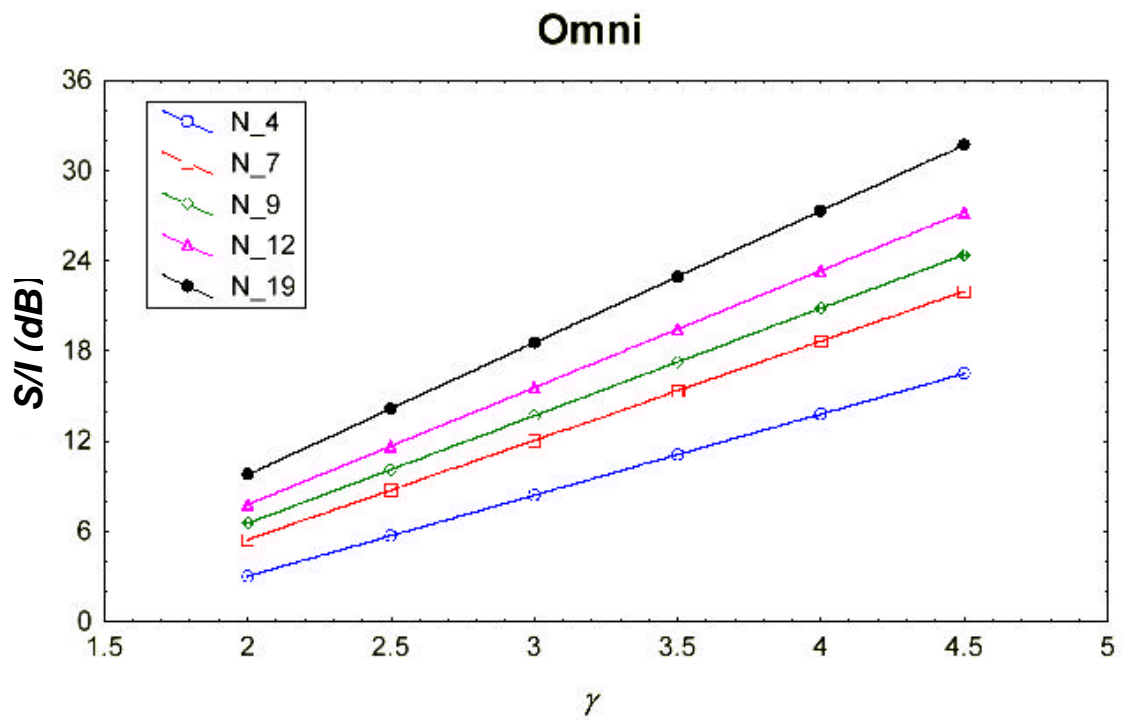


Figura 8.4 - Interferências, plano de reuso e urbanização [1]

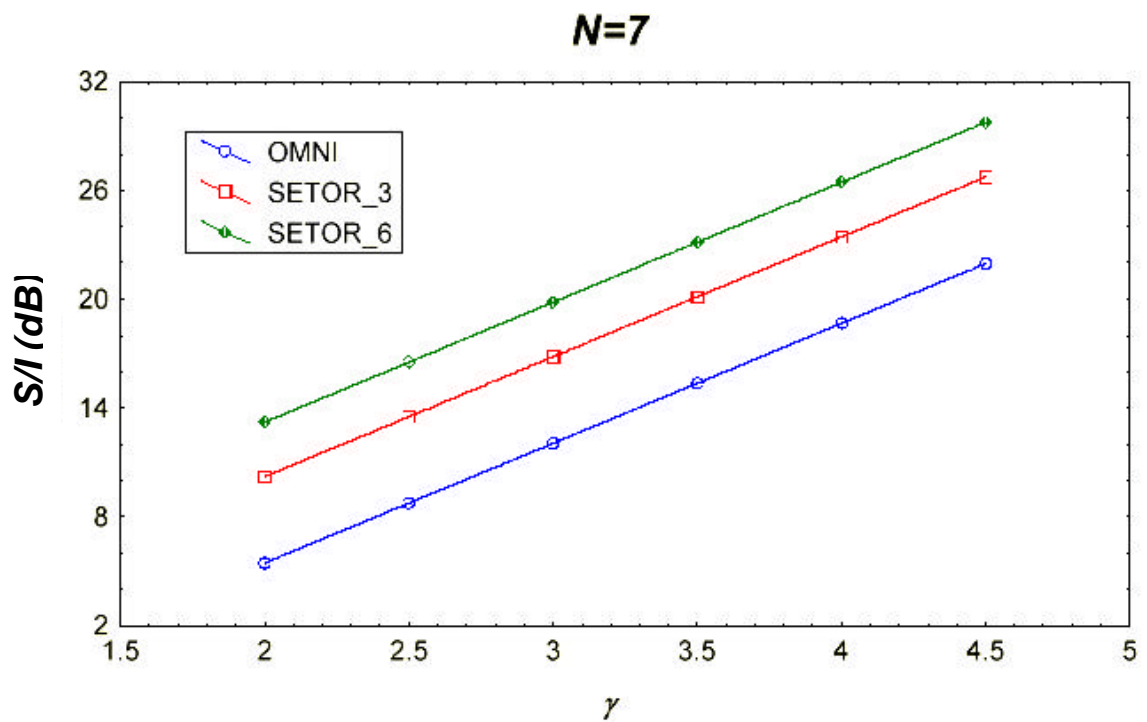


Figura 8.5 - Interferências, setorização e urbanização [1]

Quanto maior o grau de urbanização, maior o valor de γ e, conseqüentemente, maior será a relação sinal-interferência S/I . Em regiões mais urbanizadas é possível atender um determinado requisito de S/I com um menor fator de reuso, oferecendo uma maior capacidade de tráfego. Em regiões menos urbanizadas (suburbanas e/ou rurais), que apresentam um menor valor de γ , os níveis de interferência são mais elevados porém, em compensação, a demanda de tráfego é menor. Assim, é possível utilizar maiores fatores de reuso de modo a atender o requisito de S/I . Esta situação é mostrada esquematicamente, na Figura 8.6.

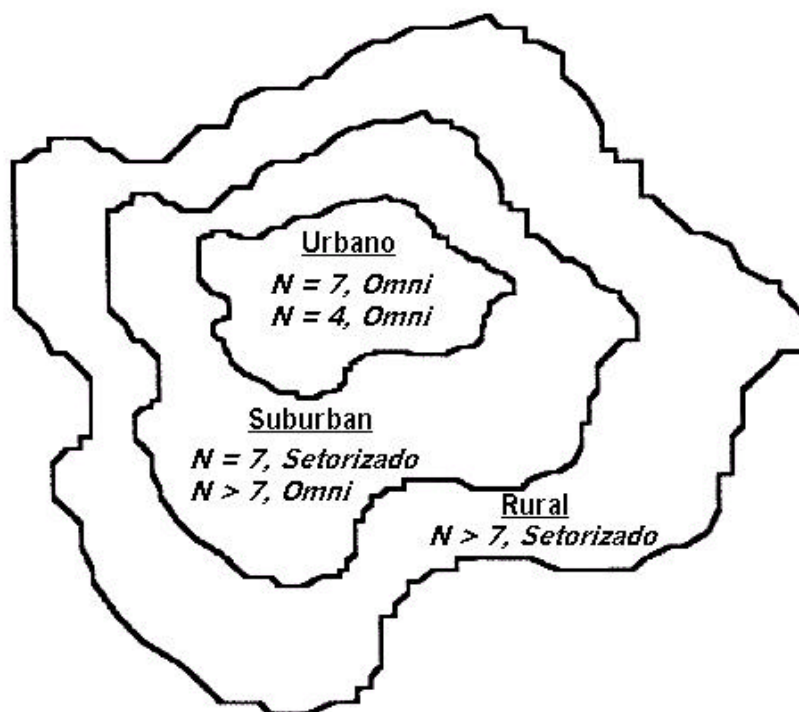


Figura 8.6 - Plano de reuso, setorização e urbanização

Deve-se observar que, no caso dos modelos mais utilizados para o cálculo de cobertura como o de Okumura-Hata e o de Walfisch-Ikegami, o grau de urbanização não influencia diretamente o valor da constante de propagação γ . Nestes modelos, o valor de γ é função da altura da antena transmissora (no método de Hata) e da altura da antena transmissora e dos prédios próximos a ela (método de Walfisch-Ikegami). Estes fatores refletem apenas indiretamente o grau de urbanização, visto que em regiões mais urbanizadas é, em geral, possível utilizar antenas mais elevadas reduzindo o valor de γ como será visto a seguir. Embora na

prática, como já mencionado, o modelo de propagação utilizado para o projeto final seja em geral ajustado para a região ou regiões específicas em que será utilizado, é interessante examinar a variação do fator γ nos métodos padrão. As expressões pertinentes para os métodos citados são as seguintes [1]:

- para os métodos de Hata

$$g = 4.49 - 0.655 \log h_b \quad (8.4)$$

- para o método de Walfisch-Ikegami / COST 231 (NLOS)

$$g = 2 + 0.1 k_d = 3.8 - 1.5 \frac{h_b - h}{h} \quad (8.5)$$

onde: h_b é a altura efetiva da antena base e h é a altura média dos prédios

A Figura 8.7 mostra a dependência da relação S/I com a altura da antena base para os dois modelos de propagação citados acima.

