

Análise de Desempenho de uma Rede Celular CDMA através de Simulação

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação da Universidade Estadual de Campinas, como
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Luiz Gustavo Alarcon Alegro


Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná em 1995

Orientador:

Dr. Celso de Almeida

UNICAMP - 1990

5824091

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por _____ e aprovada pela Comissão
Julgada em _____ / _____ / _____
 Orientador

Julho de 1998

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	AL25a
V.	Ex.
TOMBO BC	36033
PRUC	395/98
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	17/12/98
N.º CPD	

CM-00119522-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

AL25a

Alegro, Luiz Gustavo Alarcon

Análise de desempenho de uma rede celular CDMA através de simulação. / Luiz Gustavo Alarcon Alegro.-- Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Celso de Almeida

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistema de comunicação móvel. 2. Telefonia celular – Simulação (Computadores). 3. Comunicações digitais. 4. Modulação (Eletrônica). I. Almeida, Celso de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Agradecimentos

Esta é, sem dúvida, uma tarefa difícil, pois são inúmeras as pessoas que contribuíram para que este trabalho chegasse ao final. Que me perdoem as que esqueci de citar, mas que tenham certeza que sou eternamente grato.

Ao Prof. Celso de Almeida, mais que meu orientador, um amigo. Seu papel de guia, por entre os incontáveis caminhos de uma pesquisa, foi executado com grande louvor.

Aos Professores Jaime Portugheis e Leonardo Mendes por confiarem a mim o acesso a seus laboratórios, onde fiz grande proveito dos equipamentos ali instalados.

Aos Professores Jaime Portugheis e Carlos Eduardo Câmara, por terem aceitado o convite para participar da banca examinadora e por colaborarem para a melhoria deste trabalho.

A meu pai, pelo exemplo de constante batalha em busca de seus ideais, ensinando-me que as limitações de uma pessoa são nada mais que barreiras criadas por ela mesma. À minha mãe, por ter me ensinado a viver de forma alegre e apreciar sempre o lado positivo de cada um e da vida.

Aos meus irmãos João Henrique e Maria Martha A. Alegro, por terem contribuído com carinho para que este trabalho fosse realizado.

À minha grande amiga, companheira e namorada, Adriana P. de Castro, que soube superar as dificuldades de um relacionamento à distância e fazer uso, de tudo o que aprendeu com isto, para que nosso relacionamento fosse cada vez mais apaixonante e gostoso.

Aos amigos que moraram comigo em Campinas: Fernando, Renato e Vitor, por todo o apoio e companhia, pelas piadas, situações engraçadas e nossos animados bate-papos que deixam tanta saudade.

À Unicamp, à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp e, especialmente, ao Departamento de Comunicações.

À CAPES, pelo financiamento dos meus estudos durante o mestrado.

A Deus por ter me dado esta chance.

Resumo

Neste trabalho o desempenho de redes celulares CDMA (*Code Division Multiple Access*) é obtido. Foi implementado um simulador de rede celular CDMA, onde é avaliada a capacidade destes sistemas em termos do número médio de usuários por célula, levando-se em consideração a taxa de soft handoff, a taxa de bloqueio bem como a taxa de queda de chamada, em função de vários parâmetros, tais como, taxa de chamadas, expoente de perda de propagação, parâmetros de soft handoff, fator de atividade de voz, desvio padrão do sombreamento, etc.

Abstract

In order to obtain the performance of a CDMA (*Code Division Multiple Access*) cellular network a simulator was realized. The performance was analyzed by the mean number of ongoing calls per cell, the call blocking and dropping rates and by the soft handoff rate as a function of the calling rate, path-loss exponent, soft handoff parameters, voice activity factor, shadowing standart deviation, etc.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do trabalho	3
2	Sistema Celular	5
2.1	Introdução	5
2.2	Nomenclatura celular	6
2.2.1	Co-células e Células Adjacentes	6
2.2.2	Reuso de Frequência	7
2.2.3	Taxa de Bloqueio e Queda de Chamada	8
2.2.4	Hard, Soft e Softer Handoff	9
3	Modelos de propagação	11
3.1	Introdução	11
3.2	Propagação no espaço livre	12
3.3	Decréscimo logarítmico com a distância	13
3.4	COST 231-Walfish-Ikegami	14
3.4.1	Com visada direta	15
3.4.2	Sem visada direta	15

3.5	Distribuições estatísticas da envoltória recebida	17
3.6	Banda de coerência	18
3.6.1	Distribuição Lognormal	18
3.6.2	Distribuição Rayleigh	19
3.6.3	Distribuição Rice	19
4	Múltiplo Acesso	20
4.1	Introdução	20
4.2	Duplexing	21
4.3	Arquiteturas de banda larga e banda estreita	22
4.3.1	Arquitetura de banda estreita	22
4.3.2	Arquitetura de banda larga	23
4.4	Sistemas com espalhamento espectral	24
4.5	Ganho de Processamento e Margem contra Interferência	26
4.6	Acesso Múltiplo por Divisão por Código - CDMA	27
5	IS-95	31
5.1	Introdução	31
5.2	Enlace Direto	34
5.3	Enlace Reverso	37
6	Simulador de Rede Celular	42
6.1	Introdução	42
6.2	Definição dos parâmetros	42
6.2.1	Estação Móvel	43
6.2.2	Estação Rádio Base	44
6.2.3	Rádio Enlace	44

6.2.4	Soft Handoff	45
6.2.5	Controle de Potência	47
6.2.6	Sistema	47
6.3	Esquemas Utilizados	47
6.4	Controle de potência	49
6.4.1	Introdução	49
6.4.2	Canal direto	50
6.4.3	Canal reverso	51
6.5	Acesso ao sistema	53
6.6	Soft Handoff	54
6.7	Descrição do Fluxograma do Simulador de Rede Celular	55
7	Resultados e Discussões	58
7.1	Introdução	58
7.2	Resultados e Discussões	60
8	Conclusões	73
8.1	Introdução	73
8.2	Considerações Finais	73
8.3	Propostas para Trabalhos Futuros	74

Lista de Figuras

2.1	Área de cobertura de uma Estação Rádio Base (ERB)	6
2.2	Sobreposição de células circulares	7
2.3	Reuso de frequências em um sistema celular	8
3.1	Parâmetros relativos ao modelo COST 231	15
3.2	Ângulo formado entre a linha de visada direta entre o transmissor e o receptor móvel e a direção percorrida por este	16
4.1	Maneira como as diferentes técnicas de acesso fazem uso do espectro disponível	21
4.2	(a) Esquema de transmissão FDD, (b) Esquema de transmissão TDD . . .	22
5.1	Enlaces direto e reverso em um sistema CDMA	33
5.2	Estrutura do canal piloto	34
5.3	Estrutura do canal de sincronismo	35
5.4	Estrutura do canal de tráfego no enlace direto	35
5.5	Estrutura do canal de paging	36
5.6	Estrutura do canal de acesso	37
5.7	Estrutura do canal de tráfego reverso	38
6.1	Limiares usados na determinação do estado de handoff	46
6.2	Algoritmo para a geração do sombreado	48
6.3	Diagrama de blocos do simulador	56

7.1	Distribuição espacial das ERBs	60
7.2	Ocupação do sistema para diferentes taxas de chegada	61
7.3	Taxa de Soft Handoff ($\lambda_i = 0,05$)	62
7.4	Taxa de Soft Handoff ($\lambda_i = 0,1$)	62
7.5	Taxa de Soft Handoff ($\lambda_i = 0,2$)	63
7.6	Taxa de Soft Handoff ($\lambda_i = 0,5$)	63
7.7	Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,05$)	64
7.8	Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,1$)	64
7.9	Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,2$)	65
7.10	Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,5$)	65
7.11	Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,1$) - Sem limitação de potência no handset	66
7.12	Taxa de bloqueio e de queda de chamada ($\lambda_i = 0,05$)	67
7.13	Taxa de bloqueio e de queda de chamada ($\lambda_i = 0,1$)	67
7.14	Taxa de bloqueio e de queda de chamada ($\lambda_i = 0,2$)	68
7.15	Taxa de bloqueio e de queda de chamada ($\lambda_i = 0,5$)	68
7.16	Número médio de usuários por célula considerando-se o desvio padrão do sombreamento	69
7.17	Número médio de usuários por célula considerando-se o fator de atividade de voz	70
7.18	Número médio de usuários por célula considerando-se o expoente de perda de propagação	70
7.19	Outage Probability	71
7.20	Estimativa do raio de cobertura de acordo com a taxa de queda de chamada	72
7.21	Estimativa do raio de cobertura de acordo com a taxa de bloqueio	72

Lista de Tabelas

3.1	Expoentes típicos de perda de percurso	14
3.2	Alcance dos parâmetros do modelo de propagação COST-231	14
5.1	Alocação de frequências	32
5.2	Características de um canal CDMA	32
5.3	Parâmetros da modulação do canal de tráfego reverso	39
5.4	Parâmetros de modulação do canal de acesso	40
6.1	Limites e valores típicos dos parâmetros usados no controle de potência . .	52
7.1	Valor padrão de alguns parâmetros	59

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A raça humana sempre teve o desejo de se comunicar, mas dependendo das distâncias, obstáculos envolvidos, a quantidade de informação a ser enviada, isto não resultava em uma tarefa muito fácil. Desde tempos remotos o homem lança sinais de fumaça (sinais visuais), batuca em tambores (sinais sonoros), usa pombos-correio e cartas através de mensageiros (informações escritas). O homem, incansavelmente, desdobra-se na tentativa de alcançar um modelo ou sistema que permita uma comunicação segura e rápida entre o remente e o destinatário. A evolução obtida nesta área, desde aquele tempo em que o homem tinha pouco mais que as mãos e o seu engenho para se comunicar, foi muito grande. Os sistemas de comunicações modernos são uma consequência desta evolução e o homem prossegue na busca por sua utopia de comunicar-se com qualquer um, a qualquer instante de tempo, em qualquer lugar do globo terrestre e ainda mais, de qualquer forma (voz, dados, imagem).

Os sistemas rádio-móvel são mais um passo dado na direção deste grandioso sonho, pois este tipo de sistema nos possibilita mobilidade, ainda que restrita, e, que a cada dia, estão se tornando mais eficientes e confiáveis. Hoje em dia a utilização de sistemas rádio-móvel está largamente difundida. Muitos destes sistemas ainda operam de forma analógica usando FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) como tecnologia de acesso, que acomoda os usuários pelo fatiamento do espectro frequência disponível. Devido ao

saturamento do sistema entre outros motivos, esta ocorrendo uma rápida migração para tecnologias que permitam acomodar um número maior de assinantes com uma gama cada vez mais diversificada de serviços. Sistemas digitais foram eleitos como sendo os que melhor se adequam às novas necessidades. Dentre os métodos de acesso mais cotados, temos o TDMA (*Time Division Multiple Access*) que não fatia o espectro, mas o cede a cada usuário por breves períodos de tempo. Temos também um método de acesso utilizando uma tecnologia que data dos meados de 1940 e que tinha uma utilização quase que estritamente militar que é o CDMA (*Code Division Multiple Access*) onde o espectro está inteiramente disponível por todo o tempo, sendo a separação entre os usuários feita através de um “código”. O CDMA promete uma série de vantagens em relação aos sistemas que utilizam técnicas analógicas, tais como o AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) e mesmo em relação aos sistemas que usam técnicas digitais, mas que usam um método de acesso diferente da divisão por código.

Diante da atualidade do tema propôs-se então um estudo do desempenho e comportamento destes sistemas, no caso específico um sistema rádio-móvel usando a tecnologia de acesso CDMA, onde usuários móveis são gerados uniformemente dentro de uma área circular em torno de cada estação rádio base. Vários são os parâmetros que podem ser configurados em um ERB, tais como a potência alocada para o canal piloto, paging, sincronismo, tráfego direto, raio de cobertura, ganho da antena da ERB como também o padrão de agrupamento (*cluster*) usado. Tudo isto inserido em um contexto onde diferentes valores de sombreamento e atividade de voz afetam diretamente o número médio de usuários suportados pelo sistema.

Analisar um sistema que leva em conta tantas variáveis não é uma tarefa muito simples. Dada a complexidade do tema, uma análise puramente analítica é bastante difícil e geralmente, quando obtida, serve para situações muito simplificadas e específicas, logo a simulação surge como uma poderosa ferramenta devido à sua flexibilidade e relativa simplicidade. A flexibilidade da simulação possibilita que se analise o sistema, quando vários parâmetros são variados, quase que automaticamente, sem que haja necessidade de se refazer todos os passos do desenvolvimento.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar e estudar o comportamento de uma rede celular CDMA, em termos da taxa de queda de chamadas, controle de potência, taxa de bloqueio, “outage probability” e taxa de soft handoff pela variação de alguns parâmetros tais como o desvio padrão do somreamento, fator de atividade de voz, expoente de perda de propagação (usado no modelo de propagação com decréscimo logarítmico com a distância), taxa de chegada de chamada e também dos parâmetros que balizam o processo de soft handoff. A simulação foi a ferramenta que se prestou a tal análise.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação foi formulada em 8 capítulos a saber:

- **Capítulo 1 - Introdução.**
- **Capítulo 2 - Sistema Celular.** Onde é feita uma revisão da nomenclatura e jargões usados na área de telefonia celular, sua história e características.
- **Capítulo 3 - Modelos de Propagação.** Onde é apresentado desde o modelo de propagação mais simples, que é a propagação no espaço livre, até dois modelos mais elaborados que são o modelo de decréscimo logarítmico com a distância e o COST 231-Walfish-Ikegami. Também são apresentadas algumas distribuições estatísticas da envoltória do sinal recebido e também a definição de banda de coerência.
- **Capítulo 4 - Múltiplo Acesso.** Onde são comentados os conceitos de sistemas de banda larga e banda estreita. São também estudados, ao longo deste capítulo, sistemas por espalhamentos espectral além de algumas importantes definições como margem contra interferência e ganho de processamento. Múltiplo acesso por divisão por código (CDMA) é apresentado neste capítulo.

- **Capítulo 5 - IS-95.** Este capítulo tem por objetivo descrever a norma IS-95, norma esta que regulamenta o uso de CDMA como padrão de acesso para a telefonia móvel dentro dos Estados Unidos, mas que também foi adotada como padrão por inúmeros países.
- **Capítulo 6 - Simulador de Rede Celular.** Neste capítulo é descrito o simulador usado para obter todos os gráficos e resultados apresentados ao longo deste trabalho. São descritos os passos que devem ser tomados para que se obtenha os resultados desejados. Todos os parâmetros que servem de entrada para o simulador de rede celular são descritos detalhadamente neste capítulo.
- **Capítulo 7 - Resultados e Discussões.** Onde são apresentados e comentados todos os resultados obtidos das simulações, em termos da taxas de soft handoff, atividade de voz, desvio padrão do sombreamento, mobilidade dos usuários móveis, etc, com as mais diferentes configurações, tais como, parâmetros que controlam o soft handoff, distribuição de usuários, perda de propagação, etc.
- **Capítulo 8 - Conclusões.** Onde são feitos os comentários finais sobre o trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Sistema Celular

2.1 Introdução

A primeira transmissão rádio móvel de sucesso data do final do século 18, quando Marconi estabeleceu um rádio enlace com uma distância de aproximadamente 29 km, entre uma estação terrena e um navio [1, 2]. Desta data em diante, sistemas móveis tem tido um grande desenvolvimento. A utilidade de um sistema rádio foi primeiramente reconhecida pelos serviços de segurança pública (departamento de polícia, corpo de bombeiros, guardas florestais e serviços governamentais), seguidos pelo setor privado (serviços de transporte, táxis, companhias petrolíferas, etc.). Estes primeiros sistemas consistiam de uma estação base, com seu transmissor e receptor montados no alto de uma montanha. A área de cobertura era muito grande, do mesmo modo como hoje nos é oferecida a televisão por rádio difusão.

Antes da segunda guerra mundial, os sistemas de rádio móvel eram usados por militares. Conseqüentemente, a evolução estava atrelada às necessidades e padrões das forças armadas. Hoje, o que podemos ver é um quadro totalmente diferente, onde os detentores da tecnologia rádio móvel estão voltados para um mercado lucrativo de milhões de usuários em potencial.

2.2 Nomenclatura celular

O conceito celular começou a aparecer nos laboratórios Bell no final de 1940. Ao invés do que anteriormente se usava, rádio difusão com transmissores de alta potência colocados em altas elevações, transmitindo sinal para uma grande área, este novo modelo faz uso de transmissores de menor potência, cada um deles especialmente configurado para servir somente uma pequena área chamada *célula*. Esta idéia introduziu um novo modelo para as comunicações rádio móveis. Como exemplo, uma cidade do tamanho de São Paulo seria dividida em um grande número de pequenas células, cada qual equipada com um transmissor de baixa potência.

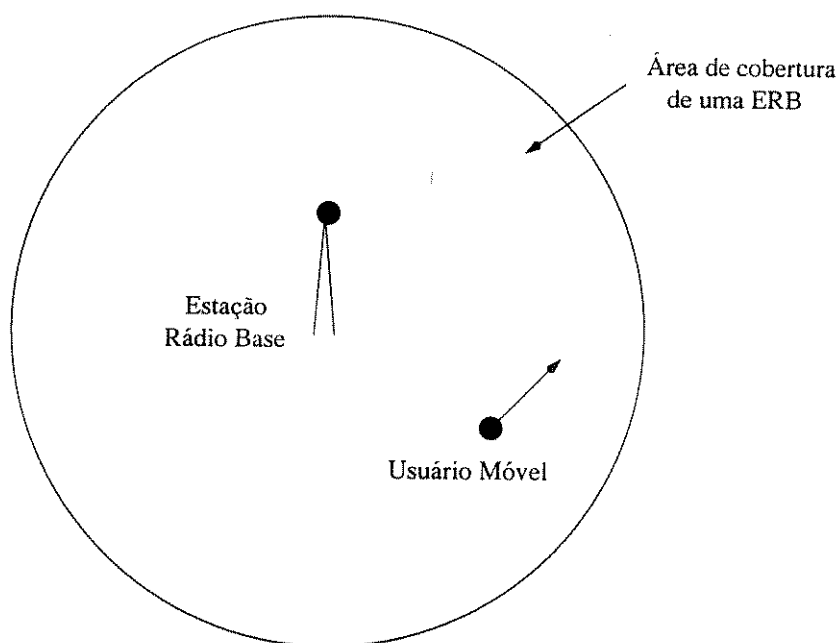


Figura 2.1: Área de cobertura de uma Estação Rádio Base (ERB)

2.2.1 Co-células e Células Adjacentes

São chamadas de *células adjacentes* aquelas que possuem fronteira comum entre si, e *co-células*, células que usem o mesmo grupo de portadoras [3, 4]. Co-células devem ser posicionadas suficientemente separadas para evitar ou tornar insignificante o que é chamado de *interferência co-canal*.

2.2.2 Reuso de Frequência

O *reuso de frequência* é uma técnica utilizada para se fazer um reaproveitamento dos canais disponíveis para a transmissão. O reuso de frequência permite que as mesmas frequências (canais) possam ser reutilizadas em diferentes células com grande distância entre si. Deste modo, o efeito da interferência entre usuários de um mesmo canal se torna pequeno. Este esquema é amplamente adotado em sistemas celulares.

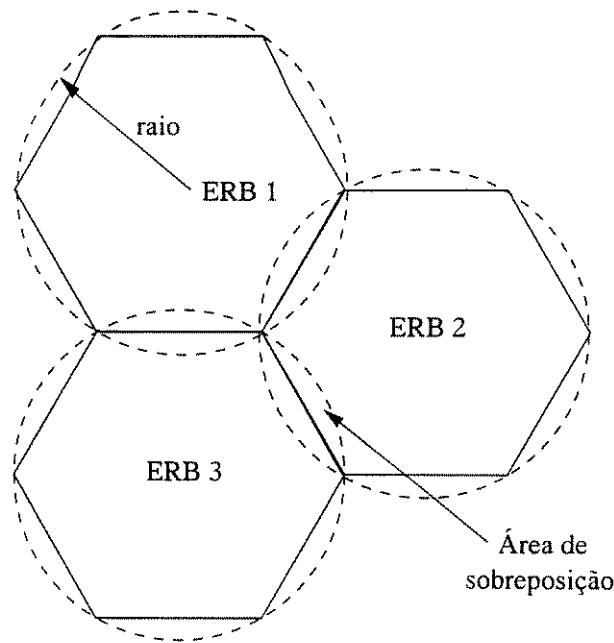


Figura 2.2: Sobreposição de células circulares

Se as antenas de transmissão das estações rádio bases fossem omnidirecionais e a célula estivesse absolutamente livre de obstáculos, a área de cobertura seria idealmente circular. No entanto, o formato geométrico escolhido para se representar a área de cobertura de uma estação rádio base foi o hexagonal, como pode ser visto na Fig. 2.2. Este formato pode ser repetido quantas vezes se queira, sem que ocorram áreas de sobreposição entre as ERBs (melhor apresentação estética da área de cobertura do sistema).

O conjunto de canais disponíveis em um sistema é vinculado a um grupo de células constituindo um agrupamento (“*cluster*”). O mesmo conjunto de canais somente pode ser reutilizado em um agrupamento diferente. O número de células por agrupamento determina o *padrão de reuso*. Os padrões mais comuns possuem 4, 7 e 12 células por agrupamento. Quanto menor o padrão de repetição, maior será o número de canais por

célula e assim, maior a capacidade do sistema. Por outro lado, menor é a distância entre co-células, fazendo com que cresça a interferência co-canal. Os canais de rádio de um agrupamento devem ser distribuídos levando-se em consideração a interferência provocada por células adjacentes.

Uma maneira de se reduzir a interferência co-canal é a *setorização*. Setorizar consiste basicamente na substituição da antena omnidirecional por antenas direcionais. Usualmente são usadas setorizações de 120 graus (3 setores dentro da mesma ERB) ou 60 graus (6 setores por ERB).

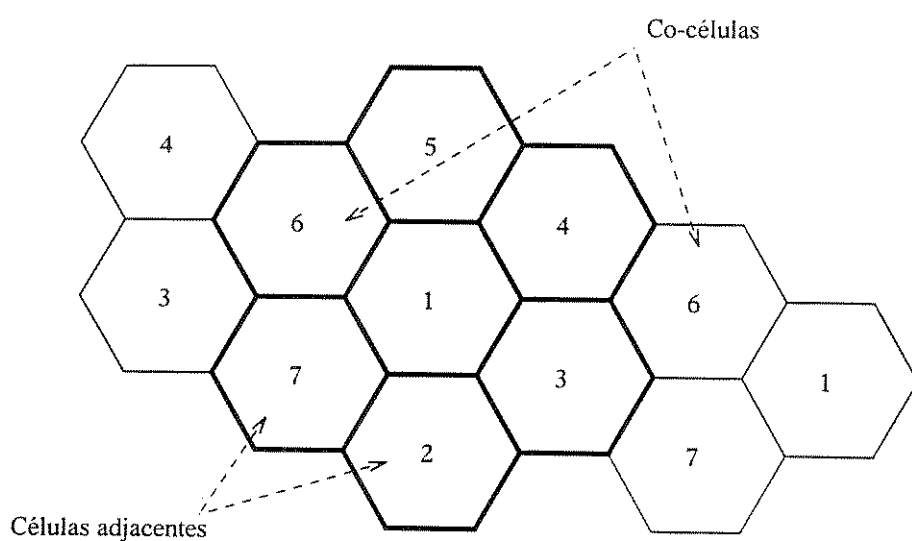


Figura 2.3: Reuso de frequências em um sistema celular

O conceito de reuso de frequência em um sistema celular é ilustrado na Fig. 2.3. Em cada célula, ilustrada como um hexágono, é utilizado um grupo de canais rádio (frequências) onde células marcadas com o mesmo número possuem o mesmo grupo de canais.

2.2.3 Taxa de Bloqueio e Queda de Chamada

Tanto a taxa de bloqueio quanto a taxa de queda de chamada são parâmetros muito importantes na avaliação da qualidade de um sistema de telefonia. A taxa de bloqueio pode ser definida como a porcentagem de usuários que tiveram suas chamadas bloqueadas ao tentar acessar o sistema, ou seja, a porcentagem de usuários que tentaram realizar uma chamada mas não a conseguiram completar (total de usuários bloqueados sobre o total de

chamadas geradas no sistema). Os fatores que podem provocar um bloqueio são a falta de um canal disponível para a utilização do sistema (sistema congestionado), a baixa relação sinal/ruído, ou porque o usuário se encontra em uma região que não é atendida por nenhuma ERB do sistema (região de “sombra”).

A taxa de queda de chamada pode ser definida como sendo o percentual de usuários que após terem suas chamadas completadas (usuários que estão em conversação), são desconectados do sistema (total de usuários derrubados sobre o total de chamadas geradas no sistema). Esta desconexão pode ocorrer devido a um forte desvanecimento do sinal (grande atenuação por um período suficientemente longo), baixa relação sinal/ruído ou devido ao fato de que este móvel se encontra em uma região de sombra.

2.2.4 Hard, Soft e Softer Handoff

Não é rara a situação em que um usuário se desloca para fora da área de cobertura de sua célula. Nestas situações, é fundamental que a chamada em progresso não seja interrompida. Para tanto, é realizada uma troca de canal sem o auxílio do usuário móvel, ficando o processo transparente sob seus olhos. Esta mudança de canal leva o nome de *hard handoff* ou somente *handoff*.

No caso de um sistema celular, usando CDMA como tecnologia de acesso, pode ocorrer ainda o que chamamos de *soft handoff*, que também significa a saída de um usuário de uma ERB para outra, só que agora permanecendo com a mesma portadora (canal). A transição de uma ERB para outra é feita de forma suave. Primeiramente o usuário averigüa a possibilidade de mudança para uma segunda ERB, entra em contato com esta, e só então se desconecta da primeira estação rádio base. Convém definir a *taxa de soft handoff* como sendo o percentual de usuários que estão se comunicando com mais de uma ERB simultaneamente.

Softer Handoff é nada mais do que a mudança de um móvel para um setor diferente dentro da mesma ERB. Esta mudança pode ocorrer tanto por um mecanismo de *hard handoff* ou *soft handoff*.

Um bom algoritmo de *handoff* é muito importante, pois são freqüentes as quedas de chamada e perda de informação (principalmente quando o tráfego for de dados) em

sistemas FDMA durante a realização deste processo.

Capítulo 3

Modelos de propagação

3.1 Introdução

Os sistemas de comunicações móveis foram levados a usar porções mais altas do espectro de frequência devido ao fato de que as bandas de frequência ainda disponíveis não eram adequadas para satisfazer a grande demanda por serviços de telefonia móveis.

Os usuários móveis, como o próprio termo indica, estão livres para percorrer toda a área de cobertura proporcionada por uma ERB, assim sendo, ocorre uma ampla variação na potência média do sinal. Como se não bastasse, este ainda sofre a influência da interferência co-canal, interferência de canais adjacentes e do ruído. Tudo isto contribui para uma degradação da qualidade do sinal.

É por isto tudo que um bom modelo de predição de cobertura deve ser usado na otimização da potência transmitida, melhorando assim a relação sinal-ruído. Considerando um sistema CDMA, isto irá possibilitar um aumento no número médio de usuários [5] e na qualidade do sinal.

A propagação de potência em um ambiente rádio móvel é fortemente influenciado por vários fatores, tais como, o relevo natural e artificial da região, a frequência utilizada, altura das antenas, etc. Uma caracterização precisa da variação da potência do sinal é, sem dúvida nenhuma, uma tarefa muito difícil.

Uma medida de interesse no estudo de rádio propagação é a perda de propagação l ,

definida como a relação entre a potência transmitida P_t e a potência recebida P_r que geralmente é expressa em dB como

$$L = 10 \log_{10} l = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} \text{ dB} \quad (3.1)$$

3.2 Propagação no espaço livre

A condição de propagação no espaço livre representa uma situação ideal, caracterizada pela propagação com visada direta entre o transmissor e o receptor, no qual o fenômeno de propagação é basicamente afetado pela distância d entre o transmissor e o receptor e pelo comprimento de onda λ da onda eletromagnética. Em tais condições, a relação entre a potência recebida P_r e a potência transmitida P_t é dada pela fórmula de transmissão no espaço livre de *Friis*,

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.2)$$

onde G_t e G_r são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente. Usando a relação $\lambda = c/f$, onde c é a velocidade da luz no ar ($c = 2,998 \times 10^8$ m/s) e f é a frequência de operação, a perda de propagação em decibéis é dado por

$$L = 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d - 10 \log_{10} G_t G_r + 32,442 \text{ dB} \quad (3.3)$$

onde f é dado em MHz e d em km. Para antenas isotrópicas ($G_t=G_r=1$), o coeficiente de perda de propagação em decibéis é igual a

$$L = 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d + 32,442 \text{ dB} \quad (3.4)$$

A taxa de decréscimo da perda de propagação com a distância ou frequência neste modelo é de 20 dB/década ou de 6 dB/oitava. Apesar de descrever uma condição de propagação ideal, este modelo pode ser usado com precisão em sistemas de comunicações via satélite e também em enlaces de rádio de curta distância com visada direta.

3.3 Decréscimo logarítmico com a distância

Ambos, modelos de propagação teóricos e empíricos, indicam que a potência média do sinal recebido em dB decresce logaritmicamente com a distância, tanto para ambientes externos quanto para ambientes internos. A perda de percurso em larga escala, para qualquer distância entre o receptor e o transmissor, é expressa como função desta distância usando-se um expoente de perda de percurso, ou seja,

$$l(d) = l(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^\beta \quad (3.5)$$

ou expresso em dB como

$$L(d) = L(d_0) + 10\beta \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \text{ dB} \quad (3.6)$$

onde β é o expoente de perda de propagação, o qual indica a taxa de crescimento da perda de propagação com aumento da distância, d_0 é uma referência fixa, próxima ao transmissor, onde é conhecida a potência do sinal $l(d_0)$, mas esta também pode ser calculada com em 3.7, que é exatamente a fórmula para o cálculo da perda de propagação no espaço livre.

$$l(d_0) = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.7)$$

Quando traçadas as curvas das equações 3.5 e 3.6 em uma escala log-log, a perda de propagação é representada por uma linha reta com inclinação igual a 10β dB/década. O valor de β depende do ambiente em que o sistema esteja operando. Por exemplo, no espaço livre β é igual a 2 e para ambientes externos $3 \leq \beta \leq 5$.

É muito importante escolher um valor de β que traduza bem o tipo de ambiente em que está ocorrendo a propagação. A distância de referência d_0 deve sempre estar no campo distante da antena para que os efeitos dos campos próximos não alterem a referência da perda de propagação. Em uma célula com grande área de cobertura, distâncias da ordem de $100 \leq d_0 < 1000 \text{ m}$ são normalmente usadas e, em microcélulas, distâncias da ordem de $10 \leq d_0 < 100 \text{ m}$. A perda de propagação de referência $L(d_0)$ é calculada usando-se a fórmula de propagação no espaço livre dada por (3.3), ou através de medidas à uma

distância d_0 do transmissor. A Tab. 3.3 mostra valores típicos do expoente de perda de percurso obtidos em vários ambientes.

Ambiente	Expoente de perda de percurso β
Espaço livre	2
Área urbana	2,7 a 3,5
Área urbana com sombreamento	3 a 5
Dentro de prédios (com linha de visada)	1,6 a 1,8
Dentro de prédios (sem linha de visada)	4 a 6

Tabela 3.1: Expoentes típicos de perda de percurso

3.4 COST 231-Walfish-Ikegami

Este modelo de propagação trata da perda de percurso em caminhos obstruídos por prédios e da perda que ocorre em vales formados por prédios de ambos os lados [6]. Este modelo foi desenvolvido para os casos em que há visada direta entre o transmissor e o receptor e a partir da combinação dos modelos desenvolvidos por Walfish e Bertoni [7] e Ikegami [8], para a situação em que o caminho encontra-se obstruído.

Este modelo pode ser aplicado para grandes, médias, pequenas ou micro células com parâmetros dados na Tab. 3.2, onde f é a frequência de operação do sistema, h_t é a altura da antena da estação rádio base e h_r é a altura da antena do receptor móvel.

800

\leq

f

\leq

2000

MHz

4

\leq

h_t

\leq

50

m

1

\leq

h_r

\leq

3

m

0,02

\leq

d

\leq

5

km

Tabela 3.2: Alcance dos parâmetros do modelo de propagação COST-231

3.4.1 Com visada direta

Neste caso, a perda de propagação é dada por

$$L = 26 \log_{10} d + 20 \log_{10} f + 42,6 \text{ dB} \quad (3.8)$$

onde $d \geq 0,02 \text{ km}$ e f é dada em MHz.

3.4.2 Sem visada direta

Neste caso, quando há obstrução do caminho entre o receptor e o transmissor, o modelo de propagação leva em consideração os seguintes parâmetros: altura média dos prédios na região h_b , largura da rua r_w , distância média entre os prédios d_b e a orientação da rua relativa a reta de visada direta entre a ERB e o móvel, φ , com h_b , r_w e d_b dados em metros e φ em graus.

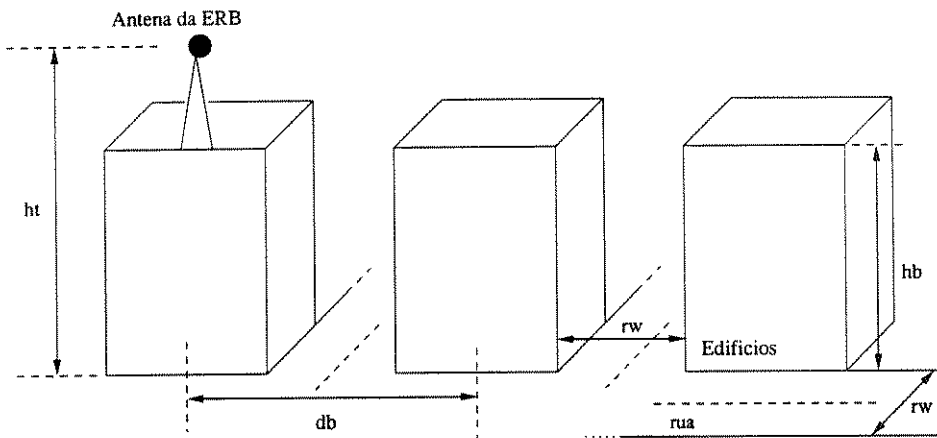


Figura 3.1: Parâmetros relativos ao modelo COST 231

A perda de propagação total L , em decibéis, é composta de três termos; perda de propagação no espaço livre L_F , perda de propagação por difração e espalhamento ocorridos no topo de casas e edifícios L_D , e a perda devido aos mais diversos cenários encontrados no decorrer do caminho entre o transmissor e o receptor L_S . Deste modo temos,

$$L = L_F + L_D + L_S \quad (3.9)$$

A perda de propagação no espaço livre é fornecida por (3.3). A perda de propagação ocorrida por difração e espalhamento no topo das casas e edifícios é dada por,

$$L_D = -16,9 - 10 \log_{10} r_w + 10 \log_{10} f + 20 \log_{10} (h_b - h_r) + L_\varphi \quad (3.10)$$

onde

$$\begin{aligned} L_\varphi &= -10 + 0,3548\varphi & 0^\circ &\leq \varphi < 35^\circ \\ L_\varphi &= 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & 35^\circ &\leq \varphi < 55^\circ \\ L_\varphi &= 4 + 0,114(\varphi - 55) & 55^\circ &\leq \varphi < 90^\circ \end{aligned}$$

Se $L_D < 0$, L_D é assumido como sendo zero. A perda de propagação devido a múltiplos cenários L_S é dado por

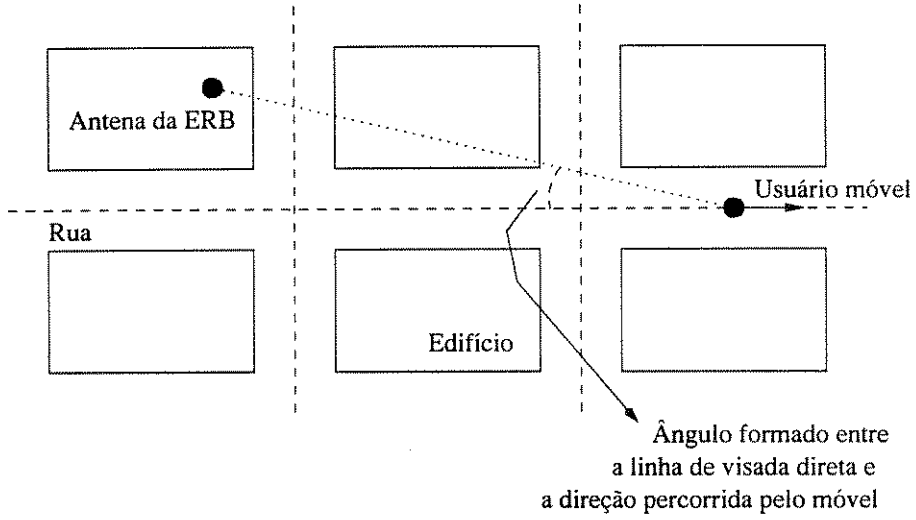


Figura 3.2: Ângulo formado entre a linha de visada direta entre o transmissor e o receptor móvel e a direção percorrida por este

$$L_S = -18 \log_{10} (1 + h_t - h_b) - 9 \log_{10} d_B + k_a + k_d \log_{10} d + k_f \log_{10} f \quad (3.11)$$

onde o primeiro termo após a igualdade deve ser considerado zero se $h_t - h_b \leq 0$ e

$k_a = 54$	$h_t - h_b > 0$
$k_a = 54 - 0,8(h_t - h_b)$	$d \geq 0,5$ e $h_t - h_b \leq 0$
$k_a = 54 - 1,6(h_t - h_b)d$	$d < 0,5$ e $h_t - h_b \leq 0$
$k_d = 18$	$h_t - h_b > 0$
$k_d = 18 - 15\left(\frac{h_t - h_b}{h_b}\right)$	$h_t - h_b \leq 0$
$k_f = -4 + 0,7\left(\frac{f}{925} - 1\right)$	Para cidades de porte mediano e centros urbanos com densidade moderada de árvores.
$k_f = -4 + 1,5\left(\frac{f}{925} - 1\right)$	Para centros metropolitanos.

3.5 Distribuições estatísticas da envoltória recebida

Os modelos de perda de percurso nos fornecem o valor médio da potência do sinal recebido como função dos parâmetros que mais fortemente influenciam a propagação do sinal no canal rádio. Contudo, existe um número incontável de variáveis que produzem incerteza em torno do seu valor médio. Os mais diferentes tipos de obstruções podem provocar atenuação, difração, reflexão ou espalhamento do sinal. Lembrando sempre que entre o transmissor e o receptor existem uma infinidade de obstáculos, portanto, é inviável ou mesmo impossível levar em consideração todos os fenômenos que influenciam a propagação de um sinal em um enlace rádio, assim, a flutuação do sinal recebido é analisada sob uma base estatística.

A flutuação aleatória do nível do sinal é conhecida como desvanecimento ou *fading*. Existem dois tipos de desvanecimento; (1) desvanecimento de larga escala ou lento e (2) desvanecimento de pequena escala ou rápido. O desvanecimento lento está relacionado com a variação do nível médio do sinal em uma área devido ao sombreamento, enquanto que associa-se ao desvanecimento rápido a variação do nível médio do sinal local devido aos múltiplos percursos.

3.6 Banda de coerência

Considere um sinal rádio qualquer com uma dada banda propagando-se em um ambiente rádio móvel. Devido aos efeitos dos múltiplos percursos, as diversas componentes deste sinal irão alcançar o destino (no caso, uma estação móvel) com diferentes atrasos. A máxima separação em frequência para que dois tons ainda sejam considerados correlacionados em frequência é chamada de *banda de coerência*.

Banda de coerência é uma medida estatística da faixa de frequência sobre a qual o canal pode ser considerado aproximadamente *plano*¹. Desta forma, duas senóides, por exemplo, com separação de frequência maior do que a banda de coerência do canal serão afetadas diferentemente pelo mesmo.

O canal é dito “não seletivo em frequência” ou plano, quando a banda da informação que por ele trafega for substancialmente menor do que a banda de coerência, caso contrário, o canal será dito “seletivo em frequência”.

É descrito a seguir algumas distribuições que melhor caracterizam a variação da envoltória do sinal recebido. Todas estas distribuições mostraram-se em comunhão com dados obtidos em medidas de campo.