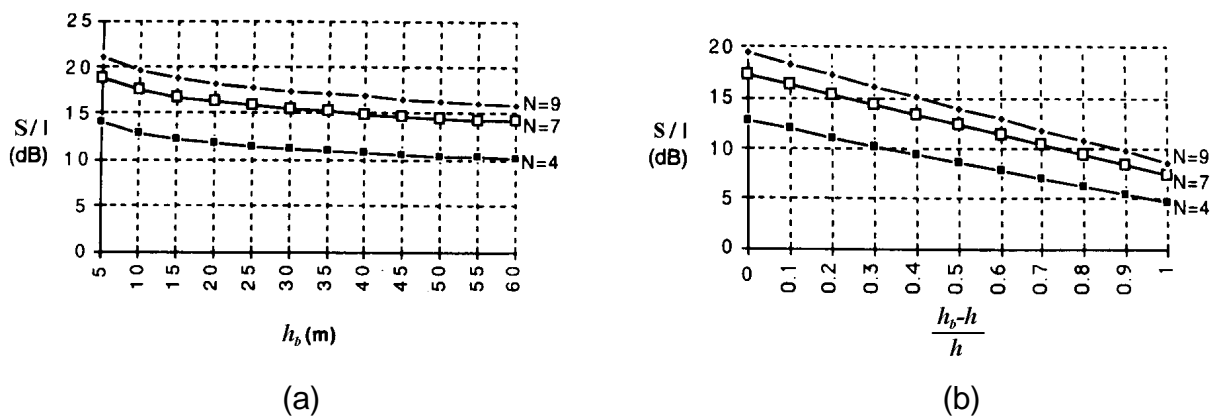


Figura 8.7 - S/I em função da altura da antena base para os modelos:

(a) Okumura-Hata (b) Walfisch-Ikegami / COST 231 [3]

8.2.8 - Aspectos do Planejamento de Sistemas CDMA

O planejamento de sistemas baseados na técnica CDMA se difere em muitos aspectos em relação aos dos sistemas analógicos e dos digitais TDMA, pois como já mencionado no Capítulo 3, essa técnica apresenta características bem distintas.

No CDMA é necessário ter um rígido controle de potência de todos os usuários, para combater o problema *near-far* (perto-longe), ou seja, para evitar que um móvel afastado da base não consiga comunicação pelo fato de um móvel próximo à base estar despejando muita potência. Entretanto, um primeiro aspecto importante no planejamento CDMA é avaliar o desempenho do sistema quando não houver nenhum controle de potência, ou seja, avaliar seu grau de imunidade frente aos sinais considerados como interferência. Como a técnica foi originalmente desenvolvida para uso militar, é comum denotar a interferência como *jammer* (intruso), sendo então o grau de imunidade já citado denominado de característica *Antijam* (Anti-interferente) do sistema, que expressa a relação entre a potência média do sinal desejado P e a potência do sinal interferente J . Em termos matemáticos tem-se [12]:

$$\frac{J}{P} = \frac{W / R_b}{E_b / N_0} \quad (8.6)$$

onde

W : é a largura de banda utilizada

R_b : é a taxa de bits de informação

$\frac{E_b}{N_0}$: é relação entre a energia média por bit e a densidade espectral de ruído

Um importante parâmetro do sistema CDMA é a relação W / R_b , denotado de Ganho de Processamento PG . Tal parâmetro merece importância pelo fato de ter influência na determinação da capacidade e da qualidade de transmissão do sistema.

A margem de interferência (*Antijam*) pode ser estabelecida determinando-se o valor mínimo da relação E_b / N_0 necessária para suportar uma estabelecida probabilidade de erro média por bit do sistema (*BER*). Logo, tem-se que:

$$\left(\frac{J}{P} \right)_{dB} = PG_{dB} - (E_b / N_0)_{\min_{dB}} \quad (8.7)$$

A margem de interferência também pode ser expressa por:

$$\left(\frac{J}{P} \right)_{dB} = PG_{dB} - 20 \log k + 3 \quad (8.8)$$

onde k é o parâmetro que estabelece a probabilidade de erro através de:

$$P_e = BER = Q(k) \quad (8.9)$$

Como todos os sistemas comerciais de telefonia móvel em funcionamento que utilizam o CDMA seguem o padrão americano *IS-95*, o mesmo será adotado como referência para os cálculos subsequentes. Os valores típicos de alguns parâmetros deste padrão são:

$$W = 1,25 \text{ MHz} = 1,2288 \text{ Mbps}$$

$$R_b = 9,6 \text{ Kbps}$$

$$k = \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \text{ para as técnicas de modulação BPSK e QPSK (usuais no padrão IS-95)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 4 \text{ ou } \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} = 6 \text{ dB}$$

Para estes valores, a característica *Antijam* (margem de interferência) é aproximadamente de 15 dB (um fator de 30 em potência), ou seja, o sinal interferente deverá ter um nível de potência 15 dB mais forte que o do sinal desejado para que a qualidade do sinal seja afetada [12].

Outro aspecto importante no planejamento CDMA é que tais sistemas utilizam como padrão de reuso somente uma célula por *cluster*, pois todas as células utilizam as mesmas frequências portadoras de banda larga, dispensando-se assim, o planejamento de frequências. Apesar desta simplificação, é importante avaliar a capacidade do sistema sobre diversos fatores descritos a abaixo:

1º - A taxa de informação (R_b) utilizada implica no compromisso entre capacidade x qualidade de transmissão, ou seja, maiores taxas proporcionam uma menor capacidade do sistema, porém uma melhor qualidade de transmissão, enquanto que para menores taxas ocorre o inverso.

2º - Para a expansão de um sistema baseado em CDMA sem a necessidade de nenhuma alteração física do sistema, basta aceitar uma degradação do grau de serviço pelo o aumento do número de usuários no sistema, o que simplesmente aumenta a interferência total, porém apesar disto, estes sistemas apresentam uma capacidade muito superior aos sistemas analógicos.

3º - Existem diversos parâmetros adicionais que contribuem para o aumento ou decréscimo da capacidade dos sistemas CDMA, entre os mais importantes estão:

A Detecção da Atividade de Voz

Para uma típica conversação *full-duplex* de voz, o ciclo de trabalho (*duty cycle*) de cada voz é geralmente próximo de 40%. Esta propriedade é normalmente denominada de fator de atividade de voz e pode ser explorada pelos sistemas CDMA para aumentar a capacidade dos mesmos. Nos sistemas FDMA ou sistemas TDMA, o fator de atividade de voz é difícil de ser explorada devido ao fato de existir um atraso de tempo associado com a re-designação do recurso de canal durante as pausas de fala. Nos sistemas CDMA, esta exploração é feita através da redução da taxa de transmissão quando não há nenhuma fala, reduzindo-se assim substancialmente a interferência a outros usuários. Como o nível de interferência de outro usuário determina diretamente a capacidade, pode-se verificar que a capacidade do sistema é aumentada por aproximadamente um fator de dois. Isto também reduz potência média de transmissão requerida pela estação móvel por aproximadamente um fator de dois [12].

A Eficiência do Reuso de Frequência

No CDMA, o canal de banda larga é reusado em toda célula. A interferência total em uma célula (*cell site*) para um determinado sinal de uma estação móvel que esteja dentro de seu limite de cobertura é composta das interferências das outras estações móveis na mesma célula mais as interferências das estações móveis em células vizinhas. Para células omnidirecionais, tem-se na prática que a relação da interferência das estações móveis dentro de uma célula com a interferência total de todas as células é de aproximadamente 65%. Esta relação é definida como fator de eficiência do reuso de frequência [12].

A Setorização

A setorização de células CDMA é muito efetiva em aumento de capacidade que para sistemas FDMA faixa-estreita e sistemas TDMA. Nos sistemas analógicos e digitais TDMA, o planejamento de frequência deve levar em consideração o pior caso de interferência, que só é reduzida ligeiramente através da setorização. A interferência em sistemas CDMA afeta o planejamento por seu valor médio, não por seu pior caso. Isto conduz a uma vantagem significativa para o CDMA. Além disso, o aumento em interferência média devido a sobreposição de setor é pequeno, e é parcialmente eliminado através do ganho devido ao *soft-handoff* entre setores. O resultado é que a setorização de células CDMA com N setores aumentam a capacidade quase por N vezes. Cada setor tem aproximadamente a mesma capacidade independentemente do grau de setorização [12].

8.2.8.1 - Capacidade Soft CDMA

Os sistemas CDMA não apresentam uma capacidade bem definida, apresentando uma capacidade denominada de Capacidade *Soft*. Esta capacidade representa uma medida da máxima capacidade alcançável, sendo expressa por [12]:

$$N_s = 1 + \frac{PG}{E_b / N_0} \frac{F}{v} S \quad (8.10)$$

onde:

N_s : Capacidade em usuários simultâneos por célula

PG : Ganho de Processamento

S : nº de setores

n : ciclo de trabalho da voz (fator de atividade)

F : eficiência do reuso de frequência

Considerando $W = 1,25$ MHz, $R_b = 9,6$ Kbps, $n = 0,40$, $F = 0,65$ e $S = 3$, que são normalmente valores típicos adotados na prática, mostra-se através da Figura 8.8 a capacidade *soft* em função da relação E_b/N_0 . Nessa figura pode-se observar que o número total de usuários simultâneos é maximizado dependendo da relação E_b/N_0 mínima aceitável. Nela, pode-se verificar também que existem duas exigências contraditórias para a capacidade [3]:

- (1) Uma capacidade alta às custas de E_b/N_0 e
- (2) Uma alta relação E_b/N_0 às custas de capacidade.

Então, deve-se ter um compromisso entre alta capacidade e uma relação E_b/N_0 mínima para garantir uma determinada taxa de erro de bits (BER) de desempenho aceitável.