3.6.1 Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal descreve a variação em larga escala da envoltória do sinal recebido, devido ao sombreamento provocado por obstruções tais como montanhas, edifícios, e outros. A função densidade de probabilidade correspondente é dada por

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\log}y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln y - m_{\log}}{\sigma_{\log}}\right)^2\right] \quad (3.12)$$

onde m_{\log} é a média logarítmica e σ_{\log} é seu desvio padrão logarítmico. A média em dB e o desvio padrão em dB estão relacionados com a média logarítmica e o desvio padrão logarítmico, respectivamente, pelas seguintes expressões,

¹Um canal é considerado plano quando as componentes de frequência que por ele trafegam são, aproximadamente, amplificadas ou atenuadas da mesma forma, sofrendo também um igual desvio linear de fase.

$$m_{dB} = m_{\log} \frac{10}{\ln 10}$$

$$\sigma_{dB} = \sigma_{\log} \frac{10}{\ln 10}$$

O sombreamento é modelado na literatura por uma variável lognormal de média 0 dB e desvio padrão de 8 dB.

3.6.2 Distribuição Rayleigh

A distribuição Rayleigh descreve a variação em pequena escala da envoltória do sinal recebido, em um ambiente de propagação com múltiplos percursos onde é assumido que a onda eletromagnética espalhada possui uma distribuição uniforme em torno do receptor, ou seja, não existe linha de visada. A função densidade de probabilidade correspondente é dada por

$$f(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (3.13)$$

onde r é a envoltória do sinal e σ_r^2 é a variância do mesmo.

3.6.3 Distribuição Rice

A distribuição Rice descreve a variação em pequena escala da envoltória do sinal recebido, em um ambiente de propagação com múltiplos percursos, onde existe uma linha de visada entre o transmissor e o receptor. A função densidade de probabilidade correspondente é dada por

$$f(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma_r^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma_r^2}\right) \quad (3.14)$$

onde r é a envoltória do sinal, $a^2/2$ é a potência da onda recebida na linha de visada, σ_r^2 é a potência da correspondente difusa e

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(x \cos \theta) d\theta$$

é a função de Bessel modificada de ordem zero. Note que se fizermos $a = 0$ em (3.14) a distribuição Rice se torna uma distribuição Rayleigh.

Capítulo 4

Múltiplo Acesso

4.1 Introdução

Como bem sabemos, o espectro de frequência é um recurso limitado (se pensarmos em termos da tecnologia disponível para usá-lo), portanto, devemos utilizá-lo da forma mais eficiente possível. Para que isto seja possível, devemos considerar os diversos esquemas de múltiplo acesso. Estes permitem que vários usuários móveis possam compartilhar simultaneamente o espectro de frequência disponível.

Existem basicamente três métodos de acesso, classificados de acordo com a maneira usada para implementá-los (frequência, tempo, código):

- Múltiplo acesso por divisão em frequência (FDMA¹)
- Múltiplo acesso por divisão no tempo (TDMA²)
- Múltiplo acesso por divisão em código (CDMA³)

Sistemas FDMA fazem uso de pequenas porções da banda total disponível para a transmissão durante todo o tempo, enquanto que sistemas que empregam TDMA como tecnologia de acesso, permitem que um transmissor faça uso de toda a banda disponível para a transmissão por um pequeno intervalo de tempo. Por outro lado, CDMA permite que todos os transmissores tenham acesso ao canal simultaneamente usando toda a banda disponível ao mesmo tempo.

¹Frequency-division multiple access

²Time-division multiple access

³Code-division multiple access

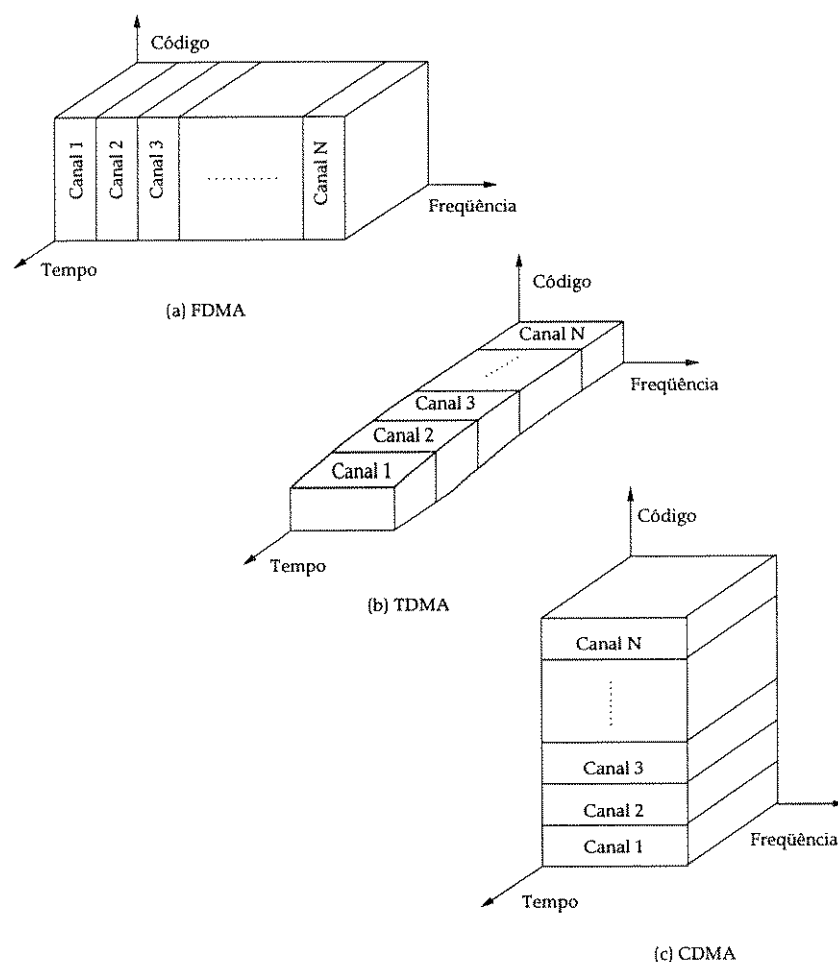


Figura 4.1: Maneira como as diferentes técnicas de acesso fazem uso do espectro disponível

A Fig. 4.1 ilustra o modo como os três tipos de acesso compartilham o recurso espectral. Na primeira, que trata dos sistemas FDMA, vê-se que o espectro é dividido em pequenas fatias e estas são atribuídas a cada usuário, por todo o tempo de uso. Na segunda, que trata de TDMA, o canal é usado por um determinado número de usuários, mas cada usuário só transmite no seu intervalo temporal específico. Na terceira e última, relativa aos sistemas CDMA, vemos que o espectro é compartilhado por todos durante todo o tempo, sendo a diferenciação realizada através das seqüências espalhadoras.

4.2 Duplexing

Em um sistema de comunicações móveis, é desejável que um usuário móvel esteja apto a enviar e receber informações simultaneamente da estação rádio base. Por exemplo, no

sistema telefônico convencional (rede telefônica fixa), é possível falar e ouvir ao mesmo tempo, e este efeito é chamado *duplexing* [9]. Duplexing pode ser realizado usando-se técnicas no domínio da frequência ou do tempo. Caso seja em frequência, chamaremos de *Frequency Division Duplexing* (FDD), caso no tempo, *Time Division Duplexing* (TDD).

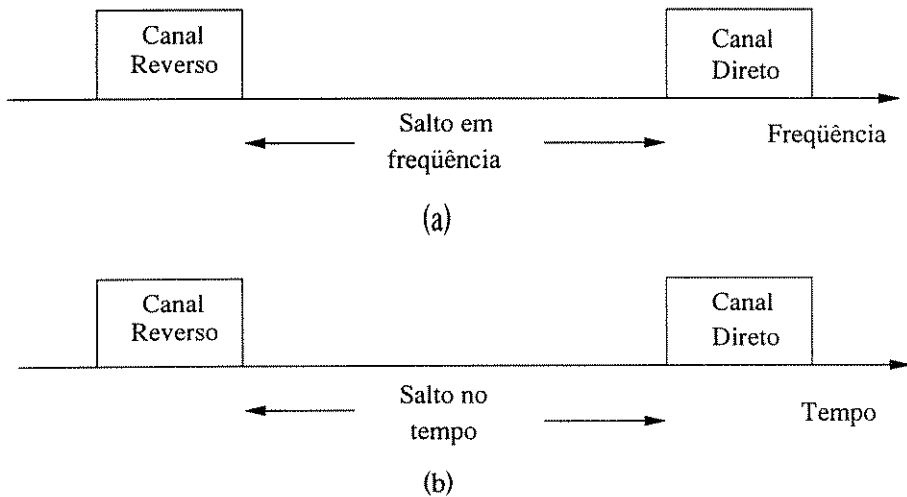


Figura 4.2: (a) Esquema de transmissão FDD, (b) Esquema de transmissão TDD

FDD faz uso de duas bandas de frequência distintas para cada usuário. A banda de frequência usada para o tráfego proveniente da ERB com destino ao móvel é chamada de *canal direto* enquanto que a banda usada para o tráfego proveniente do móvel com destino à ERB é chamada de *canal reverso*. TDD por sua vez, faz uso do tempo ao invés da frequência para a separação entre os canais reverso e direto. Se a separação temporal entre o canal direto e o reverso for pequena, então a transmissão e recepção parecem simultâneas sob o ponto de vista do usuário.

4.3 Arquiteturas de banda larga e banda estreita

4.3.1 Arquitetura de banda estreita

Podemos definir sistemas de banda estreita como sendo aqueles que fazem uso de uma largura de banda próxima à mínima necessária para a transmissão da informação. Em sistemas de múltiplo acesso de banda estreita, o espectro de rádio disponível é dividido em um grande número de canais de banda estreita. Geralmente estes canais operam em

FDD. Para que a interferência entre o canal direto e reverso seja minimizada, a separação em frequência é feita tão grande quanto possível dentro do espectro disponível, o que torna os *duplexers* mais baratos e permitem que a mesma antena seja usada na recepção e na transmissão. No FDMA de banda estreita, somente um canal é atribuído a cada usuário, o qual não é compartilhado por mais ninguém nas vizinhanças, e se FDD for usado, o sistema é chamado de FDMA/FDD.

Canais de banda estreita são geralmente associados a sistemas de grande capacidade⁴, mas muitas vezes com baixa qualidade de transmissão. Muito tempo e investimento tem sido gastos na pesquisa de modulações com o objetivo de se reduzir a banda ocupada pelo canal e ainda assim, manter uma qualidade de voz aceitável. Mais ainda, filtros estreitos e abruptos são necessários em equipamentos de rádio FDMA para se minimizar interferência de canais adjacentes. Isso contribui para um substancial aumento do custo dos equipamentos.

Uma característica de sistemas de banda estreita, ou seja, sistemas FDMA, é a existência de uma probabilidade de bloqueio bem definida devido ao fato que o estabelecimento de uma chamada é baseado na disponibilidade de um canal. Uma vez que todos os canais estejam sendo usados, novas chamadas serão bloqueadas. Não podemos nos esquecer que todos os sistemas possuem uma probabilidade de bloqueio não nula.

4.3.2 Arquitetura de banda larga

Podemos definir sistemas de banda larga como sendo aqueles que fazem uso de uma largura de banda muito maior do que a mínima necessária para a transmissão da informação. A grande vantagem dos sistemas de banda larga é que a banda usada para a transmissão pode exceder a banda de coerência fazendo com que o sinal sofra um desvanecimento seletivo. Isto significa que porções das frequências que compõem o sinal serão afetadas diferentemente pelo desvanecimento. O desvanecimento é um fenômeno que freqüentemente pode atenuar (20-40 dB) a intensidade do sinal em sistemas de banda estreita. O espalhamento do sinal por toda a banda disponível para a transmissão, em sistemas de banda larga, contribui para minimizar seus efeitos, assim, este tipo de diversidade provoca um efeito

⁴Quanto mais estreito for o canal, maior o número de canais acomodados dentro de uma mesma banda.

mais ameno do desvanecimento [10].

Em sistemas de banda larga, a densidade espectral de potência transmitida é baixa em todo o espectro dentro da banda disponível para transmissão, devido ao fato do sinal ter sido espalhado em uma larga banda. Desse modo a densidade espectral do sinal transmitido é muito menor do que de qualquer sinal transmitido convencionalmente (sem usar espalhamento espectral).

4.4 Sistemas com espalhamento espectral

Todos os sistemas de transmissão ou modulação possuem uma característica própria, que inclui não somente a frequência na qual o sinal é transmitido, mas também a banda que este sinal ocupa quando modulado pela forma de onda do sinal desejado.

Literalmente, sistemas com espalhamento espectral são aqueles que possuem o sinal transmitido espalhado sobre uma grande banda de frequência, de fato, muito maior que a menor banda necessária para que a mesma quantidade de informação seja transmitida. Como exemplo temos o sinal de voz que pode ser transmitido, usando-se modulação em amplitude, em uma banda duas vezes maior que a banda do próprio sinal. Um sistema com espalhamento espectral, por outro lado, faz com que um sinal em banda básica (canal de voz) com largura de banda de alguns $k\text{Hz}$, seja distribuído sobre uma banda que pode ser de alguns MHz .

A base da tecnologia de espalhamento espectral é expressa por C. E. Shannon na forma da capacidade de um canal AWGN como dada a seguir,

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4.1)$$

onde C é a capacidade do canal em bits/s, W é a largura da banda em Hertz, N é a potência do ruído e por último, S é a potência do sinal.

A eq. (4.1) nos mostra a relação entre a habilidade do canal em transmitir informação sem erro, comparada com a relação sinal ruído existente no canal e também com a banda usada para se transmitir esta informação. Sendo C a taxa de transmissão de informação

desejada e mudando-se de base, podemos escrever que:

$$C = 1.44W \log_e \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4.2)$$

para pequenas relações sinal/ruído ($S/N \leq 0,1$) e fazendo-se uso da série logaritmica [12]

$$\log_e \left(1 + \frac{S}{N} \right) = \frac{S}{N} - \frac{1}{2} \left(\frac{S}{N} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{S}{N} \right)^3 - \frac{1}{4} \left(\frac{S}{N} \right)^4 \dots \quad \left(-1 < \frac{S}{N} < 1 \right)$$

temos que

$$C = 1,44 \frac{S}{N} W,$$

o que nos leva a concluir que, para uma baixa relação sinal ruído, podemos ter uma grande taxa de informação aumentando-se a largura de banda usada para a transmissão da informação. Por exemplo, se fizermos um sistema operar em um enlace no qual a interferencia é 100 vezes maior do que o sinal, e sua taxa de transmissão for de 3 kbits/s (kbps), então esta informação deve ser transmitida em uma banda de

$$W = \frac{3000 \times 100}{1,44} = 208 \text{ kHz}$$

O modo mais comum de “espalharmos” a banda de um sinal é adicionando-se ao sinal de informação um código cujo inverso do período de chip seja igual a banda desejada. É claro que a informação a ser enviada deve estar em uma forma digital, porque a adição a uma seqüência código envolve uma soma módulo 2 a um código binário. Portanto, um sistema com espalhamento espectral deve obedecer dois critérios: (1) A largura da banda de transmissão deve ser muito maior do que a banda ou a taxa de informação a ser enviada e (2) alguma função diferente da informação a ser enviada é empregada para determinar a largura de banda modulada resultante.

Esta é a essência da comunicação com espalhamento espectral, ou seja, a arte de expandir a banda de um sinal, transmitir este sinal com banda expandida e recuperar o sinal desejado, realocando-o em sua banda original. Mais ainda, isto é feito com o propósito de permitir que o sistema envie informação livre de erros em um ambiente com interferência.

Em um mundo com uma limitada quantidade de frequência disponível para satisfazer a sempre crescente demanda, sejam elas destinadas a aplicações militares ou comerciais, a questão que vem a mente é, por que devem ser consideradas viáveis as técnicas de

espalhamento espectral? Algumas das propriedades do espalhamento espectral [13] que ajudam a responder esta questão são as seguintes:

1. Capacidade de endereçamento seletivo.
2. Rejeição de interferência, seja ela intencional ou não.
3. Permite o acesso múltiplo por divisão por código.
4. Baixa probabilidade de interceptação ao transmitir o sinal desejado com uma baixa densidade espectral de potência, “escondendo-o”, e assim, tornando-o difícil de ser detectado na presença do ruído de fundo por um ouvinte não desejado.
5. Obtenção de alta resolução nas medidas de atraso de tempo e velocidade em radares e navegação.

Estas propriedades são decorrentes das seqüências códigos usadas e da largura de banda do sinal. Surge também, como propriedade resultante do código empregado, a proteção do sinal contra ouvintes não desejados. Isto porque um usuário ou um grupo deles, podem estar em conversação usando uma determinada seqüência código enquanto que os demais usuários estarão usando outras seqüências diferentes e com baixa correlação entre elas, o que permite que o receptor possa decodificar corretamente a mensagem a ele destinada. O sistema não se torna totalmente seguro, mas um considerável esforço terá que ser feito para se decodificar o sinal, inibindo assim, atitudes desta natureza.

4.5 Ganho de Processamento e Margem contra Interferência

O parâmetro mais comum na descrição ou especificação de um sistema com espectro espalhado é o seu “ganho de processamento”. Ganho de processamento é uma quantidade que pode ser facilmente obtida dada a banda de transmissão do sistema e a taxa de informação usada. Na seção 4.4, a fórmula de capacidade de canal de Shannon nos mostra que uma informação pode ser transmitida livre de erros para um baixa relação sinal/ruído se empregarmos algum método que aumente a largura de banda de transmissão. O ganho de processamento produzido pelo processo de expansão e contração da banda do sinal é igual a relação entre a banda usada para transmiti-lo e a banda de informação, ou seja,

$$G_p = \frac{W}{R_b} \quad (4.3)$$

Um sistema em espalhamento espectral obtém seu ganho de processamento em uma operação seqüencial de expansão e contração da largura de banda do sinal. Os sinais espalhados espectralmente são multiplicados pela seqüência código no receptor. Quando a seqüência código do receptor for igual à seqüência código usada na transmissão, o sinal desejado retorna a ocupar a banda original, enquanto que outros sinais são espalhados pela referência local. Um filtro então rejeita tudo o que está fora da banda do sinal desejado (ruído atmosférico, ruído térmico, interferência, etc.). A diferença entre a relação sinal ruído na saída e na entrada do receptor, é conhecida como seu ganho de processamento. Como exemplo, um sistema com relação sinal interferência na entrada igual a -12 dB e uma relação sinal ruído na saída igual a 10 dB, possui um ganho de processamento igual a 22 dB.

Porém, isto não significa que um sistema pode operar quando envolto por uma interferência com potência maior do que a potência do sinal desejado, de um montante igual a seu ganho de processamento. Para sanarmos esta questão, outro termo deve ser apresentado. Este termo expressa a capacidade de um sistema em operar em tais ambientes hostis, e é conhecido como “margem contra interferência”. Margem contra interferência é justamente a relação interferência/sinal na entrada do sistema e é dada por,

$$M_I = G_P - \left(\frac{S}{N} \right)_{saída} \quad (4.4)$$

onde $(S/N)_{saída}$ é a relação sinal ruído na saída do sistema.

Por exemplo, um sistema com 22 dB de ganho de processamento, com uma relação sinal ruído na saída igual a 10 dB, terá uma margem contra interferência de 12 dB, ou seja, é esperado que o sistema funcione bem com um nível de interferência de até 12 dB acima do nível do sinal desejado.

4.6 Acesso Múltiplo por Divisão por Código - CDMA

É esperado um drástico aumento do número de assinantes celulares móveis ao redor do

mundo, de 18,2 milhões em 1997 para 400 milhões em 2001. Portanto, é necessária uma tecnologia que possibilite maximizar o uso das limitadas bandas de frequência disponíveis, com o objetivo de acomodar a rápida e sempre crescente demanda por serviços celulares.

Os assinantes estão cada vez mais exigentes por novos serviços em multimídia, os quais incluem além de voz, dados e imagens. Em alguns casos necessita-se de comunicações via satélite. Isto requer uma tecnologia em comunicações que sirva de base para a próxima geração em telecomunicações e possibilite uma enorme variedade de serviços avançados.

Até agora, vários sistemas de comunicações móveis foram adotados em diferentes nações e regiões geográficas, mas o que se nota atualmente é um esforço global para se unificar estes diferentes sistemas. Como resultado, há a necessidade de se selecionar uma tecnologia que tenha um grande potencial, para que esta seja considerada o padrão para a telefonia móvel do século 21.

Na avançada era da informação que em breve nos espera, a “força” de uma nação dependerá de sua infraestrutura de comunicações. As tecnologias de telecomunicações são pontos chave no processo de maximização das capacidades de comunicação de um país. As nações dependem de uma tecnologia avançada de baixo custo, grande potencial e alta eficiência, como suporte para um sofisticado sistema de telecomunicação global para o próximo século. O CDMA pode ser este padrão.

Múltiplo acesso por divisão por código (CDMA) é um método de acesso onde todos os usuários estão habilitados a transmitir simultaneamente, operam na mesma frequência nominal e usam toda a banda disponível para o sistema. Uma das principais características do CDMA é que pouca coordenação dinâmica é necessária, oposto dos sistemas que usam FDMA e TDMA, onde é crítico o gerenciamento das frequências e do tempo, respectivamente [14].

O CDMA é uma aplicação das técnicas de espalhamento espectral. Ele pode ser classificado como um tipo de Acesso Múltiplo por Espalhamento Espectral (*Spread Spectrum Multiple Access* ou SSMA). Outros membros desta família são o FHMA (*Frequency Hopped Multiple Access*), o THMA (*Time Hopped Multiple Access*), e sistemas usando técnicas híbridas que não serão abordadas neste trabalho (Na verdade, o sistema padronizado na IS-95 é um sistema híbrido FDMA/CDMA onde a banda total disponível de 12,5 MHz é

dividida em sub-bandas de 1,25 MHz e aí, então, dentro desta sub-banda, são aplicadas as técnicas de espalhamento espectral).

Sistemas CDMA possuem probabilidade de bloqueio vinculada à relação sinal/interferência, ou seja, novas chamadas não serão possíveis em um sistema que já se encontra imerso em um alta interferência. Como consequência disto, temos uma degradação na relação sinal/interferência de todos os usuários, porque toda informação além do sinal desejado, contribui como interferência.

O CDMA apresenta em suas características, algumas vantagens em relação aos esquemas de acesso convencionais, o que o torna uma boa opção para sistemas, tais como, os de rádio móvel. Algumas destas características são listadas a seguir.

- Diferentemente de TDMA e FDMA, CDMA possui uma capacidade flexível de acomodar usuários, ou seja, à medida que o número de usuários aumenta, a relação sinal/interferência degrada-se.
- O desvanecimento multipercurso pode ser substancialmente reduzido, pois o sinal é espalhado sobre uma grande banda, e se esta for maior do que a banda de coerência do canal, haverá “diversidade em frequência” (é como se existisse várias cópias do mesmo sinal transmitido). Esta se usada adequadamente, pode reduzir os efeitos do desvanecimento de pequena escala [15].
- A taxa no canal é alta em sistemas CDMA. Desta forma a duração do chip é muito pequena e, usualmente, muito menor do que a “Dispersão Temporal do Canal” (*delay spread*). Dado que as seqüências PN têm baixa autocorrelação, componentes dos múltiplos percursos que forem atrasadas pelo canal por mais de um chip, aparecerão como interferência e portanto, um receptor do tipo RAKE deve ser usado para melhorar a recepção coletando as versões atrasadas do sinal requerido.
- Aplicações de CDMA em sistemas rádio móvel proporcionam soft handoff o qual diminui a taxa de queda de chamada. Um usuário móvel só irá deixar de se comunicar com uma determinada ERB quando tiver condição de entrar em contato com outra ERB. Caso o usuário esteja se dirigindo para uma área que não esteja sendo coberta pelo sistema, então esta chamada será inevitavelmente derrubada.

- O problema perto-longe (*near-far problem*) é crítico em sistemas CDMA. Este problema ocorre quando a potência que chega na ERB não é igual para todos os usuários. Em geral, o sinal recebido do móvel com maior potência produz maior interferência no demodulador na estação rádio base, por esta razão, em CDMA, sinais recebidos com um nível de potência maior, aumentam o patamar de interferência para os sinais que chegam com um menor nível de potência. Isto acontece porque em CDMA, os usuários adicionados são vistos como interferência pelo usuário de referência. Na maioria das aplicações CDMA, minimiza-se este problema com controle de potência.

Capítulo 5

IS-95

5.1 Introdução

A técnica de múltiplo acesso CDMA foi desenvolvida pela QUALCOMM, e padronizada pela *Telecommunications Industry Association* (TIA) em conjunto com a *Electronic Industry Association* (EIA).

Os sistemas CDMA usando o padrão IS-95 [16, 17, 18] operam na mesma banda de frequência que o conhecido sistema *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), usando FDD com espaçamento de 25 MHz entre os canais direto e reverso¹. A banda de frequência reservada para o canal direto e reverso esta situada de 869 até 894 MHz e de 824 até 849 MHz, respectivamente. A estação móvel está apta a operar em CDMA nos canais mostrados na Tab. 5.1 os quais são definidos em termos da frequência e sequência código utilizada. Sessenta e quatro funções de Walsh são utilizadas para identificar os canais diretos, e uma sequência pseudo-aleatória (*pseudo-noise* ou *PN*) com diferentes deslocamentos temporais é usada para identificar os canais reversos. A Fig. 5.1 nos mostra a estrutura de um canal CDMA. As características de modulação e demodulação de um sistema CDMA são mostradas na Tab. 5.2.

¹O espectro de frequência reservado para os sistemas celulares na banda A foi dividido de tal maneira que ele não é divisível por 1,25 MHz (como pode ser observado na Tab. 5.1). Então, o provedor de telefonia celular na banda A não pode particionar o espectro disponível em dez sub bandas de 1,25 MHz, como é feito na banda B.

Sistema	Frequência válida para CDMA	No de Canais Analógicos	No de Canais CDMA	Frequência do Transmissor (MHz)	
				Móvel	Base
A'' (1 MHz)	Não	22	991	824,04	869,04
			1012	824,67	869,67
	Sim	11	1013	824,70	869,70
			1023	825,00	870,00
A (10 MHz)	Sim	311	1	825,03	870,03
			311	834,33	879,33
	Não	22	312	834,36	879,36
			333	834,99	879,99
B (10 MHz)	Não	22	334	835,02	880,02
			355	835,65	880,65
	Sim	289	356	835,68	880,68
			644	844,32	889,32
	Não	22	645	844,35	889,35
			666	844,98	889,98
A' (1,5 MHz)	Não	22	667	845,01	890,01
			688	845,64	890,64
	Sim	6	689	845,67	890,67
			694	845,82	890,82
	Não	22	695	845,85	890,85
			716	846,48	891,48
B' (2,5 MHz)	Não	22	717	846,51	891,51
			738	847,14	892,14
	Sim	39	739	847,17	892,17
			777	848,31	893,31
	Não	22	778	848,34	893,34
			799	848,97	893,97

Tabela 5.1: Alocação de frequências

Modulação	QPSK
Taxa de chips	1,2288 Mcps
Taxa nominal de dados	9600 bps
Largura de banda filtrada	1,25 MHz
Codificação	Convolutional com decodificador de Viterbi
Intercalador	“Quadros” de 20 ms

Tabela 5.2: Características de um canal CDMA

É diferente a forma como é implementada a modulação e a codificação nos canais direto e reverso. Um sinal “piloto” é transmitido por cada ERB para auxiliar a estação móvel na avaliação da potência no canal direto. Uma codificação robusta possibilita operar estes canais com uma relação E_b/N_0 entre 5-7 dB.

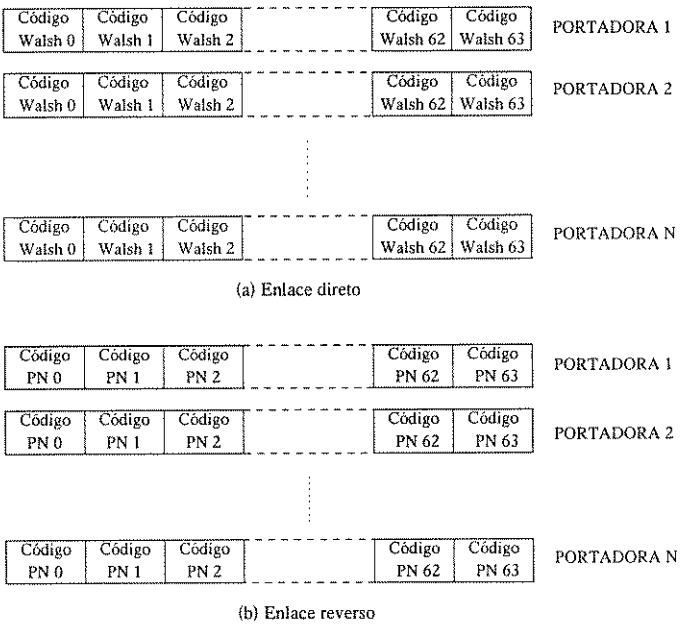


Figura 5.1: Enlaces direto e reverso em um sistema CDMA

Sistemas CDMA empregam controle de potência e detecção de atividade de voz para que possam minimizar a interferência mútua. Codificadores de voz de taxa variável fazem uso da atividade de voz; estes operam em uma taxa máxima de 8 kbps e mínima de 1 kbps, dependendo do nível da atividade de voz. Com o decréscimo da taxa de dados, os circuitos de controle de potência reduzem a potência do transmissor para alcançar a mesma taxa anterior de bits errados. Portanto, um preciso controle de potência é fundamental para afastarmos a possibilidade de transmitirmos excessiva potência, o que contribui para um aumento no nível total de interferência do sistema.

Um intercalador temporal com tamanho de quadro de 20 ms é usado, conjuntamente com códigos corretores de erros, para uma maior proteção contra o erro do controle de potência e rápidos desvanecimentos devido aos múltiplos percursos. O tamanho do quadro é igual ao usado em algoritmos de compressão de voz.

Um receptor do tipo RAKE é usado para tirar vantagens de atrasos em múltiplos

percursos maiores do que $1\ \mu s$, o qual é muito comum em redes celulares em ambientes urbanos e suburbanos.

5.2 Enlace Direto

Os canais do enlace direto incluem 1 canal piloto (Fig. 5.2), 1 canal de sincronismo (Fig. 5.3) e 62 outros canais que estão divididos em canais de tráfego (Fig. 5.4) e *paging* (Fig. 5.5). Todos os 62 canais podem ser usados para o tráfego direto, mas no máximo 7 canais podem ser usados para paging. A informação em cada canal é modulada por uma sequência apropriada de Walsh e então modulada por um par em quadratura de seqüências PN, a uma taxa fixa de chips de 1,2288 Mcps. O canal piloto é sempre associado à seqüência Walsh número zero, enquanto que o canal de sincronismo é associado à seqüência walsh 32. Quando os canais de paging estão presentes, estes são associados às seqüências de 1 até 7 (inclusive) em ordem crescente. As seqüências restantes são usadas para os canais de tráfego.

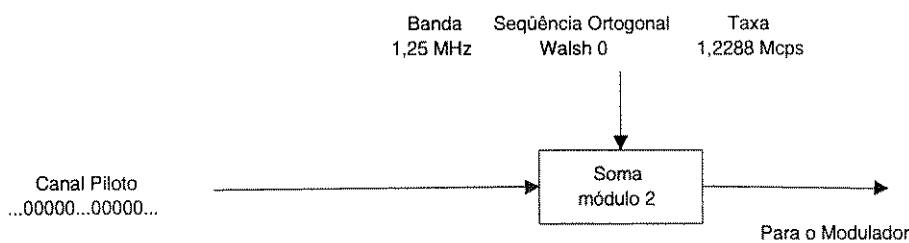


Figura 5.2: Estrutura do canal piloto

O canal de sincronismo sempre opera à taxa de 1200 bps e é codificado por um código convolucional com taxa 1/2, repetido para 4800 bps e entrelaçado (“interleaved”) sobre o período da seqüência binária pseudo-aleatória do piloto.

Os canais de tráfego no canal direto são agrupados em conjuntos. O conjunto 1 possui 4 taxas: 9600, 4800, 2400 e 1200 bps. O conjunto 2, também possui 4 taxas: 14400, 7200,

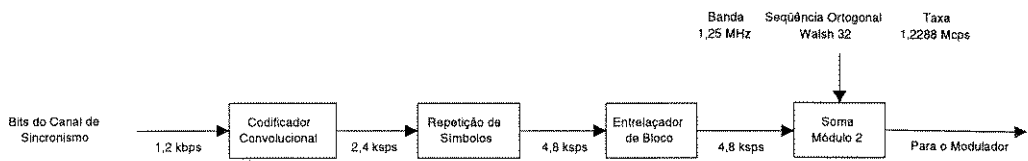


Figura 5.3: Estrutura do canal de sincronismo

3600 e 1800 bps. Todos os sistemas rádio suportam o conjunto 1 no canal de tráfego direto, enquanto que o conjunto 2 é opcional.

A voz é codificada para trafegar no canal de tráfego direto usando-se um codificador de voz com taxa variável, dependente da atividade de voz do usuário. Dado que o tamanho do quadro é fixo em 20 ms, o número de bits por quadro depende da taxa de transmissão que está sendo usada. A taxa de transmissão no canal de tráfego é duplicada com o uso de um codificador convolucional de taxa 1/2. É feita uma repetição dos símbolos e logo após, realizado um entrelaçamento sobre os 20 ms. Os dados embaralhados são multiplexados com a informação do controle de potência. O sinal multiplexado possui taxa de 19200 bps e passa para 1,2288 Mcps com a adição da seqüência de Walsh. O sinal é multiplicado pela seqüência binária pseudo-aleatória do canal piloto para posterior identificação pelo móvel de qual ERB este sinal foi transmitido.

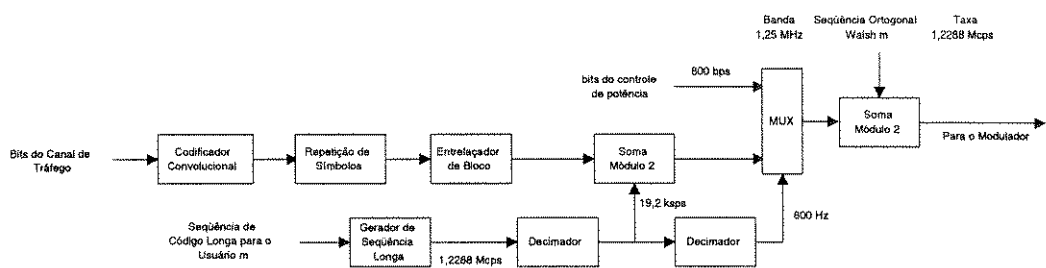


Figura 5.4: Estrutura do canal de tráfego no enlace direto

O canal de paging é responsável por transmitir instruções e informações relativas ao sistema para a estação móvel. Os dados do canal de paging são processados de uma forma similar aos dados do canal de tráfego, contudo, não há variação no nível de potência emitida neste canal. O canal de paging opera em uma taxa de dados igual a 9600 ou 4800 bps.

Todos os 64 canais são combinados para formar um único sinal em fase (*I*) e um

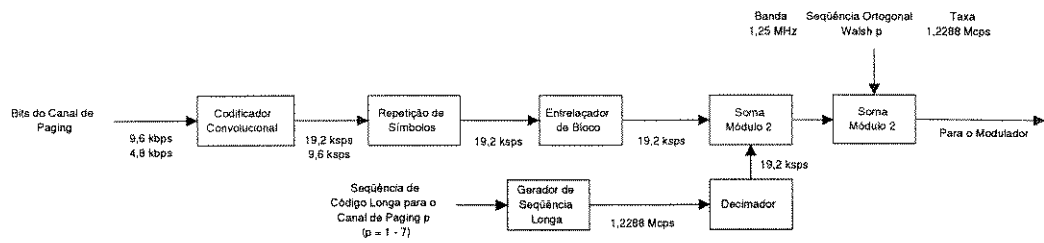


Figura 5.5: Estrutura do canal de paging

em quadratura (Q), posteriormente enviados a um modulador em quadratura. Os sinais resultantes são somados para formar um sinal QPSK.

O canal piloto transmitido pela estação rádio base é usado como referência por todas as estações móveis no processo de demodulação. O nível de potência para o canal piloto é de 4 a 6 dB maior do que o nível de potência de um canal de tráfego para todas as estações rádio base. Os sinais pilotos são seqüências binárias em quadratura, com período igual a 32768 chips. Dado que a taxa de chips é igual a 1,2288 Mcps, o período correspondente de uma seqüência binária pseudo aleatória no canal piloto é igual a 26,66 ms, o que é equivalente a 75 repetições do canal piloto a cada 2 segundos. Todas as estações rádio base possuem a mesma seqüência binária pseudo aleatória para o canal piloto, só que esta seqüência é usada com diferentes defasagens, para que uma ERB possa ser diferenciada das demais. Estas defasagens acontecem em incrementos de 64 chips, tornando possível assim um total de 511 defasagens. Este grande número possível de defasagens assegura uma precisa identificação de uma determinada ERB no sistema, mesmo em densos ambientes micro celulares.

A estação móvel processa o canal piloto com o objetivo de encontrar a componente de sinal mais forte. O sinal contido no canal piloto fornece uma precisa estimativa do atraso temporal, fase, e intensidade dos três percursos². Estas 3 componentes são rastreadas na presença do desvanecimento rápido e combinadas coerentemente para aumentar a qualidade do sinal.

Uma vez identificada a defasagem correspondente ao piloto mais forte pela estação rádio móvel, através do processamento das componentes de múltiplos percursos, a estação

²A norma IS-95 se utiliza de 3 das L réplicas do sinal transmitido no receptor

móvel examina o sinal proveniente do canal de sincronismo. O canal de sincronismo contém informações sobre o sincronismo do código longo e da hora do dia para assegurar que os geradores do código longo, na estação base e na estação móvel, estejam alinhados e sejam idênticos. Finda esta etapa, a estação móvel começa a acessar o canal de paging e a esperar por informações do sistema. Ao completar a aquisição e sincronização, a estação móvel entra em estado de espera (“idle”). No estado de espera, a estação móvel fica “ouvindo” o canal de paging e está apta a receber e iniciar uma chamada.

5.3 Enlace Reverso

Os canais do enlace reverso são separado dos canais do enlace direto por 45 MHz. Os canais reversos usam a mesma sequência binária pseudo aleatória com período de 32768 chips, como usado nos canais do enlace direto. Existem dois tipos de canais reversos, o canal de acesso (Fig. 5.6) e o canal de tráfego reverso (Fig. 5.7). Há no máximo 62 canais de tráfego e até 32 canais de acesso. Os canais de acesso permitem que as estações móveis transmitam informações que não de tráfego (originar chamadas, responder a uma busca da ERB, etc.). A taxa de transmissão de dados no canal de acesso é fixa em 4800 bps. Cada canal de acesso é identificado por uma sequência distinta de código longo contendo um número de acesso, o número do canal de paging associado com o canal de acesso e outros dados do sistema.

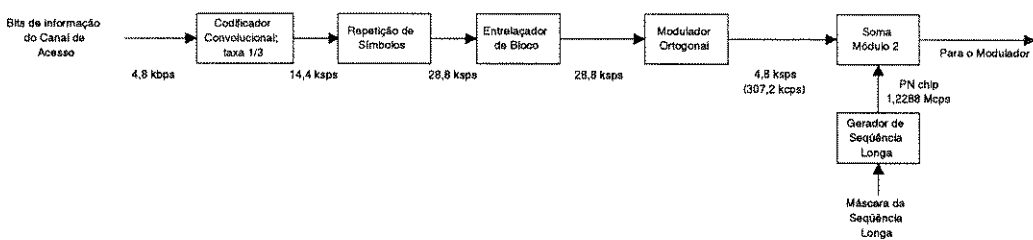


Figura 5.6: Estrutura do canal de acesso

Os dados transmitidos no canal reverso são agrupados em quadros de 20 ms e todos os dados do canal reverso são codificados por códigos convolucionais com taxa 1/3, repetidos, intercalados em blocos e modulados. O símbolo de modulação é uma das 64 formas de onda mutualmente ortogonais que são geradas usando-se funções de Walsh.