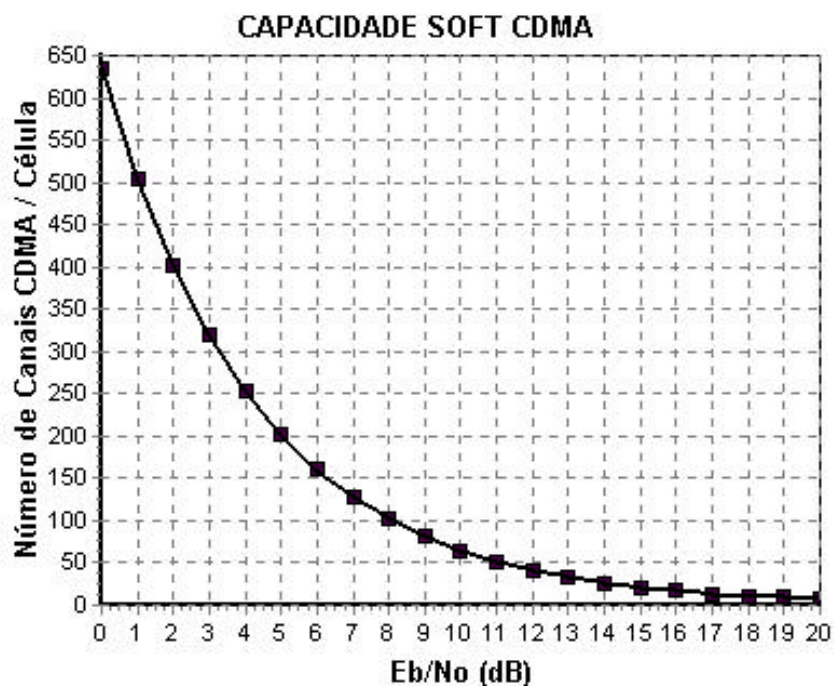


Figura 8.8 – Capacidade Soft CDMA.

8.3 - ASPECTOS ADICIONAIS DO PLANEJAMENTO

Nos tópicos anteriores, o processo básico do planejamento de sistemas móveis celulares foi abordado, entretanto, existem inúmeros aspectos adicionais que devem ser levados em consideração para a elaboração do projeto final. Neste tópico, tais aspectos serão comentados brevemente.

8.3.1 - Definição da Localização das ERBs

Um aspecto importante na implementação do sistema celular é o posicionamento das ERBs. Entretanto, a ERB que merece maior atenção é sempre a primeira, pois sua localização é normalmente determinada pela região de maior importância, ou seja, pela região que apresenta o maior volume de tráfego médio ou na HMM. Além disso, deve ser levado em consideração a disponibilidade de terrenos, infra-estrutura, Lei Municipal de uso do solo, plano urbanístico da cidade, etc .

A definição do raio da célula é feita através do Balanço de Potência (*Link Power Budget*) do sistema, levando em consideração a disponibilidade de canais para a ERB e o ambiente de propagação do sinal de rádio móvel.

Na prática, utiliza-se para realizar esta tarefa, algum ambiente computacional de simulação, onde se pode visualizar a melhor opção de posicionamento e respectiva área de cobertura da ERB, conforme mostrado na Figura 8.9.

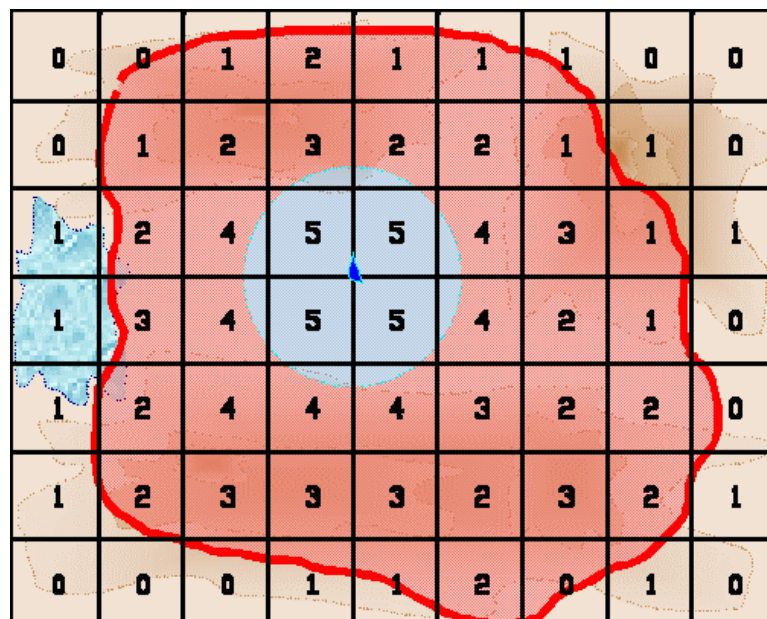


Figura 8.9 - Posicionamento da primeira ERB.

Estabelecida a localização da primeira ERB, o projetista deve localizar novas ERBs de forma a atender às regiões de maior tráfego em torno da célula da 1ª ERB. A localização destas novas ERBs, considerando que suas células de apresentem o mesmo raio da primeira, deve ser posicionadas em torno da original contemplando assim o padrão de reuso escolhido. Podem ser definidas células de tamanhos maiores para cobrir regiões com menor volume de tráfego. O investimento em potência é bem mais razoável que ter mais ERBs na região. Da mesma forma como foi realizado com a 1ª ERB, pode-se utilizar um ambiente computacional para determinar o efeito do posicionamento das demais ERBs, conforme mostrado na Figura 8.10:

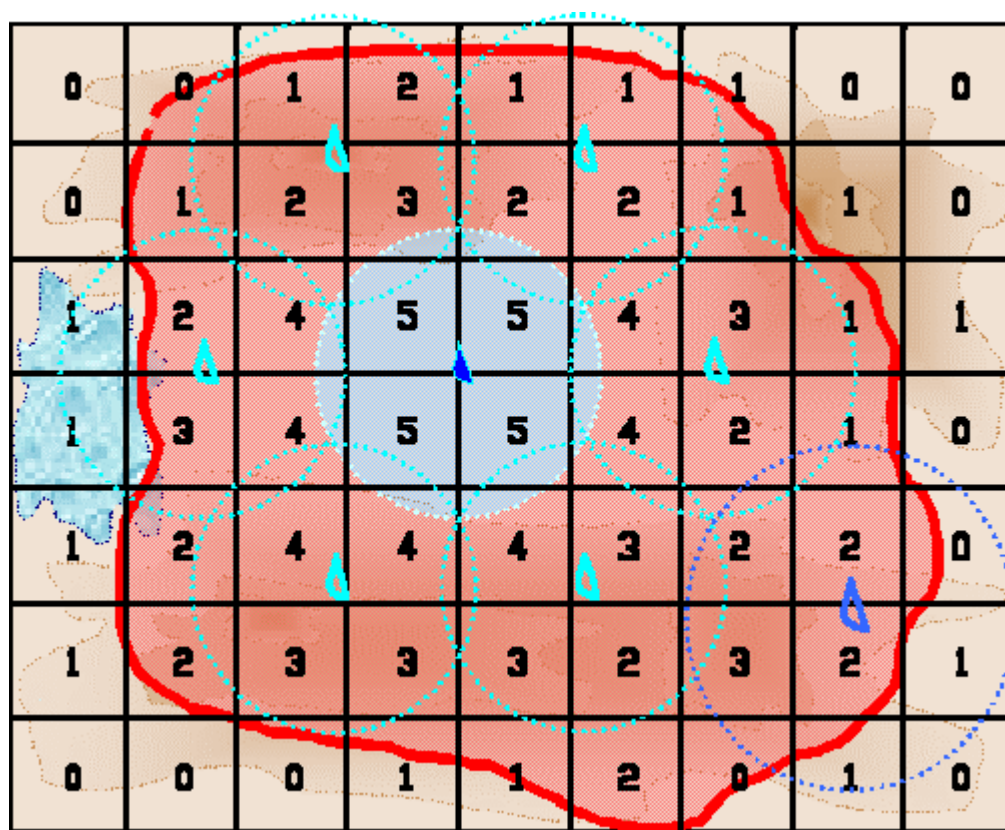


Figura 8.10 - Localização das ERBs.

8.3.2 - Predição de Cobertura

A partir das definições de localização das ERBs, raio das células e perfil do terreno, o projetista utiliza modelos de propagação do sinal de rádio móvel no dado ambiente e, através de métodos de predição de cobertura celular, estima a área realmente coberta por cada ERB.

Nas abordagens anteriores, foi considerado que a morfologia da célula apresenta uma estrutura circular ou hexagonal, podendo esta ser então modificada pelas simulações computacionais para simular os reais efeitos do terreno sobre o sinal rádio móvel, conforme mostrado na Figura 8.11.

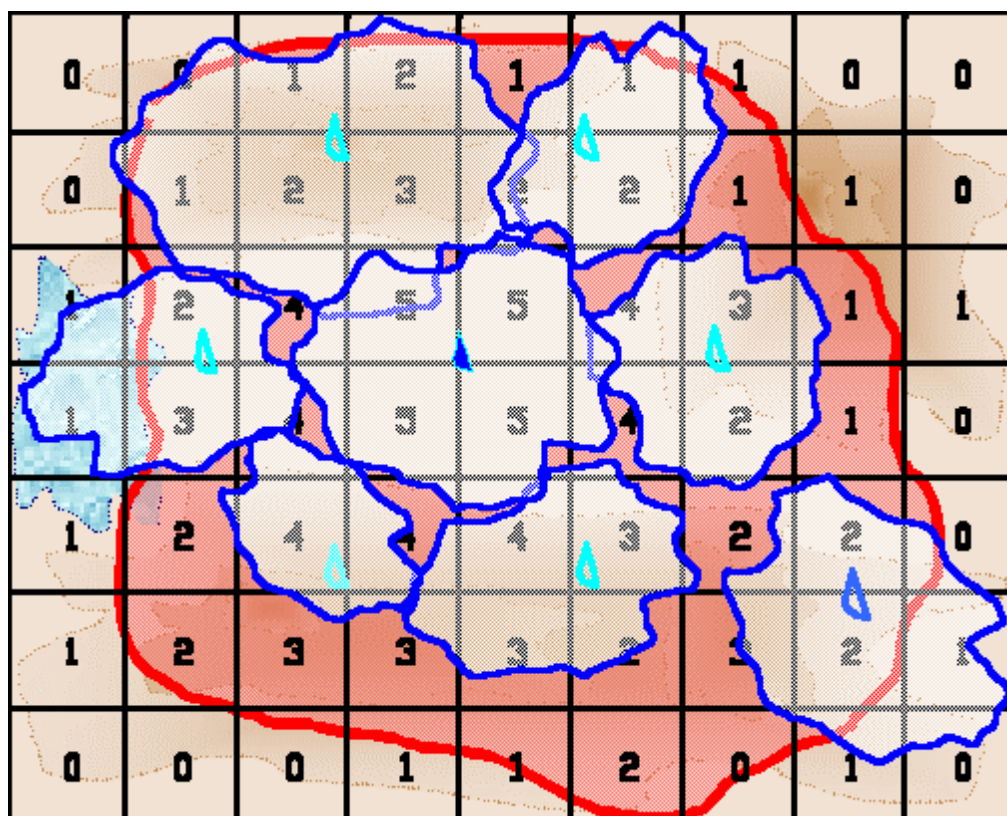


Figura 8.11 - Predição de cobertura.

8.3.3 - Reavaliação do Projeto

Os resultados obtidos da plataforma de predição dão uma primeira impressão no resultado do projeto. A partir destes resultados o projetista pode reavaliar tanto a posição das ERBs quanto o raio de suas células. Devem ser observados as sombras de cobertura e regiões com maior incidência de interferência co-canal. A célula pode ser totalmente remodelada por técnicas de setorização celular com antenas direcionais. Isto ajusta os setores para que atendam a área a ser coberta. Ajustes de altura de antena e potência de transmissão também são utilizados.

Todo sistema deve ser projetado para permitir expansões tanto em área atendida como em tráfego oferecido. O ambiente computacional faz a predição de cobertura celular e detecta as possíveis condições de interferências co-canal. A

partir deste resultado o projetista rearranja as ERBs de modo a evitar as condições de interferência. Após nova predição a equipe de projeto começa os levantamentos em campo. Observando-se a coerência no projeto inicia-se a implantação do sistema.

A Figura 8.12 mostra a título de exemplo uma possível redefinição das localizações das ERBs do exemplo anterior (Figura 8.11) com a finalidade de otimizar o sistema.

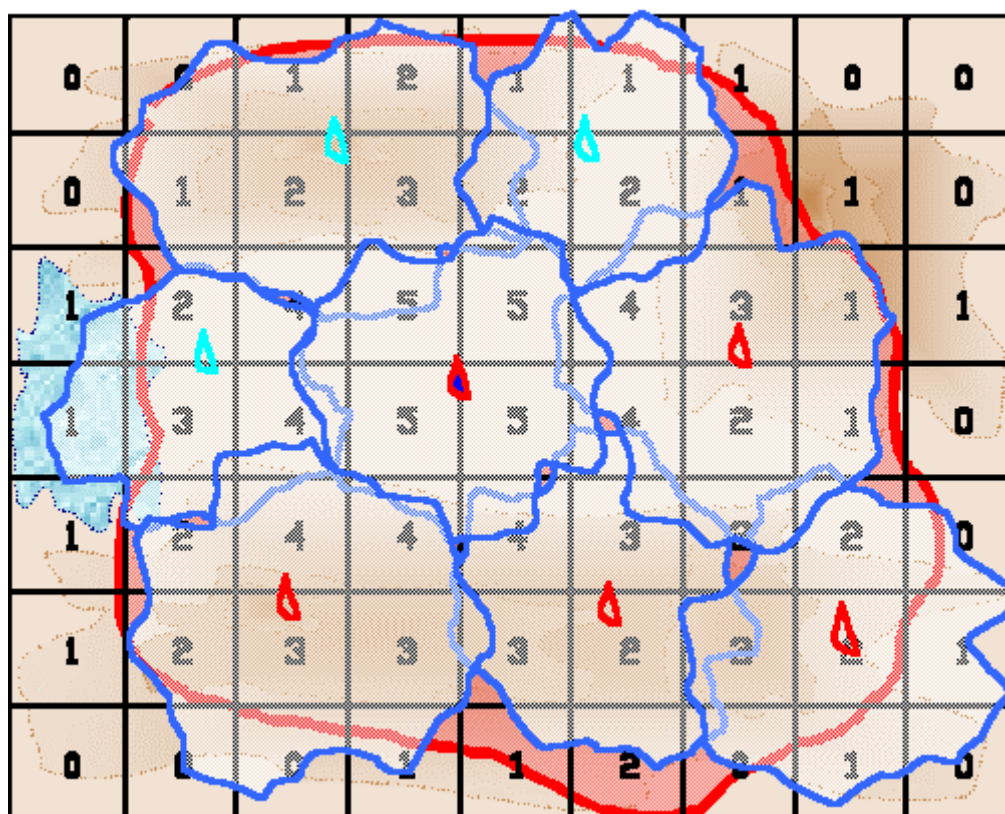


Figura 8.12 - Redefinição do projeto

8.3.4 - Aspectos da Comutação

A Central de Controle e Comutação é o cérebro do sistema de comunicação móvel celular. É composta basicamente de uma unidade de controle e uma unidade de comutação:

- A unidade de controle de uma CCC pode ser entendida como computador que controla funções específicas de um sistema de comunicação móvel celular, tal como alocação de frequência, controle do nível de potência das EMs, procedimento de *handoff*, controle de tráfego, rastreamento, localização,

tarifação e associação de canais são fatores de limitação do sistema. Portanto, a capacidade de processamento da unidade de controle nas CCCs deve ser maior que a de sistemas de telefonia fixa.

- A unidade de comutação é similar ao das centrais telefônicas fixas, mas seu processamento é deferente. Na comutação telefônica fixa, a duração da chamada não é fator relevante ao sistema, enquanto que em um sistema de comunicação móvel celular essa duração é função do gerenciamento dos canais e do número de *handoffs* processados.

Dois parâmetros são considerados no projeto dos sistemas de comutação: a **Acessibilidade** e a **Graduação**:

- A Acessibilidade representa a capacidade de tráfego de um grupo de canais determinada pelo número destes canais que podem ser atingidos pelas chamadas que ingressam no sistema de comutação. Esta é considerada Constante quando é igual em todos os instantes, Plena quando seu valor é constante e igual à quantidade de troncos do grupo de saída, e limitada em outra situação.
- A Graduação representa um esquema de interconexão de grupos de canais. Em uma CCC com Acessibilidade Limitada, canais de entrada são agrupados e associados a um grupo de canais de saída, formando um subgrupo de graduação. O aumento da capacidade de tráfego acontece quando há uma associação eficaz entre os canais de entrada no sistema de comutação e os subgrupos de saída.

8.3.5 - Implantação do Sistema

O processo de implantação do sistema projetado acompanha um cronograma de projeto bem definido, muito revisado e apresentado em uma estrutura analítica. Tal processo deve ter único coordenador técnico do início a fim. A equipe de projetistas do sistema (*Staff*), deve ser composta por profissionais competentes acompanhados de uma equipe de apoio compatível. É geralmente definida a seguinte linha de *Staff* ligada diretamente ao coordenador do projeto:

- Gerente Geral
- Gerente de Projeto
- Gerente de Infra-estrutura
- Gerente de Instalações/Testes
- Gerente de Operações

A Gerência de Projeto deve ter seu próprio organograma com definição dos níveis de chefia cada uma com seu próprio cronograma sincronizado com o cronograma de projeto. O cronograma de chefia são sempre atualizados com a emissão de relatórios mensais de progresso. A Gerência de Infra-estrutura é responsável pelas obras civis, energia, iluminação. A Gerência de Instalações e Testes é responsável pela instalação dos equipamentos e testes dos mesmos. A Gerência de Operações é responsável pela operacionalização do sistema.

CAPÍTULO 9

CELLP - SOFTWARE PARA PLANEJAMENTO DE SISTEMAS CELULARES

9.1 - INTRODUÇÃO

Redes Celulares são os sistemas de telecomunicações que mais cresceram e que mais crescerão em todo o mundo. Por isso, existe a necessidade dos estudantes de Engenharia com ênfase em telecomunicações ou até mesmo os profissionais da área desenvolverem uma sólida formação neste campo. Seguindo este raciocínio foi proposto um *software* denominado de CELLP. O ambiente computacional mencionado deve prover informações quanto ao planejamento de tais sistemas e servir de apoio às disciplinas que tratam de sistemas móveis celulares nos cursos de engenharia elétrica. Apesar deste *software* ter sido desenvolvido principalmente para fins educacionais, ele pode ser usado como base de um pré-projeto de um planejamento de um sistema móvel celular real.

9.2 - O AMBIENTE CELLP

O ambiente computacional CELLP foi desenvolvido na linguagem de programação orientada à objetos DELPHI 5.0 e pode ser considerado apenas como uma plataforma de fundo, ou seja, ele por si só não realiza nenhuma tarefa, e sim os vários sub-programas que o formam.

Cada sub-programa foi desenvolvido para realizar uma determinada tarefa referente a cada passo no processo de planejamento de sistemas móveis celulares, conforme já descrito no Capítulo 8. A Figura 9.1 mostra a janela principal do CELLP. Através dessa janela principal é possível acessar os diversos sub-programas bastando acionar os botões laterais.



Figura 9.1 – Ambiente do Software CELLP

A descrição das tarefas realizadas por cada sub-programa é mostrada na tabela 9.1:

Tabela 9.1 – Sub-Programas do CELLP versus Tarefas realizadas

Sub-Programa	Tarefa Realizada
Predict	Realiza estudos estatísticos para avaliar o desempenho dos modelos de predição frente a uma campanha de medições de uma determinada região
Radio Link	Realiza o Balanço-de-Potência do sistema, determinando o raio máximo de cobertura para os dois enlaces (<i>up-link</i> e <i>down-link</i>)
Traffic Tool	Realiza cálculos de tráfego, número de canais e de GOS
Traffic Design	Realiza o projeto de tráfego a partir de um mapa de tráfego potencial
Cell Site	Simula diversos efeitos na propagação do sinal em uma ERB

9.2.1 - Predict

O *software* Predict foi desenvolvido principalmente para realizar estudos estatísticos comparativos dos modelos de predição. Tal comparação visa avaliar o desempenho dos mesmos frente aos dados de uma campanha de medições realizada em uma determinada região. O ambiente deste programa é dividido em diversas paletas (abas) que são descritas a seguir:

Paleta “Parâmetros”: Nesta paleta, o usuário deverá fornecer os dados referentes aos parâmetros do sistema (potência transmitida, frequência, etc) que foram utilizados na campanha de medições de referência. O usuário também deve selecionar nesta paleta, os modelos que serão colocados sob avaliação assim como os parâmetros urbanos necessários para a aplicação dos mesmos. A Figura 9.2 mostra a título de exemplo uma possível configuração.