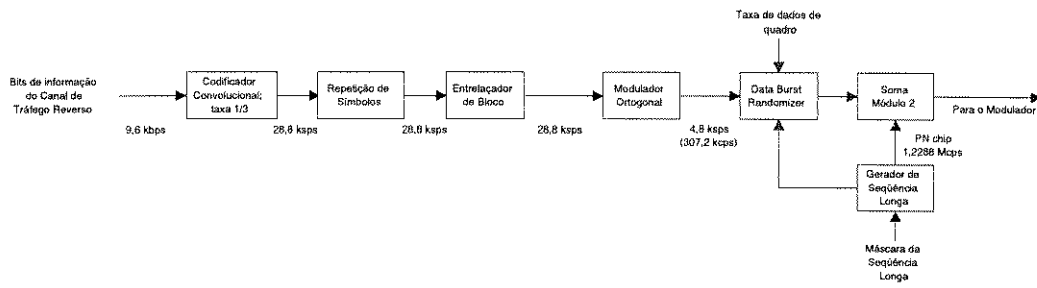


Figura 5.7: Estrutura do canal de tráfego reverso

O canal reverso pode ter quatro taxas de transmissão de dados: 9600, 4800, 2400 ou 1200 bps. A porcentagem do tempo em que ocorre transmissão varia proporcionalmente com a taxa de dados, sendo 100% na taxa de 9600 bps, e 12,5% na taxa de 1200 bps. A taxa de transmissão é fixa em 28800 símbolos codificados por segundo. Dado que seis símbolos são agrupados como um dos 64 símbolos para transmissão, a taxa de transmissão de símbolos de modulação é de 4800 símbolos por segundo. Isto resulta em uma taxa fixa de chips do código Walsh de 307,2 kcps. A taxa de espalhamento da sequência PN é fixa em 1,2288 Mcps, assim, cada chip do código Walsh é espalhado por 4 chips da sequência PN. A Tab. 5.3 resume as informações anteriormente descritas.

Depois do espalhamento ortogonal, o canal de tráfego reverso e o canal de acesso são espalhados em quadratura. Sequências PN do canal piloto sem nenhuma defasagem são usadas para espalhar o sinal. Estas sequências são periódicas com período igual a 2^{15} chips (32768 chips de comprimento) e são baseadas nos seguintes polinômios característicos:

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

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

A taxa de chips da sequência PN no canal piloto é igual a 1,2288 Mcps e seu período é 26,666 ms. A modulação usada é a O-QPSK (*Offset Quadrature Phase-Shift Keying*). Os dados espalhados pela sequência em quadratura são defasados de meio período de chip (406,901 ns) com respeito aos dados espalhados pela sequência em fase. A Tab. 5.4 define as taxas e suas relações no canal de acesso.

Cada ERB transmite um sinal piloto com a potência constante. O nível de potência recebido no canal piloto possibilita a estação móvel estimar a perda de percurso entre ela

Taxa de bits	9600 bps	4800 bps	2400 bps	1200 bps	Unidade
Taxa de chips	1,2288	1,2288	1,2288	1,2288	Mcps
Taxa do codificador convolucional	1/3	1/3	1/3	1/3	bits/(símbolos codificados)
Fração do tempo transmitido	100	50	25	12,5 %	
Taxa de símbolos de código	$3 \times 9600 = 28800$	28800	28800	28800 sps	
Modulação	6	6	6	6	(símbolos cod.)/ (símbolos de mod.)
Taxa de símbolos modulados	$28800/6 = 4800$	4800	4800	4800	sps
Taxa de chips do cod. Walsh	$64 \times 4800 = 307,2$	307,2	307,2	307,2	kcps
Durac. dos símbolos de modulação	$1/4800 = 208,33$	208,33	208,33	208,33	μs
(PN chip)/ (Walsh chip)	4	4	4	4	(PN chip)/ (Walsh chip)

Tabela 5.3: Parâmetros da modulação do canal de tráfego reverso

Taxa de bits	4800 bps	Unidade
Taxa de chips	1,2288	Mcps
Taxa do codificador convolucional	1/3	bits/(bits codificados)
Repetição de símbolos	2	símb./(símb. codificados)
Tempo	100	%
Taxa de símbolos codificados	28800	sps
Modulação	6	(símb. codigos)/ (símb. modulado)
Taxa de modulação de símbolos	4800	sps
Taxa de chips do código Walsh	307,2	μs
PN chip/símbolos codificados	42,67	PN chip/símbolos codificados
PN chip/símbolos modulados	256	PN chip/símbolos modulados
PN chip/Walsh chip	4	PN chip/Walsh chip

Tabela 5.4: Parâmetros de modulação do canal de acesso

e a estação rádio base. Sabendo a perda de percurso, a estação móvel ajusta sua potência transmitida tal que a ERB receba a potência desejada. A ERB mede a potência recebida e comunica a estação móvel para fazer os devidos ajustes em sua potência de transmissão. Um comando a cada 1,25 ms é enviado pela ERB para a estação móvel para tal ajuste, enquanto que a ERB usa relatórios de quadros (frames) errados, emitidos pela estação móvel, para aumentar ou diminuir sua potência transmitida.

Capítulo 6

Simulador de Rede Celular

6.1 Introdução

Simuladores são necessários quando se deseja obter resultados rápidos e a um custo reduzido de problemas complexos, como é o caso da implementação e otimização de um sistema celular CDMA [19, 20, 21].

Até agora muitos países, incluindo os Estados Unidos, Rússia, China e Coreia do Sul, adotaram a norma TIA/EIA IS-95 (ou uma versão equivalente da mesma) como padrão para os telefones celulares digitais. Especialmente na Coreia do Sul, foi desenvolvida, implementada e testada uma infraestrutura celular digital CDMA durante o período que vai de 1992 até 1995. Os principais detentores desta tecnologia começaram a operar este tipo de sistema no começo de 1996.

6.2 Definição dos parâmetros

A Fig. 6.3 representa o diagrama em blocos do simulador. O primeiro passo para uma simulação bem sucedida, é a definição dos parâmetros a serem usados no decorrer do processo. Para maior simplicidade dividi os parâmetros a serem definidos em 6 grupos de acordo com a entidade a que estão relacionados. Os grupos são os seguintes: Estação Móvel, Estação Rádio Base, Rádio Enlace, Soft Handoff, Controle de Potência e Sistema.

6.2.1 Estação Móvel

Os seguintes parâmetros devem ser configurados para as estações móveis.

λ_i	Taxa de chegada de chamadas [chamada/hora/célula]
μ_i	Duração média das chamadas [seg]
v_{min}	Velocidade mínima [m/s]
v_{max}	Velocidade máxima [m/s]
G_m	Ganho da antena do receptor móvel [dB]
P_{max}	Potência máxima de transmissão [W]
A.V.	Atividade de voz [ON/OFF]
F.A.V.	Fator de atividade de voz [adimensional]

O processo de chegada de chamadas em um sistema telefônico é regido segundo a distribuição de Poisson com taxa de chegada de chamada igual a λ_i usuários/segundo para uma determinada célula, portanto, esta foi a distribuição escolhida para a geração das chamadas (entenda-se usuários móveis). O intervalo de tempo entre chamadas é do tipo exponencial negativo. A duração das mesmas é dada segundo uma distribuição exponencial com média igual a μ_i .

Os usuários móveis são distribuídos uniformemente em área ao redor de uma ERB.

$$d = Raio\sqrt{U[0,1]}$$

$$\theta = 2\pi U[0,1]$$

Estes possuem velocidade (m/s) e direção gerados por distribuições uniformes $U[v_{min}, v_{max}]$ e $U[0, 2\pi]$, respectivamente e distância d até a ERB.

A potência máxima para transmissão sugerida por [16] é igual a 200 mW. O fator de atividade de voz é a relação entre o tempo em que um usuário permanece falando sobre o tempo em que ele permanece falando mais o tempo em que permanece em silêncio. Para se gerar a atividade de voz de cada usuário foi adotado o modelo de atividade de dois estado, ou seja, ora o usuário está falando, ora não.

6.2.2 Estação Rádio Base

Os seguintes parâmetros devem ser configurados para uma ERB:

Posição	Coordenada cartesiana bidimensional da ERB [m;m]
Raio	Raio da ERB [m]
P_{piloto}	Potência no canal piloto [W]
$P_{sincronismo}$	Potência no canal de sincronismo [W]
P_{paging}	Potência no canal de paging [W]
G_{ERB}	Ganho da antena da ERB [dB]
$P_{tráfego_{max}}$	Potência máxima alocada para os canais de tráfego [W]

Cada estação rádio base possui então, um par de coordenadas no plano cartesiano bidimensional que a localiza, e também um raio, o que caracteriza uma área para a distribuição de usuários desta estação rádio base.

Não existe nenhuma limitação na quantidade de ERBs suportadas pelo software. Também é possível a simulação de qualquer tipo de agrupamento de células (retangular ou hexagonal).

Deve-se tomar o cuidado ao se posicionar as ERBs para que todos os espaços entre células, ou grande parte deles, estejam dentro da área de cobertura de alguma ERB. Se este cuidado não for tomado, a taxa de bloqueio e de queda de chamada irá ser alta, independentemente da taxa de chegada de usuários móveis.

6.2.3 Rádio Enlace

Considera-se os seguintes fatores no enlace rádio: perda de propagação e o sombreamento (seção 3.6.1) [22]. O desvanecimento de pequena escala ou rápido é combatido com técnicas de codificação dos bits de informação e não é considerado neste trabalho porque a análise aqui feita é baseada no nível médio do sinal recebido.

Devem ser definidos os seguintes parâmetros,

N_0	Densidade espectral do ruído branco [W/Hz]
σ_S	Desvio padrão do sombreamento [dB]

Quanto à propagação, foram implementados dois modelos, o modelo de perda de percurso com decaimento logarítmico com a distância (seção 3.3) e o modelo COST 231 - Walfish - Ikegami (seção 3.4). Para uma dada simulação, um deles deve ser escolhido no início e considerado como padrão até o final. Cada um deles possuem suas vantagens e desvantagens como descrito no capítulo 3. Se optarmos pelo modelo COST 231 - Walfish - Ikegami, devemos informar ao programa os seguintes parâmetros:

- h_t Altura da antena da ERB [m]
- h_b Altura da média dos prédios na região [m]
- h_m Altura da antena do receptor móvel [m]
- d_b Distância média entre prédios [m]
- r_w Largura da rua [m]

Caso contrário devemos informar o expoente de perda de percurso β .

6.2.4 Soft Handoff

O estado de soft handoff de um usuário móvel é baseado na potência recebida no canal piloto. De acordo com esta potência, as ERBs são enquadradas em 4 conjuntos; ativo, candidato, vizinho e restante [16]. Ao conjunto ativo, pertencerão todas as ERBs que fazem parte do processo de soft handoff. Ao conjunto candidato, pertencerão todas as ERBs que possuem a relação E_c/I_0 (relação sinal/ruído no canal piloto) acima de T_ADD mas não fazem parte do processo de soft handoff. As que não possuírem a relação E_c/I_0 acima de T_ADD , estarão contidas no conjunto vizinho (ERBs mais próximas ao móvel) e ao conjunto restante. Contudo, neste simulador serão considerados somente 3 conjuntos, havendo uma fusão do conjunto vizinho com o conjunto restante, o que não implica em nenhuma mudança no processo de soft handoff proposto pela IS-95.

Todas as ERBs que fizerem parte do processo de soft handoff com o usuário móvel, pertencerão ao conjunto ativo. Por outro lado, todas as ERBs que tenham condições de estabelecer comunicação com o usuário ($E_c/I_0 \geq T_ADD$) mas que não estão fazendo parte do processo de soft handoff, irão pertencer ao conjunto candidato, e as demais, ao conjunto restante. Os limiares usados na determinação do estado de soft handoff são

observados na Fig. 6.1.

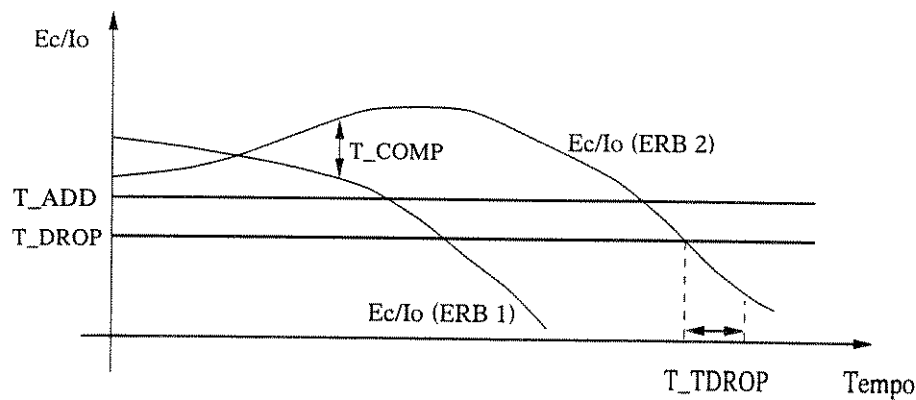


Figura 6.1: Limiares usados na determinação do estado de handoff

Estes limiares são descritos a seguir.

- T_{ADD}** Limiar usado para a translação de uma ERB do conjunto restante para o conjunto candidato [dB]
- T_{DROP}** Limiar usado para iniciar o contador temporal para a mudança de uma ERB do conjunto ativo para o restante [dB]
- T_{TDROP}** Intervalo temporal em que a ERB passa do conjunto ativo (quando abaixo de T_{DROP}) para o conjunto restante [s]
- T_{COMP}** Para que uma ERB saia do conjunto candidato para o ativo é necessário que sua relação E_c/I_0 seja maior que a relação E_c/I_0 de alguma ERB no conjunto ativo no montante de T_{COMP} [dB]

Como exemplo, baseado na Fig. 6.1, imagine que E_c/I_0 de um dado canal piloto supere T_{ADD} (ponto 1), então, neste momento, a ERB relativa a este canal piloto passa para o conjunto candidato. Caso a relação E_c/I_0 aumente (como é mostrado), atingiremos um ponto em que esta relação será maior que a mesma relação de algum canal piloto no conjunto ativo no montante de T_{COMP} (ponto 2), e assim, a ERB passa então a pertencer ao conjunto ativo deste móvel. No ponto 3, a relação E_c/I_0 cai abaixo de T_{DROP} e assim, inicia-se a contagem para a desconexão desta ERB. Quando a contagem ultrapassa o valor de T_{TDROP} , esta ERB retorna para o conjunto restante.

6.2.5 Controle de Potência

Os seguintes parâmetros devem ser definidos para o controle de potência no canal reverso.

<i>NOM_PWR</i>	Fator de correção nominal para a ERB [dB]
<i>INIT_PWR</i>	Fator de correção para a ERB devido à descorrelação parcial entre o canal direto e reverso [dB]
<i>PWR_STEP</i>	Incremento de potência [dB]
Δt	Intervalo temporal entre duas correções do controle de potência de malha fechada [s]
$(E_b/N_t)_{reverso}$	Relação sinal/ruído desejada no canal reverso [dB]

No caso do controle de potência no canal direto, o único parâmetro que deve ser definido é a relação sinal/ruído $((E_b/N_t)_{direto})$ desejada.

6.2.6 Sistema

Parâmetros relativos ao sistema são aqueles usados por todas, ou quase todas as rotinas. São parâmetros de cunho genérico e descritos a seguir.

<i>W</i>	Banda de operação do sistema [Hz]
<i>f</i>	Frequência da portadora [Hz]
<i>T</i>	Tempo total de simulação [s]

6.3 Esquemas Utilizados

Para que este simulador funcionasse de forma análoga à prática, foi necessário a implementação de algumas funções, tais como a que descreve o comportamento do sombreamento, da chegada de chamadas, da duração das chamadas e também do fator de atividade de voz das mesmas.

A princípio, pensou-se em considerar o sombreamento descorrelacionado nos instantes onde é feito o controle de potência. Mas esta não é uma boa idéia porque teríamos valores descorrelacionados em intervalos de tempo muito pequenos (alguns milissegundos), o que

não corresponde a um caso real. A evolução desta idéia foi considerar um sombreamento descorrelacionado após alguns metros. Mas como é necessário termos valores para o sombreamento em todos os instantes do controle de potência, a solução encontrada foi calcular a equação da reta que une os dois pontos para uma dada distância (distância esta onde podemos considerar que dois valores de sombreamento são descorrelacionados). Nos resultados apresentados neste trabalho, consideramos o sombreamento descorrelacionado após o usuário móvel ter percorrido 30 metros, mas não custa lembrar que este parâmetro pode ser dimensionado por quem estiver usando este software.

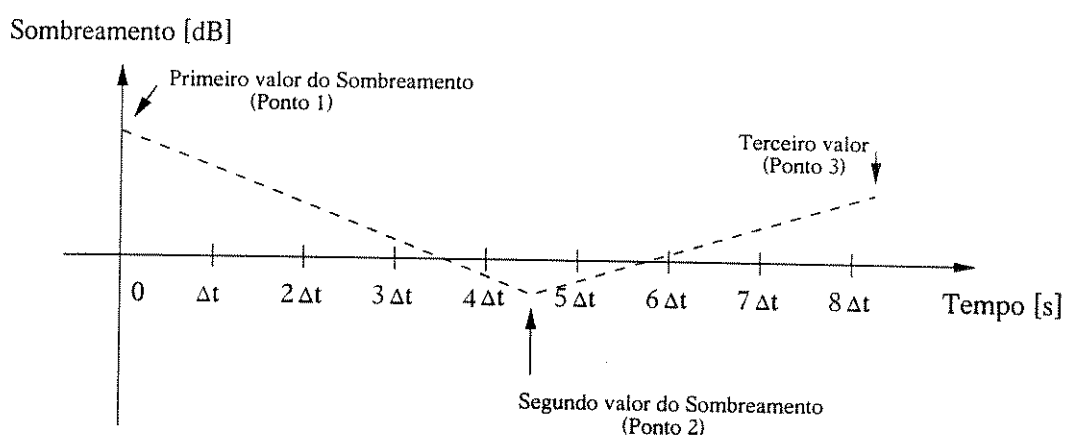


Figura 6.2: Algoritmo para a geração do sombreamento

A geração do sombreamento funciona da seguinte forma: É gerado um valor de sombreamento, segundo uma distribuição lognormal, para o instante inicial da transmissão (momento este em que o usuário móvel entra no sistema - aqui representado como o ponto 1). Sabendo a velocidade do móvel, temos condições de calcular o instante exato em que o sombreamento deverá mudar (ponto 2). Tendo estes dois pontos, calcula-se a equação de reta que os une, e assim, teremos condições de calcular qualquer valor do sombreamento entre os pontos 1 e 2. Quando atingimos o ponto 2, se faz necessário calcular o próximo valor para a troca do sombreamento (ponto 3), e assim por diante.

De estudos práticos temos que o processo de chegada de chamadas é regido segundo a distribuição de poisson. É sabido que o intervalo entre dois pontos desta distribuição segue a distribuição exponencial negativa. Como todas as ERBs possuem um usuário móvel no instante zero, basta gerarmos um intervalo temporal, segundo uma distribuição exponencial negativa, e adicionarmos este valor ao instante onde ocorreu a chamada ante-

rior. Deste modo teremos uma chegada de chamadas regida segundo uma distribuição de poisson e é desta forma que foi implementada a chegada de novas chamadas. A duração de uma chamada é dada segundo uma distribuição exponencial negativa com média igual a 100 segundos. Portanto, uma vez que o usuário obteve sucesso ao acessar o sistema, neste momento calcula-se o instante em que este usuário encerrará esta chamada.

Para o caso da atividade de voz, temos dois estados em que o usuário móvel pode se encontrar, falando (ativo) ou em silêncio (inativo). Todo usuário de voz que entra no sistema será considerado como ativo. Quando dissermos que um usuário tem fator de atividade de voz igual a 0,4, queremos dizer que em média, este usuário permanece 60% do tempo em silêncio e 40% do tempo falando. A duração temporal dos intervalos em que o usuário permanece falando e em silêncio são dados por uma distribuição exponencial negativa com média igual a λ_{ativo} e $\lambda_{inativo}$, respectivamente.

6.4 Controle de potência

6.4.1 Introdução

Um usuário móvel celular pode estar em qualquer posição no interior da área de cobertura de uma estação rádio base, desde algumas dezenas de metros da antena transmissora até distâncias da ordem de dezenas de quilômetros. Sem um controle de potência, teríamos todos os usuários transmitindo com a mesma potência, não importando o quão longe cada um deles estivesse. Assim, certamente teríamos usuários transmitindo com uma potência maior do que a realmente necessária, e portanto gerando mais interferência.