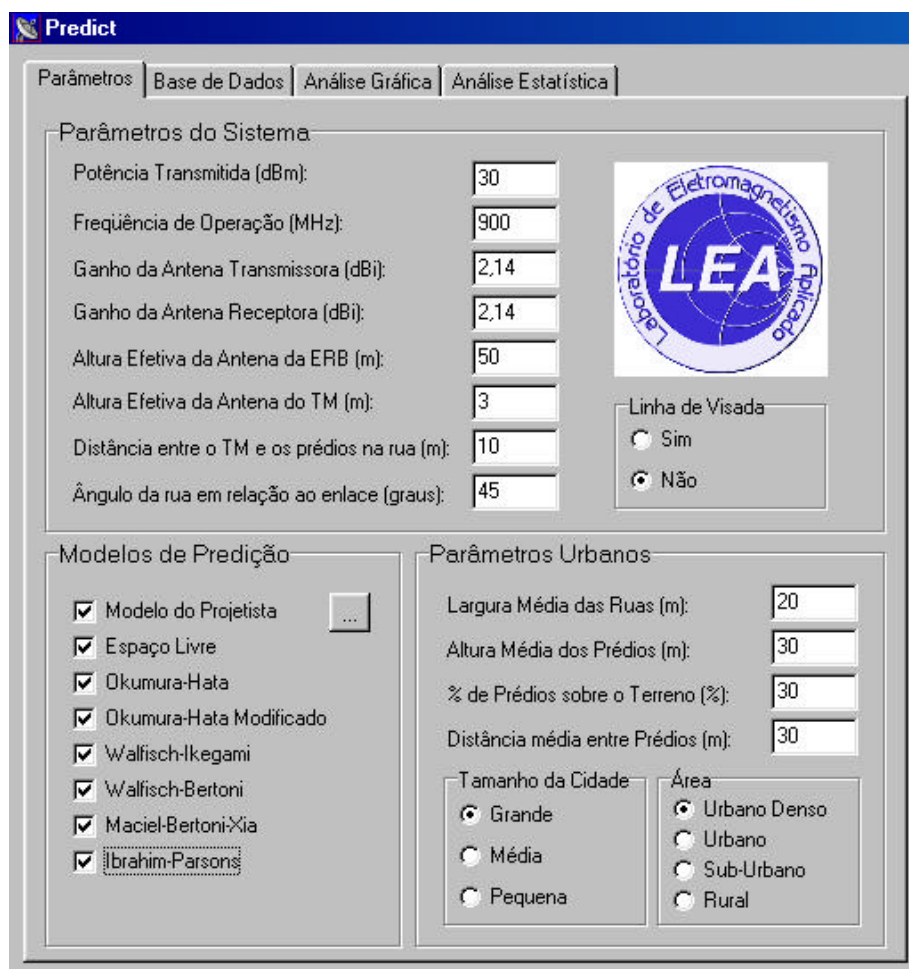


Figura 9.2 – Software Predict- Paleta Parâmetros

Paleta “Base de Dados”: Nesta paleta, o usuário deverá fornecer a base de dados das campanhas de medições realizadas na região de interesse. O usuário tem a opção de editar os dados e depois salva-los em um arquivo ou abrir qualquer arquivo de dados existente baseados em duas colunas, contanto que a 1º coluna seja destinada aos dados da distância em metros e a 2º destinada ao nível de potência recebida em dBm. A Figura 9.3 mostra a título de exemplo uma possível base de dados.

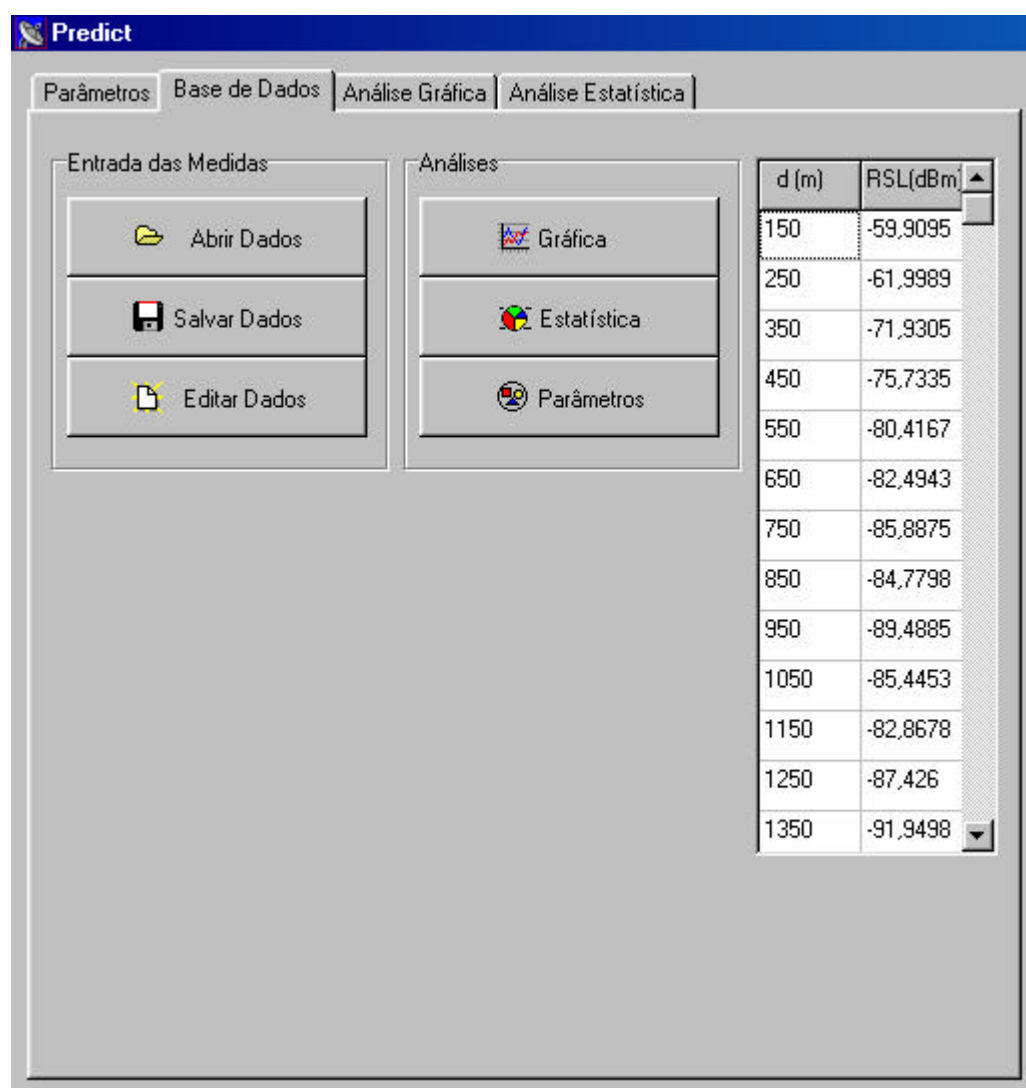


Figura 9.3 – Software Predict - Paleta Base de Dados

Paleta “Análise Gráfica”: Nesta paleta são gerados gráficos da Potência Recebida (dBm) *versus* distância (m) dos modelos colocados sob avaliação, assim como o gráfico referente aos dados da campanha de medições. Todos os gráficos são sobrepostos para dar uma primeira avaliação dos desempenhos dos modelos colocados sob teste. A Figura 9.4 mostra os gráficos gerados a partir das bases de dados da Figura 9.3 e dos parâmetros da Figura 9.2.