Sendo o sistema CDMA limitado por interferência, é fundamental que a transmissão de voz no enlace rádio, seja feita usando-se a menor potência possível para que se atinja a qualidade de serviço desejada, mantendo-se assim um baixo nível de interferência no sistema e ao mesmo tempo minimizando interferência sobre outros sistemas. A grosso modo, o que o controle de potência busca é fazer com que a potência transmitida, tanto pela ERB quanto pelo móvel, seja a menor possível para que o sinal recebido possa ser demodulado e decodificado com sucesso (mantendo sempre a qualidade de serviço desejada).

A IS-95 prevê dois tipos de controle de potência para o canal reverso. São eles: controle de potência de malha aberta e controle de potência de malha fechada. O controle no canal direto não é de domínio público, cabendo a cada um dos fabricantes de equipamentos celulares desenvolver o seu algoritmo de controle de potência.

6.4.2 Canal direto

O sistema CDMA atribui diferentes níveis de potência para os vários canais de tráfego, dependendo da qualidade do sinal recebido. O algoritmo para a determinação do nível de potência a ser enviado é propriedade dos fabricantes de equipamentos celulares e portanto, não temos acesso a eles.

Neste simulador é suposto que a estação móvel faz uma estimativa da perda de propagação no canal direto e envia esta informação para a ERB através do canal de acesso. Também é suposto que a estação móvel envia à ERB o valor da intensidade de interferência à qual ela está sendo submetida. O controle de potência no canal direto implementado neste trabalho está descrito a seguir.

Controle de potência

A relação sinal ruído em uma dada estação móvel é calculada segundo

$$\frac{E_b}{N_t} = \sum_{i=1}^m \frac{S_i^{tráfego} / R_b}{\left(N_0 W + \sum_{j=1}^K S_j^{total} - \nu_f S_i^{tráfego} \right) / W} \quad (6.1)$$

onde ν_f é o fator de atividade de voz no canal direto, S_j^{total} é a potência total recebida devido a j -ésima ERB e m é o número de estações rádio base envolvidas no processo de soft handoff do móvel em questão, “S” indica a potência recebida (após passar pelo canal) e “P” a potência transmitida (saída do transmissor). K representa o número total de estações rádio base do sistema enquanto que R_b é a taxa de transmissão do usuário móvel em bits por segundo.

De posse da perda de propagação entre o usuário móvel e a ERB e também da interferência recebida por este, uma vez que os outros parâmetros são conhecidos, basta

substituímos em (6.1) para acharmos o valor da potência de transmissão para o primeiro acesso ao canal direto. A potência a ser transmitida nos acessos subsequentes é ajustada da mesma forma.

6.4.3 Canal reverso

Controle de potência de malha aberta

Uma larga variação dinâmica é conseguida através da técnica de controle de malha aberta, onde o móvel estima a potência a ser transmitida no primeiro acesso ao canal de tráfego, baseado na potência total recebida na banda passante FI de 1,25 MHz. Esta potência inclui tudo que entra nos terminais do receptor do móvel, ou seja, sinal, ruído térmico e interferência e é dada a seguir,

$$S^{total} = N_0 W + \sum_{j=1}^K \left[\left(P_j^{piloto} + P_j^{sincronismo} + P_j^{paging} + \nu_f \sum_{i=1}^{N_j} P_i^{tráfego} \right) L_j G_j G_m \right] \quad (6.2)$$

onde K é o número de células, P_j^{piloto} , $P_j^{sincronismo}$ e P_j^{paging} são as potências transmitidas nos canais piloto, sincronismo e paging pela j -ésima estação rádio base, ν_f é o fator de atividade de voz no enlace direto, N_j é o número total de usuários móveis servidos pela j -ésima ERB, $P_i^{tráfego}$ é a potência transmitida no canal de tráfego pelo i -ésimo usuário da j -ésima estação rádio base a uma taxa máxima de 9600 bps, L_j é a perda de percurso entre o usuário móvel e a ERB, G_t e G_m são os ganhos da antena da ERB e o ganho da antena da estação móvel, respectivamente.

Quando a estação móvel tenta acessar pela primeira vez o canal de tráfego reverso, sua potência de transmissão em dB, é dada pelo controle de potência de malha aberta como observada em (6.3), e nos acessos subsequentes, pelo controle de potência de malha fechada, como será visto a seguir.

$$P = -S^{total} - 73 + NOM_PWR + INIT_PWR \quad (6.3)$$

onde NOM_PWR é o fator de correção nominal para a estação base e $INIT_PWR$ é o fator de correção para a estação rádio base devido a descorrelação parcial na perda de percurso

entre o caminho do canal direto e do canal reverso, e S^{total} deve ser dado em dBm.

Monitorando-se S^{total} ao invés do sinal demodulado, a estação móvel está apta a fazer um rápido controle de potência, sem nenhum conhecimento do sincronismo do sistema, identificação da estação rádio base, etc.

Os limites e valores típicos dos parâmetros do controle de potência são mostrados na Tabela a seguir.

-8 <	NOM_PWR	< 7 dB	Valor típico: $NOM_PWR = 0$
-16 <	$INIT_PWR$	< 15 dB	Valor típico: $INIT_PWR = 0$
0 <	PWR_STEP	< 7 dB	Valor típico: $PWR_STEP = 1$

Tabela 6.1: Limites e valores típicos dos parâmetros usados no controle de potência

Controle de potência de malha fechada

O controle de potência de malha fechada é um tipo de ‘calibração fina’ na estimativa de potência em malha aberta. A estação rádio base mede a relação sinal ruído recebida do i -ésimo usuário conforme descrito a seguir,

$$\left(\frac{E_b}{N_t}\right)_i = \frac{S_i/R_b}{\left(N_0W + \nu_r \sum_{j=1}^K \sum_{z=1}^{N_j} S_z - S_i\right)/W} \quad (6.4)$$

onde R_b é a taxa de bits no canal de tráfego, N_j é o número total de usuários móveis pertencentes a uma dada ERB, W é a banda ocupada pelos sinais espalhados, N_0W é a potência do ruído branco e S_i é a potência recebida pela ERB devido ao i -ésimo usuário móvel como dada a seguir

$$S_i = P_i L_i G_t G_m$$

onde P_i é a potência transmitida pelo i -ésimo móvel.

De posse de E_b/N_t do i -ésimo usuário móvel, a ERB compara com o valor desejado de E_b/N_t no canal reverso para uma FER ¹ de 1%. Caso este valor esteja acima do valor

¹Frame Error Rate

desejado, a ERB envia uma mensagem para que o usuário móvel abaixe sua potência de transmissão de PWR_STEP . Caso contrário, a ERB envia uma mensagem para que o usuário móvel suba sua potência transmitida do mesmo incremento. O controle de potência de malha fechada é realizado a uma taxa de $1/\Delta t$ correções por segundo.

6.5 Acesso ao sistema

Todo usuário móvel que desejar usar um canal de tráfego, seja ele para a transmissão de dados, voz, imagens, etc., passa primeiramente, e somente uma vez, por uma rotina chamada *Acesso ao Sistema*, a qual se encarrega de analisar se aquela chamada pode, ou não, ser completada. A rotina de acesso ao sistema faz com que a estação móvel calcule a relação de energia de chip sobre a interferência total, proveniente de todas as ERBs do sistema, conforme

$$\left(\frac{E_c}{I_o}\right)_i = \frac{S_i^{piloto}/R_c}{\left(N_o W + \sum_{j=1}^K S_j^{total}\right)/W} \quad (6.5)$$

onde S_i^{piloto} é a potência recebida no canal piloto pelo usuário móvel devido a i -ésima ERB e R_c é a taxa de chips no canal piloto.

Se a máxima relação E_c/I_o recebida for menor do que T_{ADD} , previamente definida, esta chamada será bloqueada. Presume-se que a estação móvel encontra-se em um região de ‘sombra’, onde a potência do canal piloto é insuficiente para demodular o canal de tráfego. Caso contrário, a estação móvel estabelece um enlace rádio no canal reverso com a ERB. Neste caso, sua potência de transmissão será dada pelo controle de potência de malha aberta no canal reverso.

Como pode ser observado em (6.5), existem 2 fatores que fazem com que um usuário não consiga acessar o sistema. O primeiro deles é a perda de propagação entre a ERB e o móvel, que se for muito alta, faz com que a potência recebida no canal piloto seja muito pequena, e assim, inviabilizando o contato. O outro é que mesmo se um móvel receber uma potência apreciável no canal piloto, mas o nível da interferência total do sistema estiver alto, iremos ter uma baixa relação E_c/I_o e portanto, esta chamada será

bloqueada.

6.6 Soft Handoff

O estado de soft handoff de cada usuário é baseado na intensidade do canal piloto e caracterizado pela classificação das ERBs em 3 conjuntos que são: ativo, candidato e restante.

O processo de soft handoff pode ser resumido em apenas 4 passos.

1. Se a relação E_c/I_0 recebida do canal piloto de alguma ERB no conjunto ativo for menor do que T_{DROP} , e o tempo igual a T_{DROP} tiver expirado, então a ERB correspondente a este canal piloto é movida para o conjunto restante.
2. Se a relação E_c/I_0 recebida de um canal piloto de alguma ERB no conjunto candidato for menor do que T_{DROP} e o tempo igual a T_{DROP} tiver expirado, então a ERB correspondente a este canal piloto é movida para o conjunto restante.
3. Se a relação E_c/I_0 recebida de um canal piloto de alguma ERB no conjunto restante for maior do que T_{ADD} , então a ERB correspondente a este canal piloto é movida para o conjunto candidato.
4. Se a relação E_c/I_0 recebida de um canal piloto de alguma ERB no conjunto candidato for maior do que a relação E_c/I_0 de algum canal piloto no conjunto ativo no montante de T_{COMP} , pelo menos, então a ERB correspondente a este canal piloto é movida para o conjunto ativo.

Se, durante o processo de soft handoff, o conjunto ativo das estações móveis ficar vazio (sem nenhuma ERB), então o usuário móvel será desconectado do sistema (queda de chamada).

6.7 Descrição do Fluxograma do Simulador de Rede Celular

Na implementação deste simulador, foi adotada uma abordagem temporal, a qual tem sido usada com sucesso para simulações de sistemas em tempo real [23] como é o caso de um sistema CDMA. Neste tipo de abordagem, o tempo total de simulação é dividido em unidades uniformes de tempo, chamados de incrementos de tempo. A simulação prossegue acrescentando-se ao contador temporal a quantidade de um incremento de tempo Δt . Este incremento de tempo pode ser dimensionado de acordo com a disponibilidade computacional de cada usuário, pois um incremento de tempo muito pequeno nos leva a uma maior quantidade de operações por segundo e conseqüentemente um tempo maior de processamento. A norma IS-95 aconselha um Δt de 1,25 ms, que é justamente o intervalo temporal entre a emissão de dois bits consecutivos de controle de potência.

Com respeito à posição das ERBs, este simulador nos permite montar qualquer tipo de arranjo, pois a localização de todas as estações rádio base ficam a critério de quem estiver usando o *software*. Localizadas e configuradas as ERBs, o *software* se encarrega de iniciar um usuário móvel para cada ERB, para que no início dos cálculos, tenhamos usuários ativos no sistema.

Iniciando a simulação com um usuário em cada ERB, evitamos um gasto computacional desnecessário que vai do início do loop temporal até a inclusão do primeiro usuário no sistema. O fato de gerarmos usuários móveis não implica que todos entrarão em contato com alguma ERB. Isto acontece devido ao fato que alguns estarão muito longe e sua perda de propagação pode inviabilizar a transmissão, outros porque o nível de interferência pode estar tão alto que sua entrada no sistema acarretaria uma deterioração na qualidade do sinal dos demais, ou ainda, porque não existe potência disponível na ERB para a transmissão de mais um usuário. Isto nos obriga então, a fazermos uma verificação a cada novo usuário, se ele possui condições de se conectar a alguma estação rádio base. Este procedimento foi descrito como acesso ao sistema na seção 6.5.

Depois de criadas todas as ERBs, gerado seu primeiro móvel e feita a verificação se este possui condições de acessar alguma ERB do sistema, entramos finalmente no loop

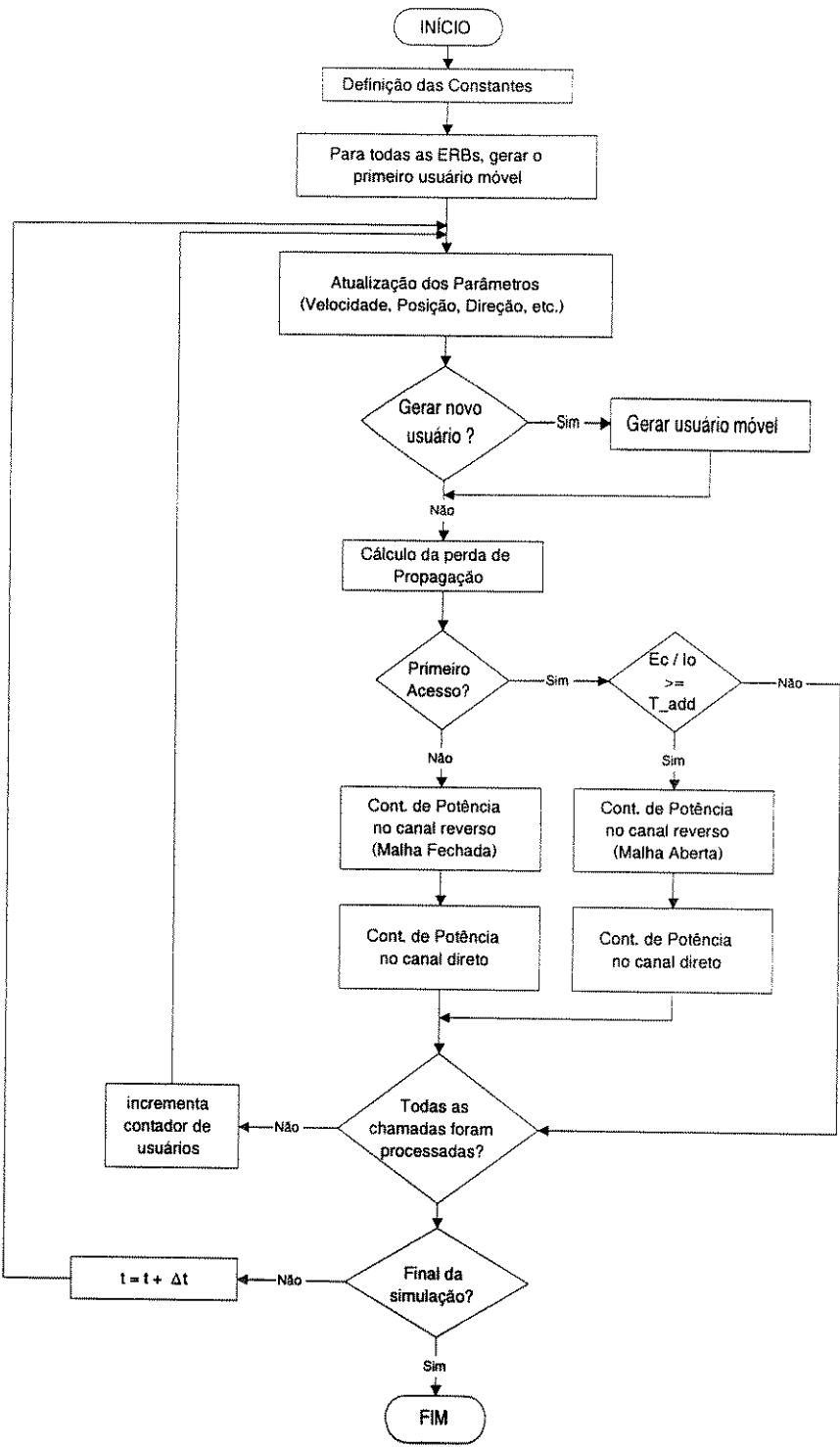


Figura 6.3: Diagrama de blocos do simulador

temporal com duração igual ao tempo estipulado para a simulação (T).

Neste instante, temos um conjunto de usuários pertencentes a cada ERB do sistema. O loop consiste em percorrer todas as ERB e para cada uma delas, é feita uma verificação

se está na hora de inserir mais um usuário no sistema, caso esteja, é criado mais um usuário e feito o acesso ao sistema, caso contrário, é feita uma verificação se existe algum usuário que está na hora de sair do sistema, e para os que ficarem, é atualizada a posição, verificada a atividade de voz, somreamento e feito o controle de potência no canal reverso e direto.

As correções na potência transmitida, tanto pelo usuário móvel quanto pela ERB à qual ele está conectado, são efetuadas para cada usuário e sua respectiva ERB, um após o outro. Isto quer dizer que, para um determinado instante de tempo, são feitos os cálculos necessários para todos os usuários de todas as estações rádio base que estão ativas, um a um, e após o término, é incrementado o contador temporal de Δt para que no instante seguinte o processo continue. Assim sendo, quando forem calculados os parâmetros do i -ésimo usuário ativo no sistema em qualquer instante de tempo, este já sofrerá os efeitos do reajuste na potência transmitida no canal reverso, potência recebida no canal direto, etc., impostos pelos $i - 1$ usuários anteriores em seus cálculos, e assim sucessivamente.

Capítulo 7

Resultados e Discussões

7.1 Introdução

Neste capítulo analisaremos o desempenho de um sistema de comunicações móveis usando CDMA como tecnologia de acesso. São vários os parâmetros que influenciam o desempenho de uma rede de telefonia celular, mas os parâmetros listados a seguir foram analisados mais detalhadamente.

- Perda de Percurso
- Sombreamento
- Atividade de Voz
- Taxa de Chegada de Usuários Móveis
- Velocidade dos Usuários Móveis
- Parâmetros de Handoff

Os resultados apresentados neste capítulo, foram obtidos através da manipulação destes parâmetros, variando-os exaustivamente a fim de se conhecer melhor o comportamento de uma rede de comunicação móvel e de como esta varia de acordo com cada um deles. Os valores apresentados na Tab. 7.1 serão considerados como padrão ao longo deste trabalho, a menos, é claro, que fique explícito no texto os parâmetros que foram usados.

Parâmetro	Valor Padrão	Unidade
$(E_b/N_t)_{reverso}$	7	dB
$(E_b/N_t)_{direto}$	7	dB
NOM_PWR	0	dB
$INIT_PWR$	0	dB
PWR_STEP	1	dB
μ_i	100	s
G_{ERB}	6	dB
G_m	0	dB
P_{max}	0,2	W
p_{piloto}	2	W
$p_{sincronismo}$	0,2	W
p_{paging}	0,8	W
N_0	-140	dBm/Hz
T_{ADD}	-14	dB
T_{DROP}	-16	dB
T_{COMP}	2,5	dB
Δt	2	ms
W	1,2288	MHz
R_b	9600	bits/s
f	880	MHz

Tabela 7.1: Valor padrão de alguns parâmetros

A plataforma inicial de simulação foi o Matlab e, posteriormente, por necessidade de uma maior velocidade na execução do programa, migrou-se para a linguagem C++ [24, 25, 26, 27, 28, 29]. As simulações foram inicialmente realizadas em Pentiums 133 MHz do laboratório de comunicação da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP, mas com o aumento da complexidade e do número de ERBs no sistema, fomos obrigados a buscar computadores mais rápidos. Modificações foram feitas no código fonte para que ele rodasse em ambas as plataformas, Unix e DOS. Por último, tivemos

acesso a um Pentiums-2 300 MHz e também a um Pentium-2 266 MHz, ambos com 64 Mbytes de memória RAM para realizarmos nossas simulações.

7.2 Resultados e Discussões

Todos os gráficos apresentados neste trabalho foram obtidos de simulações com uma rede celular possuindo um arranjo quadrado de Estações Rádio Base com 25 ERBs ao total como pode ser visto na Fig. 7.1. A menos que fique explícito no texto, este arranjo será usado como padrão para todos os gráficos apresentados. O modelo de propagação usado foi o de decréscimo logarítmico com a distância por ser menos complexo do que o COST 231-Walfish-Ikegami, levando-nos assim a dispendar menos tempo em simulações.

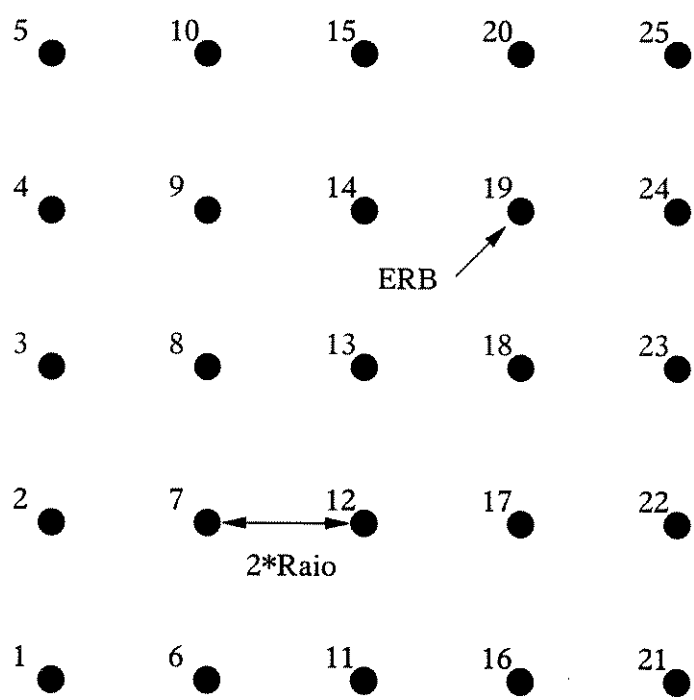


Figura 7.1: Distribuição espacial das ERBs

Nas simulações apresentadas no decorrer deste capítulo, foram usadas diferentes taxas de chegada de usuários. São elas: 0,05, 0,1, 0,2 e 0,5 usuários/s/célula, que para uma duração média de chamada da ordem de 100 segundos, resulta em um número médio de usuários por célula da ordem de 5, 10, 20 e 50, respectivamente. Estas taxas de chegada podem ser observadas na Fig. 7.2.

Pode-se observar neste gráfico que para baixas taxas de chegada (5 e 10 usuários em

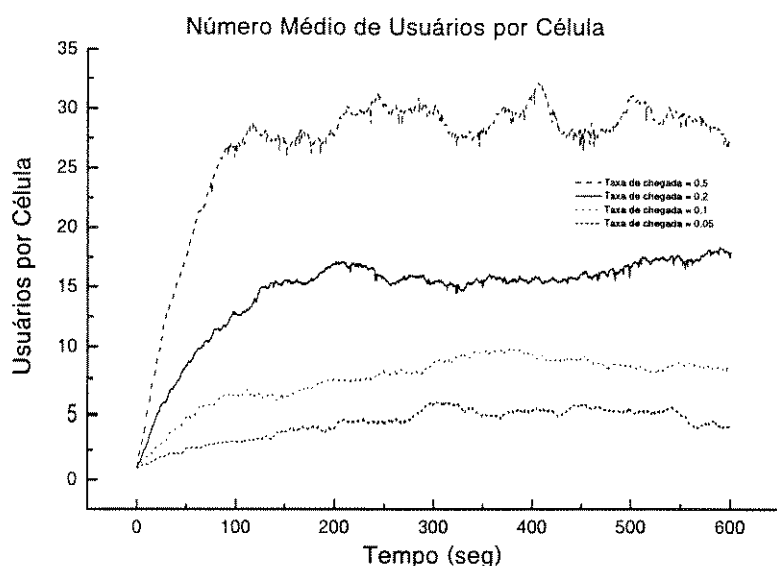
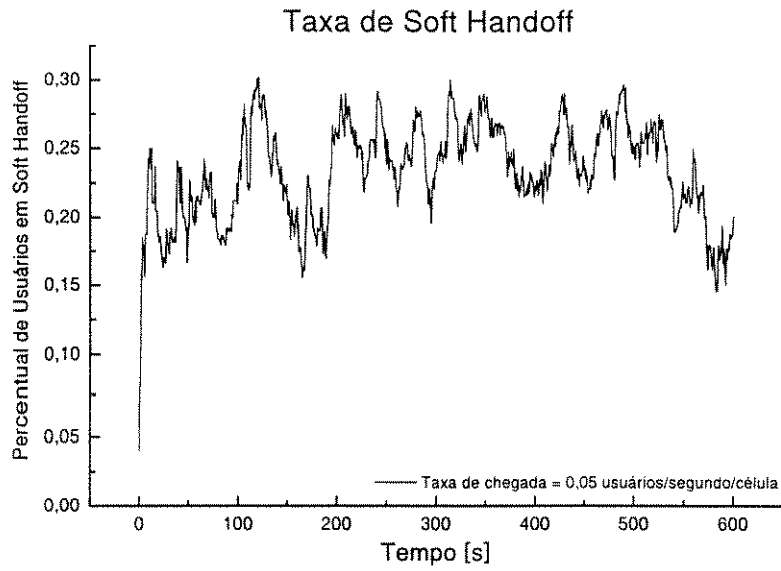
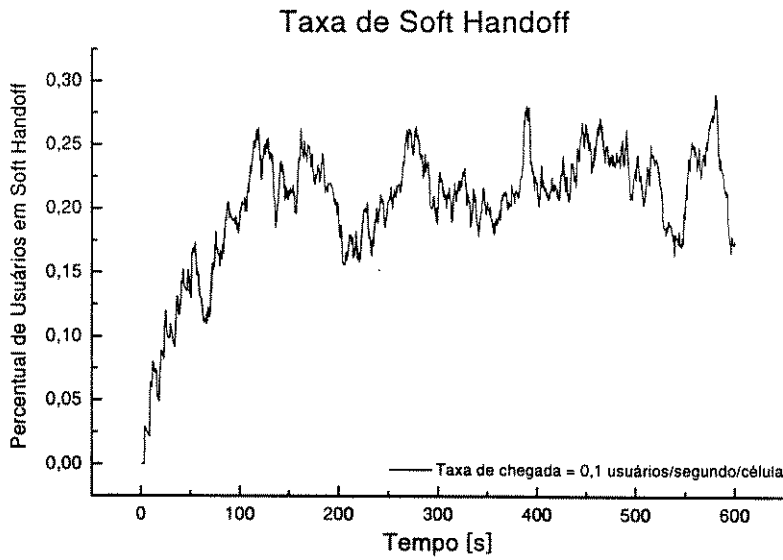


Figura 7.2: Ocupação do sistema para diferentes taxas de chegada

média por célula) o sistema consegue absorver a grande maioria dos novos usuários, ou seja, é atingido o número médio de usuários esperado por célula. O mesmo não acontece para taxas de chegada mais altas (20 e 50 usuários em média por célula), uma vez que as curvas relativas a estas taxas, não atingem um valor próximo ao número médio de usuários esperado que é de 20 para a taxa de 0,2 e de 50 para a taxa de 0,5. Quanto maior o número de usuários móveis na rede (altas taxas de chegada), maior será a probabilidade de queda de chamada e também de ocorrerem chamadas bloqueadas, fenômenos estes que reduzem a quantidade de usuários no sistema.

As figuras 7.3 a 7.6 mostram a taxa de soft handoff em função das taxas de chegada de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,5 respectivamente. Podemos notar que para a taxa de chegada igual a 0,05 (Fig. 7.3), obtivemos uma taxa de soft handoff em torno de 25%, ou seja, 25% dos usuários do sistema estão em comunicação com mais de uma ERB simultaneamente (mais de uma ERB pertencem ao conjunto ativo). Notamos que quanto maior a taxa de chegada, menor será a taxa de soft handoff do sistema. Isto ocorre devido ao fato que quanto maior o número de usuários em uma ERB, maior será a interferência gerada neste sistema, e conseqüentemente, menor será a relação sinal/ruído do canal piloto (E_c/I_0). Este fato fica muito mais claro se pensarmos em termos da área de cobertura no canal direto.

Figura 7.3: Taxa de Soft Handoff ($\lambda_i = 0,05$)Figura 7.4: Taxa de Soft Handoff ($\lambda_i = 0,1$)

Primeiramente, definimos área de cobertura no canal direto como sendo a distância média onde $E_c/I_0 \geq T_ADD$. Como a potência emitida pelo canal piloto é fixa, aumentando-se o número de usuários, aumenta-se também a interferência total (I_0). Assim a relação E_c/I_0 decresce e com ela a área de cobertura no canal direto. Deste modo, a área de

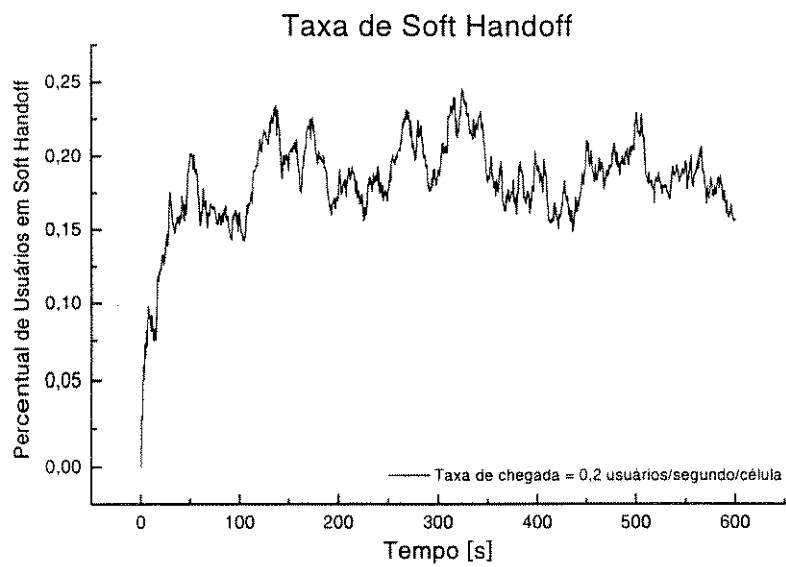


Figura 7.5: Taxa de Soft Handoff ($\lambda_i = 0,2$)

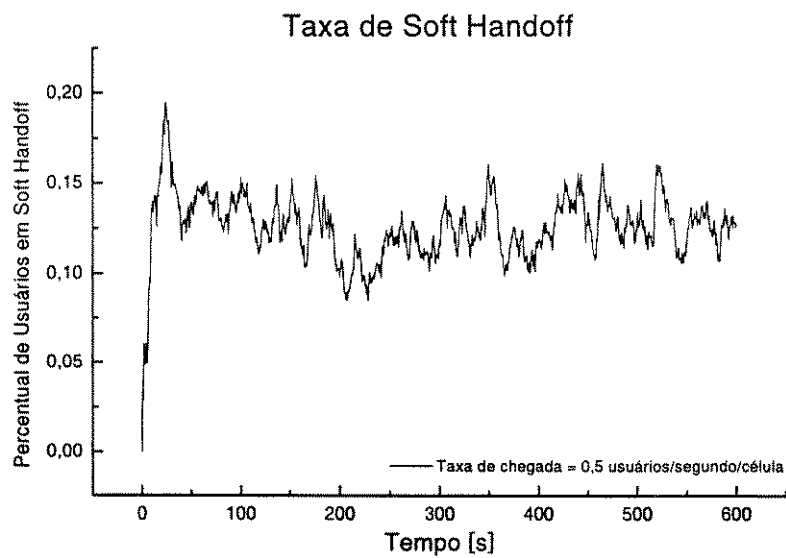


Figura 7.6: Taxa de Soft Handoff ($\lambda_i = 0,5$)

sobreposição de duas ou mais ERBs diminui fazendo com que a taxa de soft handoff caia, às custas de um aumento na taxa de queda de chamada.

As figuras 7.7 a 7.10 representam os gráficos das relações Sinal/Ruído no canal reverso para as taxas de chegada de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,5, respectivamente. Para um número médio

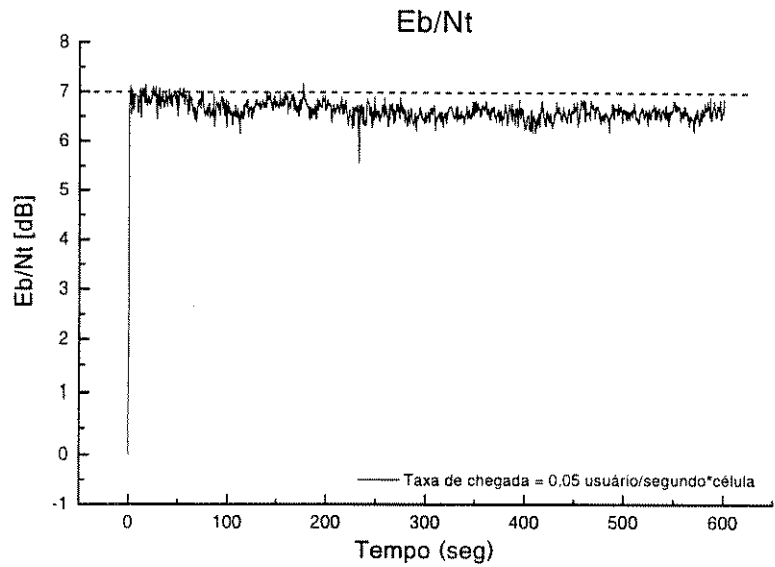


Figura 7.7: Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,05$)

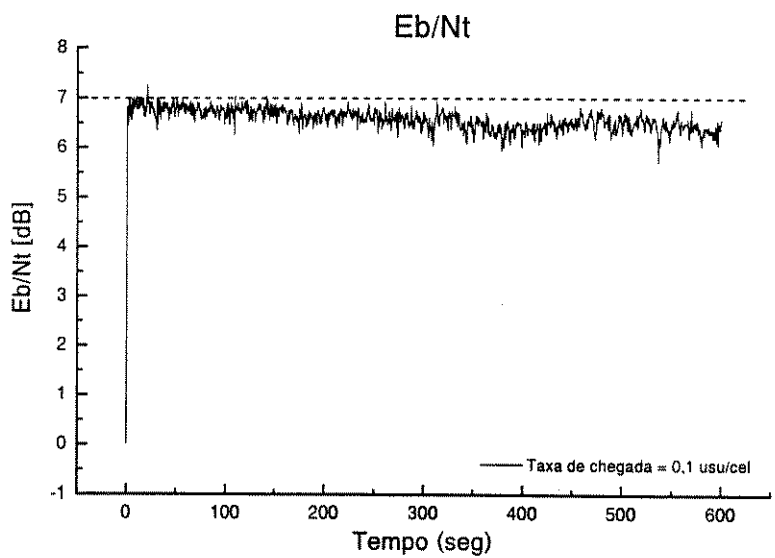


Figura 7.8: Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,1$)

de usuários na ERB em torno de 5, $(E_b/N_t)_{reverso}$ oscila bem próximo ao valor estipulado para o sistema que é de 7 dB. Devido a limitação de potência ($P_{max} = 200mW$) no transmissor do usuário móvel, há usuários que atingem esta potência máxima e ainda assim, necessitam subir sua potência para que seja atingida a relação sinal/ruído desejada

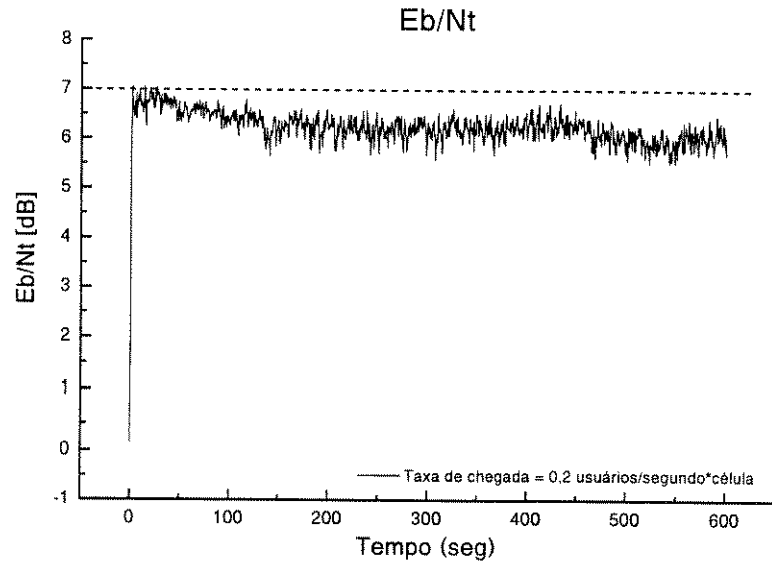


Figura 7.9: Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,2$)

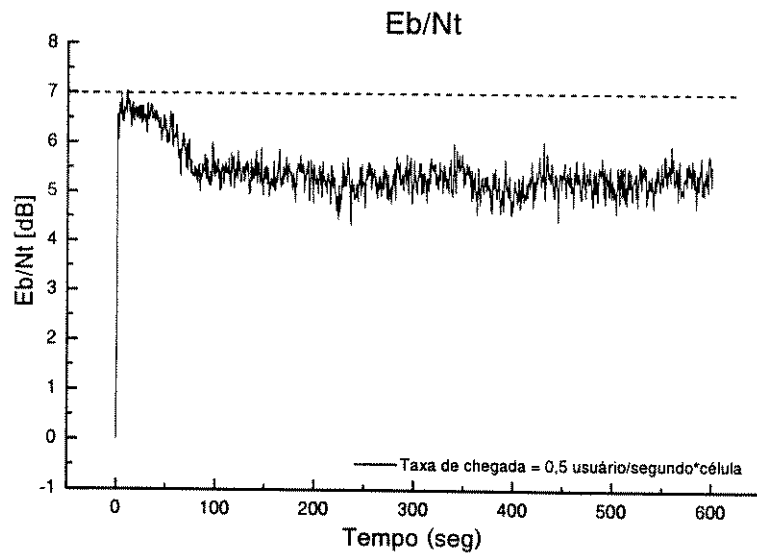


Figura 7.10: Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,5$)

na ERB à qual ele está conectado. Como isto não é possível, estes móveis contribuem desfavoravelmente para a relação E_b/N_t média do sistema, resultando assim em uma curva abaixo do valor desejado.

Quanto maior o número médio de usuários no sistema, pior será a relação sinal/ruído

média, porque maior será a quantidade de usuários móveis que se encontram localizados na borda da célula e em situação de sombreamento desfavorável.

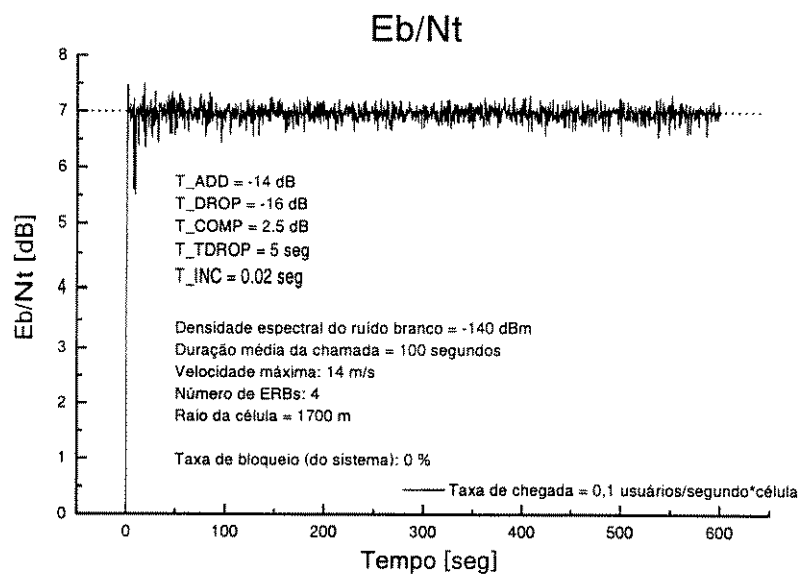


Figura 7.11: Relação Sinal/Ruído no Canal Reverso ($\lambda_i = 0,1$) - Sem limitação de potência no handset

O gráfico 7.11 nos dá uma idéia de como seria a relação sinal/ruído média do sistema se não houvesse limitação de potência nos transmissores dos usuários móveis. É fácil ver que a relação E_b/N_t média do sistema oscila em torno do valor desejado de E_b/N_t .

As figuras 7.12 a 7.15 representam os gráficos das taxas de chamadas bloqueadas mais as derrubadas para as taxas de chegada de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,5, respectivamente. Notamos que a taxa de chamadas bloqueadas mais a taxa de chamadas derrubadas são pequenas (da ordem de 1% a 3%) para um pequeno número médio de usuários na célula. Quanto maior o congestionamento de usuários dentro de uma ERB ou no sistema, maior será a taxa de chamadas bloqueadas e/ou derrubadas.