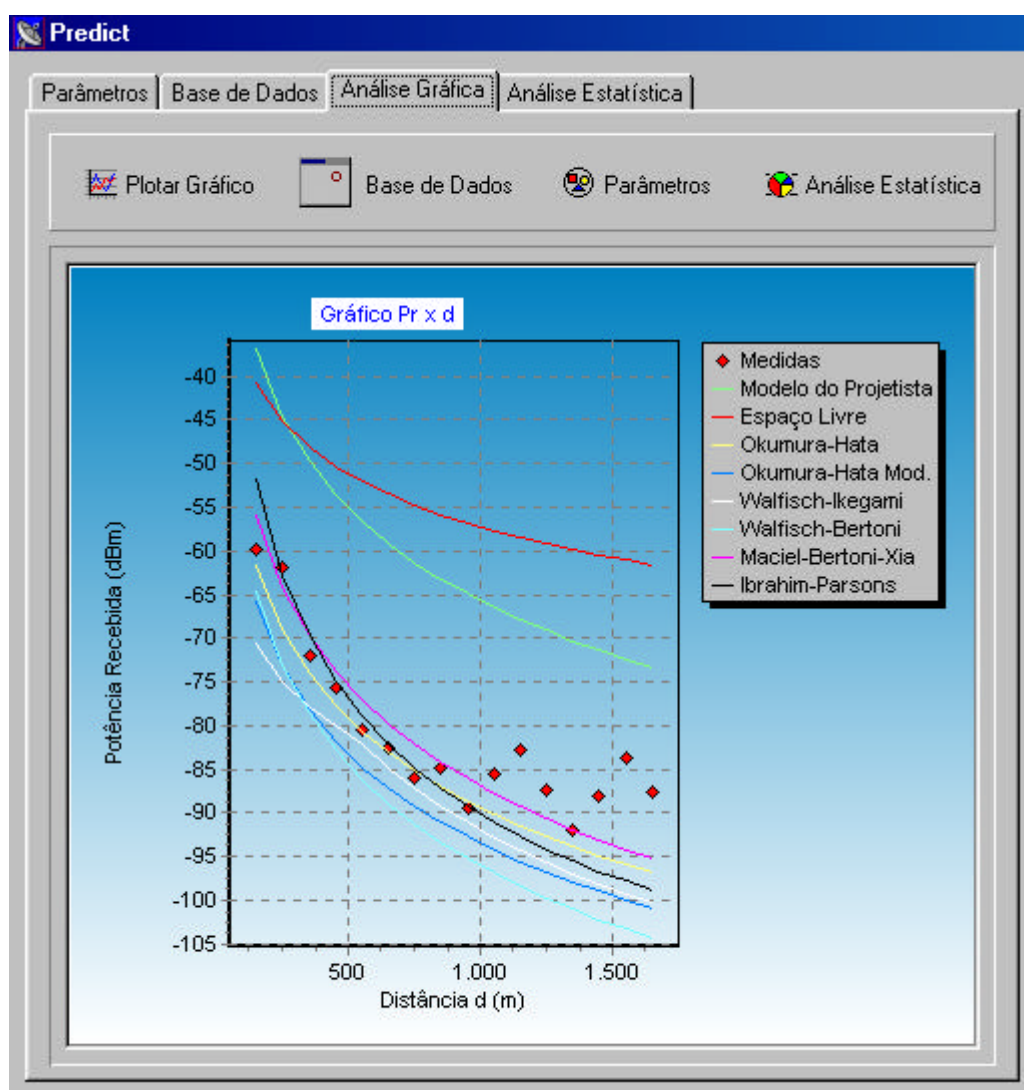


Figura 9.4 – Software Predict - Paleta Análise Gráfica

Paleta “Análise Estatística”: Nesta paleta são apresentados os desempenhos dos modelos testados frente às medidas. O desempenho é especificado sobre três aspectos: Desvio Absoluto (dB), Erro Médio Absoluto (dB) e Erro RMS (dB), conforme descritos no Capítulo 4. A Figura 9.5 mostra o resultado do exemplo anteriormente considerado. O usuário tem a opção de gerar um relatório apresentando os resultados obtidos (gráfico e estatístico), conforme mostrado na Figura 9.6.

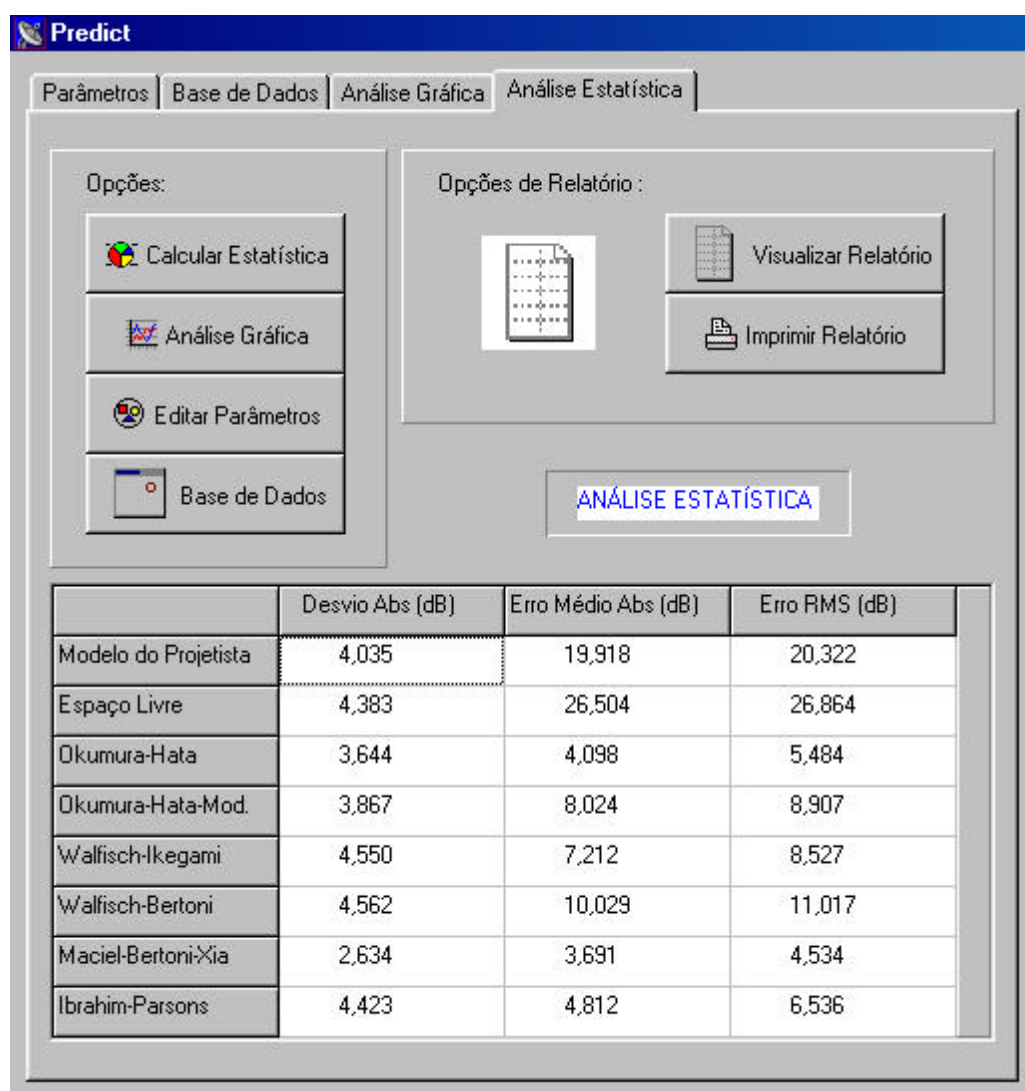


Figura 9.5 – Software Predict - Paleta Análise Estatística

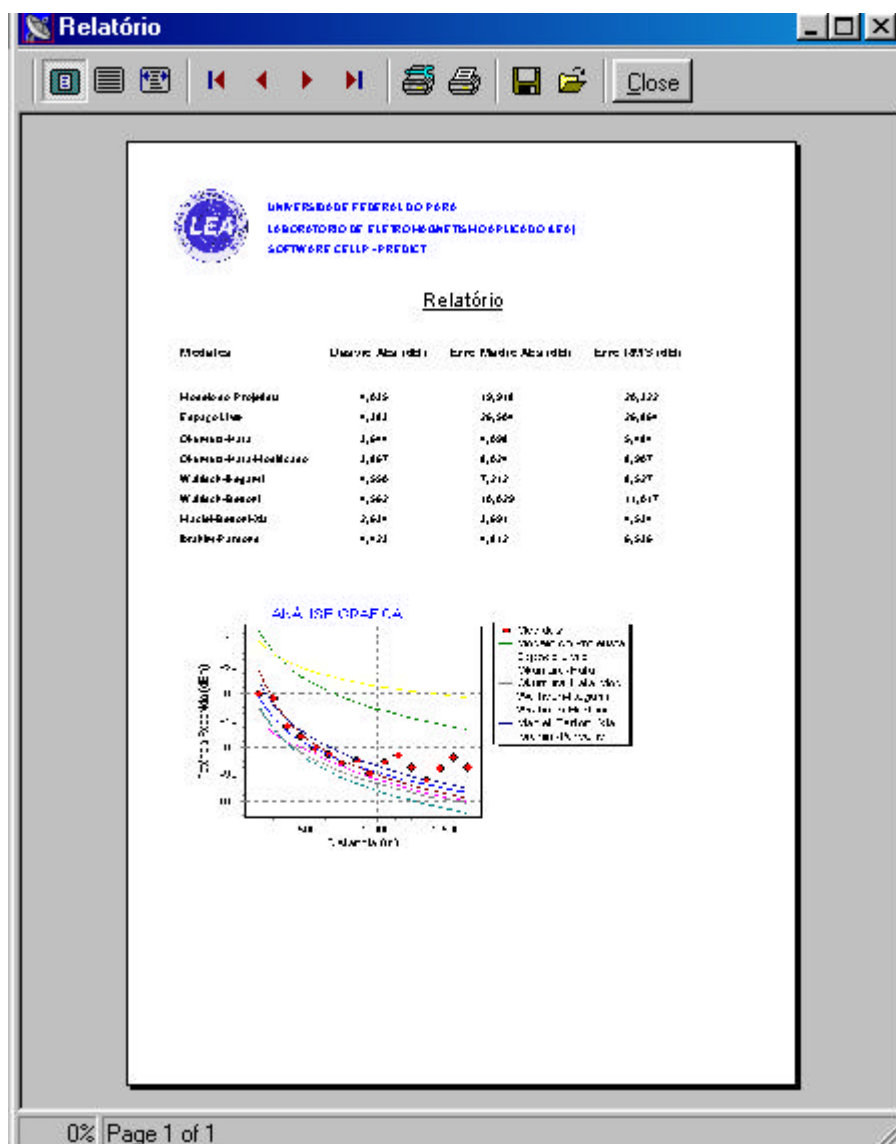


Figura 9.6 – Software Predict - Geração de Relatório

9.2.2 - Radio Link

O software Radio Link foi desenvolvido para realizar o Balanço-de-Potência (*Link Power Budget*) do sistema, determinando o raio máximo de cobertura de um determinado modelo para os dois enlaces básicos (descida-*downlink* e o de subida-*uplink*). Este programa também tem a opção de gerar relatório contendo os resultados obtidos.

Assim como no Predict, este programa apresenta paletas, uma denominada “Dados de Entrada” que se refere ao fornecimento por parte do usuário dos parâmetros do sistema e a escolha do modelo no qual se quer realizar o estudo, e

outra denominada “Resultados” referente aos resultados dos cálculos realizados. Estas paletas são mostradas na Figura 9.7 e 9.8 respectivamente.

Figura 9.7 – Software Radio Link - Paleta Dados de Entrada

Figura 9.8 – Software Radio Link - Paleta Resultados

9.2.3 - Traffic Tool

O *software* Traffic Tool é uma ferramenta de consulta do projetista. Ele efetua cálculos referentes ao número de canais, Grau de Serviço (GOS) e tráfego, além de poder gerar tabelas completas de tráfego geralmente utilizadas no projeto de tráfego telefônico. A Figura 9.9 mostra o ambiente do programa.

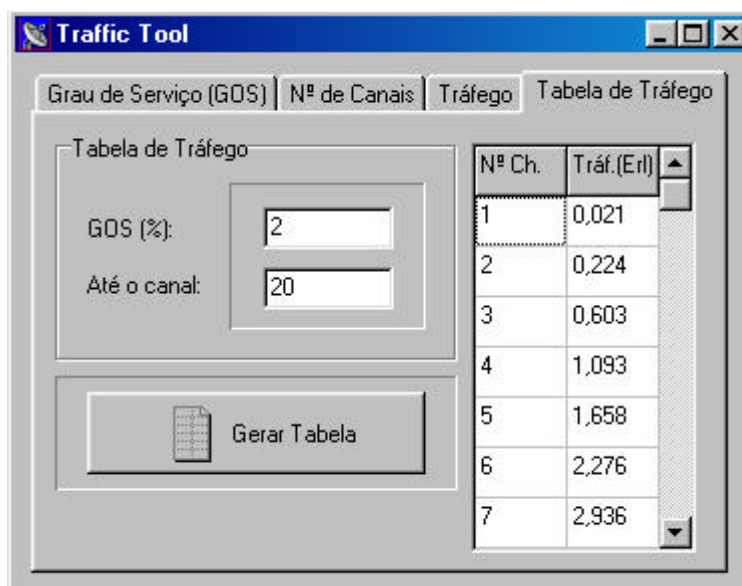


Figura 9.9 – Software Traffic Tool - Geração de tabela de Tráfego

9.2.4 - Traffic Design

O *software* Traffic Design realiza o projeto de tráfego a partir de um mapa de tráfego produzido em qualquer formato gráfico usual (jpg, jpeg, bmp, emf ou wmf).

Conforme descrito no Capítulo 6, este projeto consiste na divisão do mapa da região de interesse em quadrículas, onde cada quadrícula deve representar o tráfego oferecido na área delimitada pela mesma.

Para que qualquer mapa de tráfego possa ser utilizado neste programa, é necessário que cada quadrícula represente uma de quatro possibilidades de tráfego oferecido, ou seja, só podem existir 4 valores de tráfego oferecido que cada quadrícula pode representar. Além disso, tais valores devem ser representados nas quadrículas pela associação dos mesmos a alguma cor de preenchimento da quadrícula, onde esta associação deve ser fornecida ao programa para que o projeto seja válido. Outro aspecto importante da utilização deste programa provê do fato de

que a unidade básica de resolução de vídeo é o *pixel*, sendo portanto, necessário que o usuário forneça a área dessas quadrículas em Km assim como o fator de digitalização (fator que especifica a relação Km / *pixel*).

Realizada a parte de configuração do programa, o usuário deve especificar o raio das células que formarão a grade hexagonal. Para o projeto de sistemas móveis celulares, é comum especificar este raio como sendo o raio máximo determinado no balanço de potência do sistema, podendo assim, ser utilizado o programa Radio-Link para a realização desta tarefa. Após isto, o usuário deve localizar a 1ª ERB (referência para o cálculo de tráfego) digitando as coordenada (x,y) ou simplesmente clicando com o mouse na posição desejada. Após a definição da localização da ERB, o usuário deverá clicar no botão correspondente à contagem de tráfego, onde será realizada a contagem de tráfego na área da célula correspondente à ERB de referência e será determinado o número de canais necessários para atender tal tráfego com um GOS previamente estabelecido pelo usuário. O resultado desta contagem é mostrado no próprio programa e pode ser gerado em um relatório. A Figura 9.10 mostra um exemplo da utilização do programa.

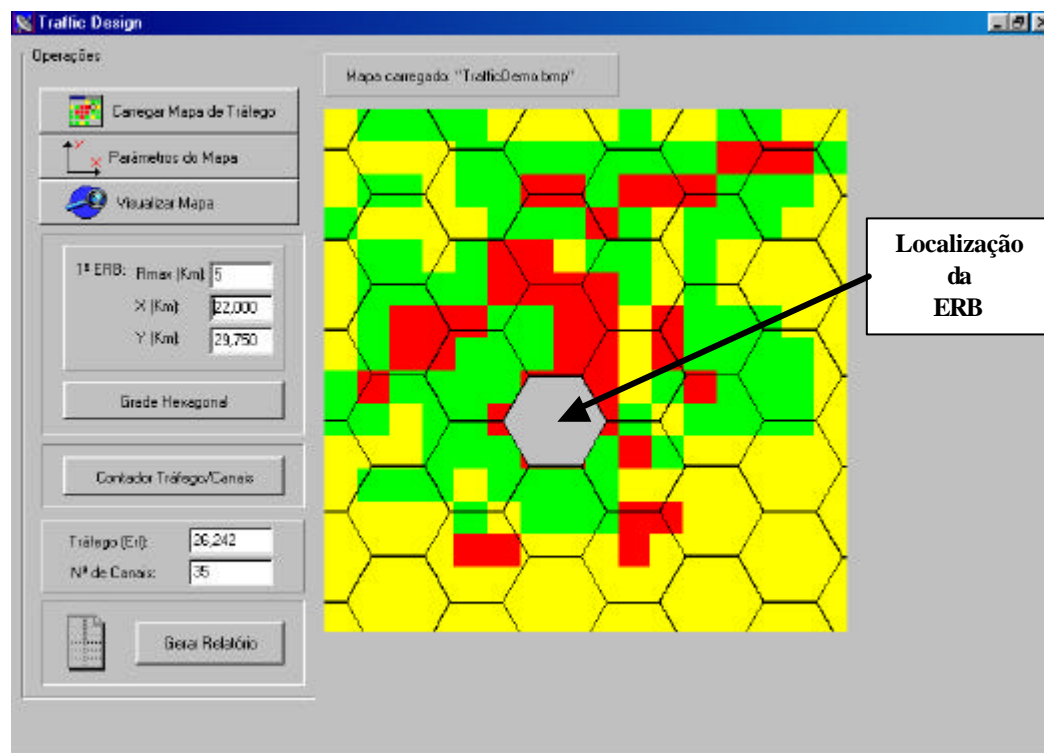


Figura 9.10 – Ambiente do Software Traffic Design

9.2.5 - Cell Site

O *software* Cell Site foi concebido para simular um ambiente móvel através dos modelos de propagação considerados no Capítulo 4. Sua principal função é mostrar graficamente a distribuição de potência (cobertura rádio-móvel) proveniente de uma ERB para algum modelo considerado. Para a utilização do programa, o usuário primeiramente deve fornecer os já mencionados parâmetros do sistema, parâmetros urbanos e o modelo de propagação adotado para a simulação. O programa também permite a entrada de dados das perdas da antena base em função do ângulo de azimute, o que permite a visualização da distribuição de potência para antenas direcionais.

Após a etapa de entrada de dados, o usuário poderá iniciar a etapa de simulação. Após o término dessa etapa, a distribuição de potência oferecida por uma ERB considerando um determinado modelo de predição será mostrada graficamente através da associação dos níveis de potência (em dBm) em cores. Esta associação pode ser configurada pelo usuário assim como as faixas de potência que elas representam.

Uma outra função que pode ser realizada pelo programa é a de determinar o nível de potência em cada ponto da região de simulação, bastando-se para isso movimentar o *mouse* sobre o ponto em questão, sendo também mostradas distâncias em relação a cada eixo de coordenadas de referências (x,y) e a distância da ERB para o referido ponto, assim como o ângulo de azimute do ponto em relação à ERB e o eixo x. As Figuras 9.11 e 9.12 mostram simulações realizadas pelo *software* para uma antena omnidirecional e para uma antena setorizada (direcional) respectivamente.

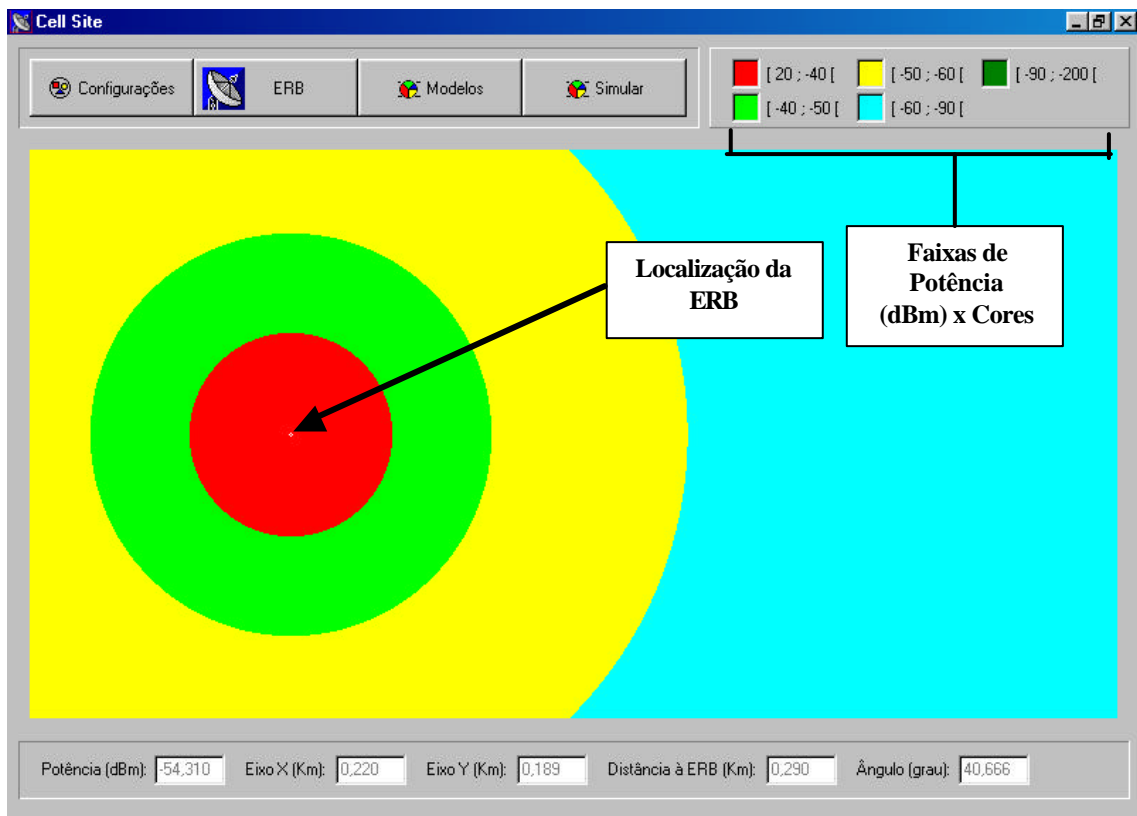


Figura 9.11 – Simulação (Antena Omnidirecional)

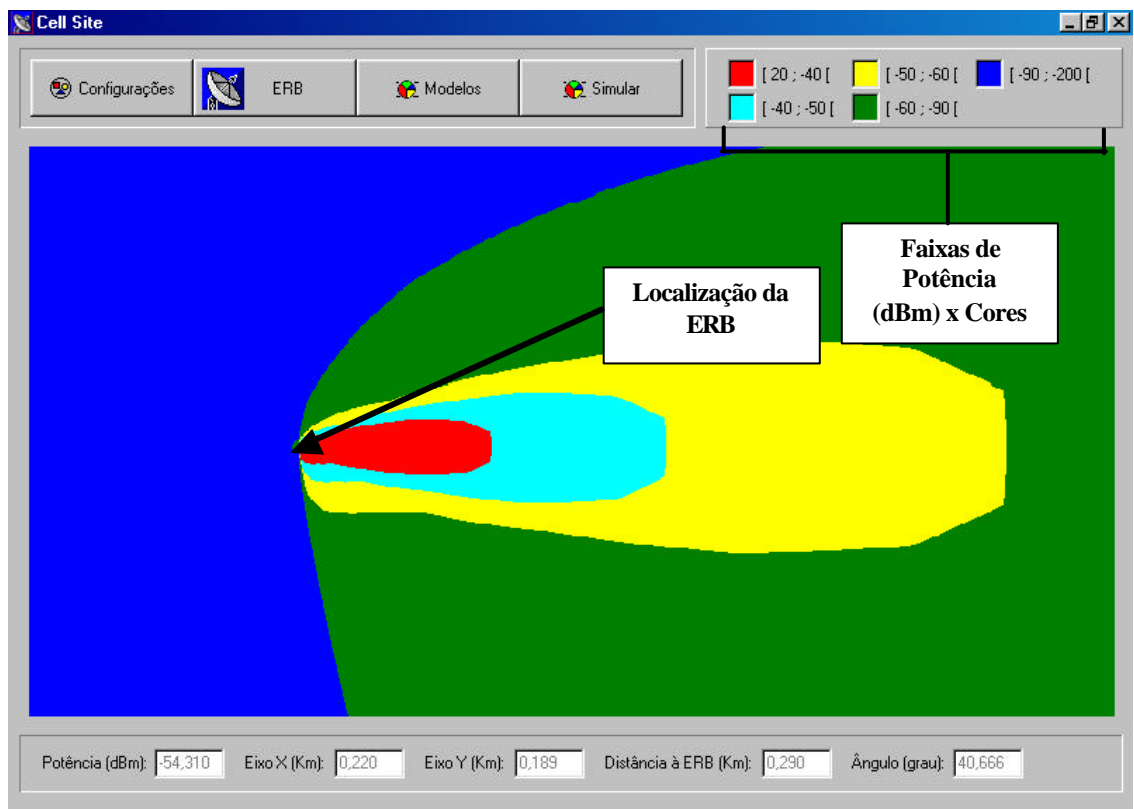


Figura 9.12 – Simulação (Antena Setorizada)

CAPÍTULO 10

CONCLUSÃO

Com este trabalho conseguiu-se mostrar os principais aspectos considerados no planejamento de sistemas móveis celulares, tais como: Padrão Celular, Interferências, Métodos de Acesso, Modelos de Propagação, Tráfego, Planejamento de Frequências, Projeto de Sistemas Analógicos (em especial o padrão AMPS) e o Projeto de Sistemas Digitais (TDMA e CDMA).

Este trabalho juntamente com o ambiente computacional desenvolvido (CELLP), podem servir de apoio às disciplinas que tratam de sistemas móveis celulares nos cursos de engenharia elétrica, fornecendo um material didático de conhecimento básico para análise e planejamento de tais sistemas.

Como proposta a futuros trabalhos, sugere-se realizar estudos mais específicos sobre o padrão DCS (GSM em 1,8 GHz), pois o tal padrão foi adotado pela ANATEL para a exploração da Bandas C, D, E da telefonia móvel brasileira, merecendo então a atenção dos engenheiros de telecomunicação, assim como a tecnologia de telefonia celular via satélite GLOBALSTAR. Outra proposta é o desenvolvimento de novos *softwares* que complementarão o CELLP, por exemplo: um *software* que realize simulações estatísticas de tráfego (chegada e duração das chamadas), um *software* que realize a alocação dinâmica de canais e realize cálculos de interferência, um *software* que realize a leitura de mapas digitalizados para se realizar o estudo de propagação utilizando-se dos efeitos topográficos e das características do terreno, e por fim, um *software* que possibilite a inserção de várias ERBs em um mapa digitalizado e efetuar o estudo da cobertura geral do sistema, realizando-se assim, estudos de melhor servidor (*best-server*) e de estatísticas da área efetivamente coberta, entre outros.

ANEXO A

CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE 1º GERAÇÃO

Parâmetros do Sistema	AMPS (EUA)	TACS (Reino Unido)	NMT (Escandinávia)	C – 450 (Alemanha Ocidental)	NTT (Japão)
Frequência de transmissão (MHz)					
– base	870 – 890	935 – 960	463 – 467,5	461,3 – 465,74	870 – 885
– móvel	825 – 845	890 – 915	453 – 457,5	451,3 – 455,74	925 – 940
Espaçamento entre a banda de transmissão e de recepção (MHz)	45	45	10	10	55
Largura do canal (kHz)	30	25	25	20	25
Nº de canais	666 (NES) 832 (ES)	1000	180	222	600
Raio de cobertura da base (Km)	2 – 25	2 – 20	1,8 – 40	5 – 30	5 – 10
Sinal de áudio					
– modulação	FM	FM	FM	FM	FM
– Δf máximo (KHz)	± 12	$\pm 9,5$	± 5	± 4	± 5
Sinais de controle					
– modulação	FSK	FSK	FSK	FSK	FSK
– Δf (KHz)	± 8	$\pm 6,4$	$\pm 3,5$	$\pm 2,5$	$\pm 4,5$
Taxa de transmissão (Kbps)	10	8	1,2	5,28	0,3

ANEXO B

CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE 2º GERAÇÃO

Parâmetros do Sistema	IS - 54 (EUA)	IS - 95 (EUA)	GSM (Europa)	DCS 1800 (Europa)	PDC (Japão)
Técnica de acesso	TDMA	CDMA	TDMA	TDMA	TDMA
Uso principal	Celular	Celular	Celular	Celular	Celular
Frequência de transmissão					
– base	869 – 894	869 – 894	935 – 960	1805 – 1880	810 – 826
– móvel	824 – 849	824 – 849	890 – 915	1710 – 1785	940 – 956
Técnica de duplexação	FDD	FDD	FDD	FDD	FDD
Espaçamento entre a banda de transmissão e de recepção (MHz)	45	45	45	95	130
Largura do canal (kHz)	30	1250	200	200	25
Modulação	$\pi/4$ DQPSK	BPSK QPSK	GMSK	GMSK	$\pi/4$ DQPSK
Potência máxima / média (mW)	600 / 200	600	1000 / 125	1000 / 125	600 / 200
Controle de potência					
– base	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
– móvel	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Codificação de voz	VSELP	QCELP	RPE-LTP	RPE-LTP	VSELP
Taxa de codificação de voz (Kbps)	7,95	variável (8,4,2,1)	13	13	6,7
Nº de canais por portadora	3	Max. 64	8	8	3
Taxa de transmissão do canal (Kbps)	48,6	1228	270,833	270,833	42
Tamanho do quadro (frame) (ms)	40	20	4,615	4,615	20
(S/l) operacional	16	6	9	9	17

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mello, L. A. R. S, Coelho, L. R., Gárcia, N. A. P., e Rodrigues, M. E. C. –
“Sistemas Rádio Celulares”, Relatório Técnico - CETUC/PUC-RJ, 2000.
- [2] Yacoub, M. D., “Foundation of Mobile Radio Engineering”, ed. CRC
Press, 1993.
- [3] Cellular Mobile Radio Engineering, S. Faruque, Artech House, 1996
- [4] Okumura Y., Ohmori E., Kawano T., e Fukuda K.; “Field Strength and its
Variability in the VHF and UHF Land Mobile Radio Services”- Review
Elec. Commum. Labs, 16 , N 9-10, 1968.
- [5] Hata, M., “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio
Services” - IEEE Trans., VT - 29, N 3, 1980.
- [6] Cavalcante, G. P. S. – “Canal de Rádio Propagação”, Relatório Técnico –
DEEC/UFPA, 2000.
- [7] Walfisch, J. and H. L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in
Urban Environments", IEEE Trans Antennas Propag., 1998, 36, (12),
pp. 1788-1796.
- [9] Ibrahim, M. F. and Parsons, J.D. - “Signal Strength Prediction in Built – up
Areas, part 1; Median Signal Strength”- IEE Proc., 130 Part F, N 5 –
1983.
- [10] Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Saunders,
Simon R., Willey, 1999
- [11] Vásques, Eduardo Javier Arancibia, “Estudo de Cobertura de Sistemas
Móveis Celulares em regiões Urbanas”- Dissertação de Mestrado -
CETUC/PUC Rio de Janeiro, 1996.
- [12] Ross, A.H.H. and Gilghousen, K.S. - “CDMA Technology and the IS-95 North
American Standard”; The Communications HandBook, CRC Press and
IEEE Press.