A figura 7.16 representa o gráfico do número médio de usuários por célula devido a diferentes valores de sombreamento ($\sigma_S=6, 7, 8$ e 9 dB) para as taxas de chegada de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,5 usuários/s/célula. O número médio de usuários decresce com o aumento do desvio padrão do sombreamento. Com o aumento de σ_S , irão ocorrer sombreamentos mais fortes, o que irá contribuir para o aumento da taxa de queda de chamada e da taxa

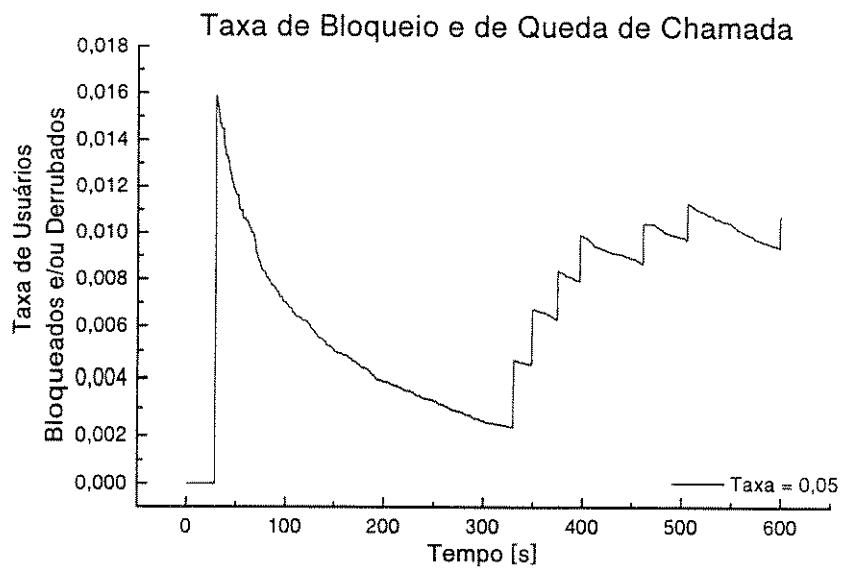


Figura 7.12: Taxa de bloqueio e de queda de chamada ($\lambda_i = 0,05$)

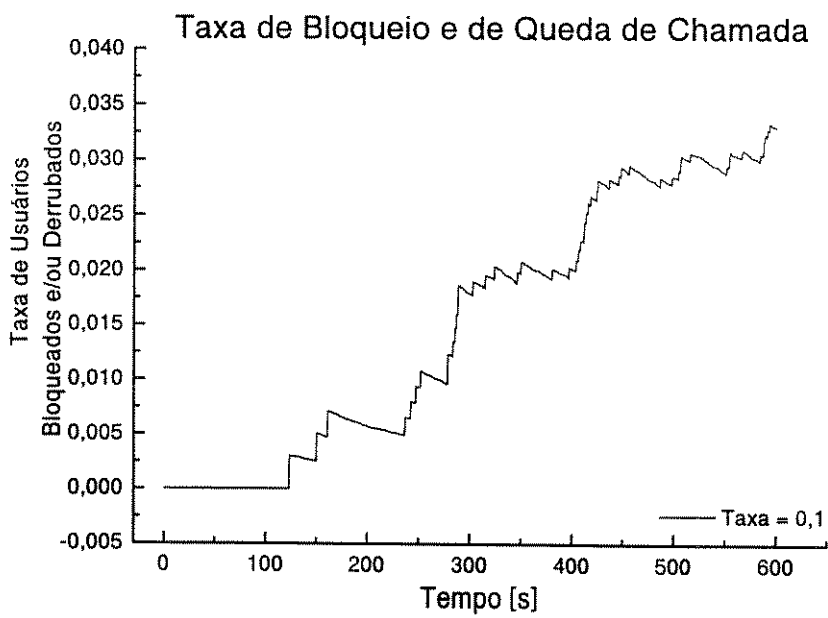


Figura 7.13: Taxa de bloqueio e de queda de chamada ($\lambda_i = 0,1$)

de bloqueio do sistema, resultando em um número menor de usuários ativos no sistema. Os parâmetros usados para traçar este gráfico são os seguintes: Raio=1700 m, V_{max} =100 km/h, F.A.V=0,42 e um total de 25 ERBs no sistema.

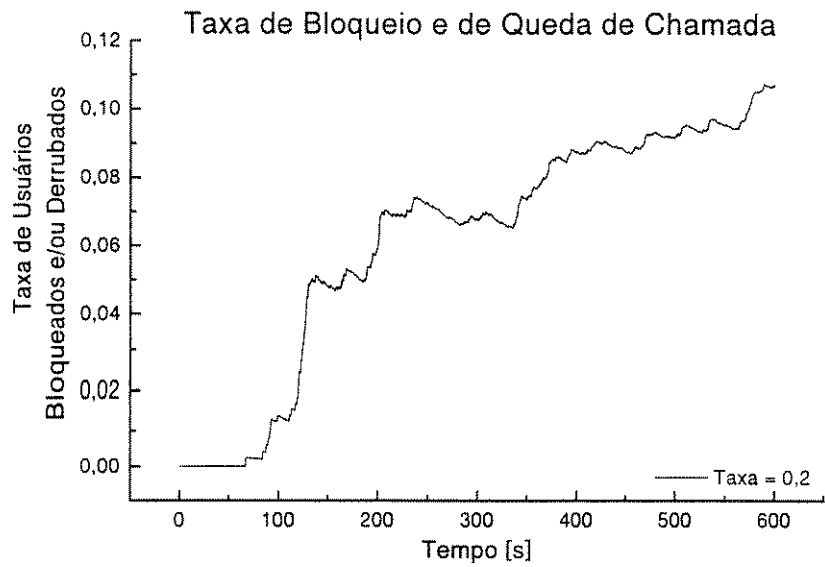


Figura 7.14: Taxa de bloqueio e de queda de chamada ($\lambda_i = 0,2$)

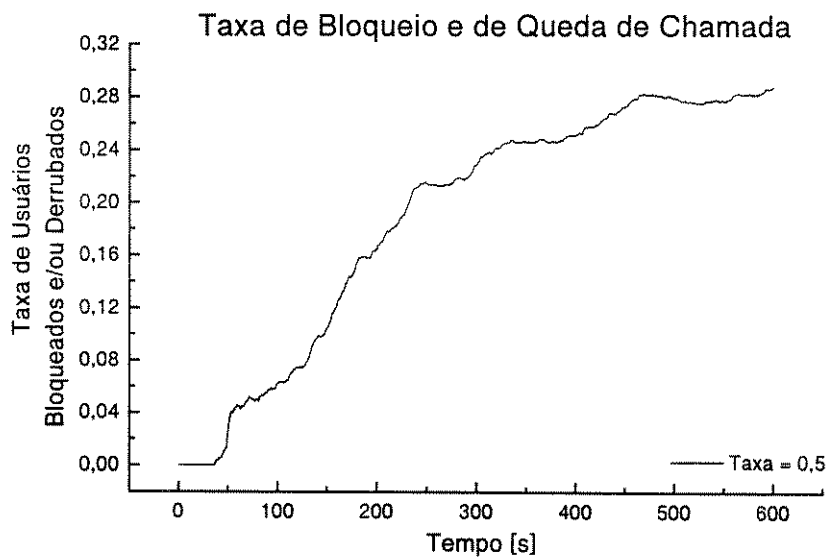


Figura 7.15: Taxa de bloqueio e de queda de chamada ($\lambda_i = 0,5$)

O gráfico 7.17 representa o comportamento do número médio de usuários por célula em relação a diferentes fatores de atividade de voz (F.A.V.=0,3, 0,4, 0,5 e 0,6) para as taxas de chegada de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,5 usuários/s/célula. Quando for dito que o F.A.V. é igual a 0,4, queremos dizer que o F.A.V. no canal direto é igual ao F.A.V. no canal

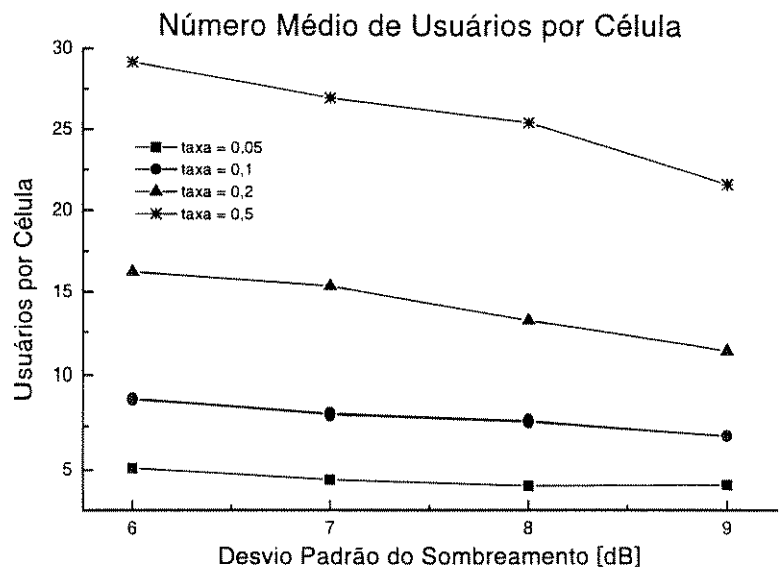


Figura 7.16: Número médio de usuários por célula considerando-se o desvio padrão do sombreamento

reverso que é igual a 0,4. Observa-se que com o aumento do fator de atividade de voz decresce o número médio de usuários móveis ativos. Isto ocorre porque há um aumento da interferência no sistema com o aumento do fator de atividade de voz, assim sendo, um número menor de usuários poderá manter a ligação.

O gráfico 7.18 representa o comportamento do número médio de usuários por célula em relação a diferentes valores do expoente de perda de propagação ($\beta=3, 4, 5$ e 6) para as taxas de chegada de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,5. Podemos comprovar que o número médio de usuários não se altera com a variação do expoente de perda de propagação. Isto se deve ao fato que o controle de potência ajusta a potência emitida pelo usuário móvel para compensar a perda adicional com o aumento do expoente de perda de propagação.

O gráfico 7.19 representa a porcentagem de usuários que estão abaixo do valor estipulado (*Outage Probability*) para as taxas de chegada de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,5 usuários/s/célula. Podemos comprovar que quanto maior a taxa de chegada de chamadas, maior será a porcentagem de usuários que estarão abaixo do valor estipulado.

A determinação da área de cobertura de uma estação rádio base não é uma tarefa fácil. As Figs. 7.20 e 7.21 apresentam a taxa de queda de chamada e taxa de bloqueio em função

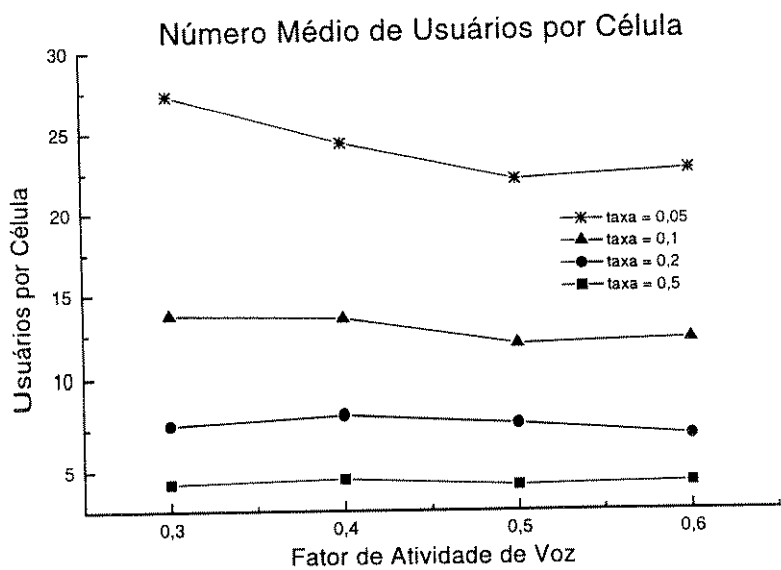


Figura 7.17: Número médio de usuários por célula considerando-se o fator de atividade de voz

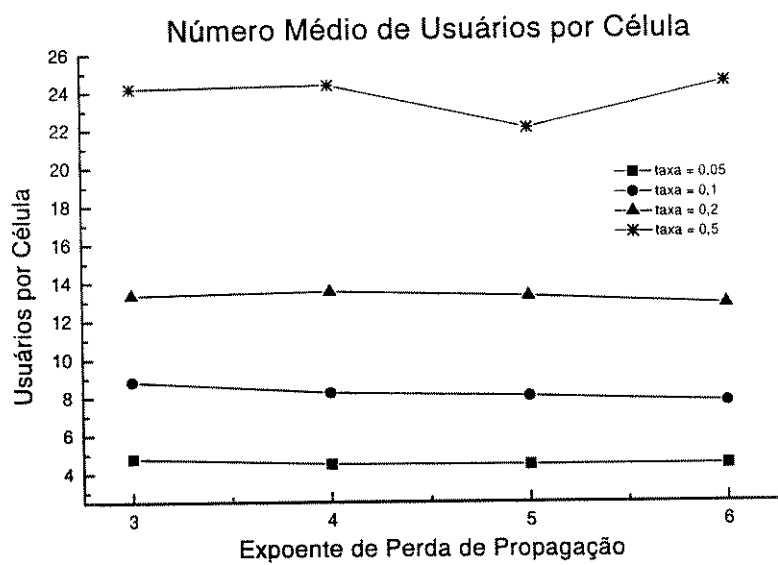


Figura 7.18: Número médio de usuários por célula considerando-se o expoente de perda de propagação

do raio da ERB. A partir destes gráficos podemos ter uma boa idéia do raio de cobertura. Pode-se observar em 7.20 que a taxa de queda de chamadas aumenta exponencialmente em função do raio. É também comprovado por uma rápida inspeção visual que para taxas

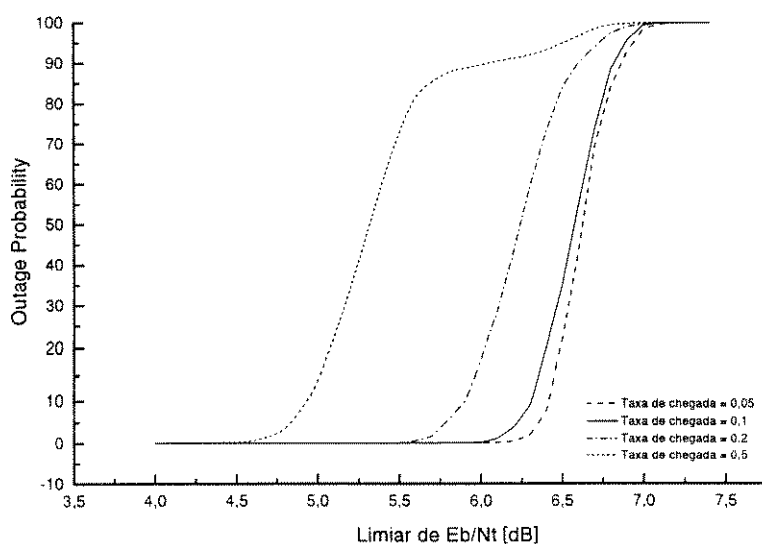


Figura 7.19: Outage Probability

mais altas (neste caso 0,1 usuário/segundo/célula), o ponto em que a taxa de queda de chamada aumenta bruscamente corresponde a um menor raio, o que nos leva a concluir que para elevadas taxas de chegada, menor será a área de cobertura. Para a mesma situação foi traçado o gráfico da figura 7.21 que nos mostra a mesma situação em função da taxa de bloqueio.

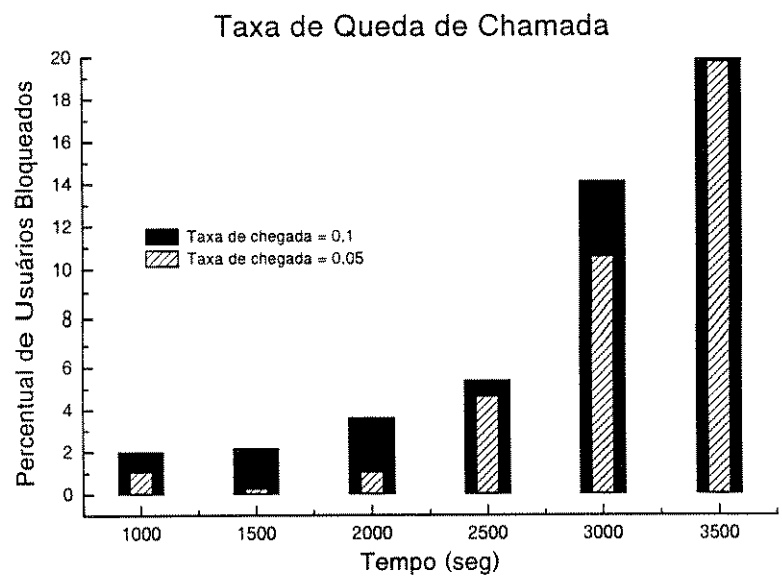


Figura 7.20: Estimativa do raio de cobertura de acordo com a taxa de queda de chamada

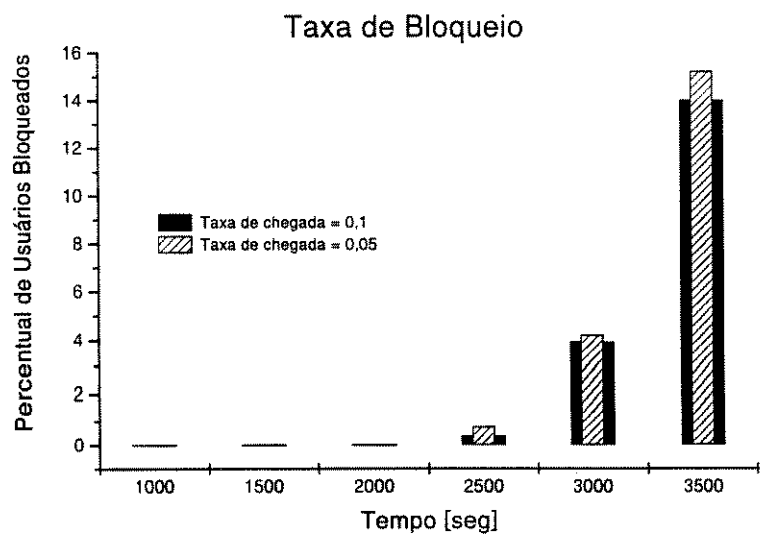


Figura 7.21: Estimativa do raio de cobertura de acordo com a taxa de bloqueio

Capítulo 8

Conclusões

8.1 Introdução

O objetivo de se avaliar e estudar o comportamento de um sistema rádio-móvel que usa CDMA como tecnologia de acesso foi atingido. O comportamento do sistema ficou bem caracterizado em termos da taxa de queda de chamadas, taxa de bloqueio e taxa de soft handoff em função do fator de atividade de voz, desvio padrão do sombreadamento, expoente de perda de propagação, bem como o comportamento do sistema para diferentes taxas de chegada. Este projeto pode ser considerado como o início de um projeto maior, onde este poderá englobar não só um sistema CDMA completo como também um sistema AMPS subexistindo na mesma região. Com esta ferramenta em mãos, podemos avançar em direção ao estudo de sistemas mais complexos e com um leque maior de parâmetros a serem analisados.

O simulador mostrou-se ser uma excelente ferramenta na análise e dimensionamento de uma rede celular CDMA bem como para o levantamento da área de cobertura de uma estação rádio base.

8.2 Considerações Finais

A primeira conclusão que se pode retirar das discussões é que há um decréscimo significativo do número médio de usuários móveis no sistema com o aumento do desvio padrão

do sombreamento e do fator de atividade de voz. Estes efeitos são melhor visualizados em taxas de chegada mais elevadas, como pôde ser verificado nos gráficos apresentados no capítulo anterior.

Em altas taxas de chegada, há uma nítida saturação do sistema em termos do número médio de usuários por célula e qualquer aumento do número de usuários no sistema, faz com que aumente também a taxa de queda de chamada e taxa de bloqueio, o que não é desejável. Também podemos concluir que aumentando-se a taxa de chegada de chamadas ocorre uma redução na taxa de soft handoff devido a “retração” da área de cobertura no canal direto.

8.3 Propostas para Trabalhos Futuros

Dada a grandiosidade de um sistema rádio-móvel há um 100 número de sugestões que poderiam ser feitas para estudos e simulações futuras e isso depende do enfoque que se queira dar ao estudo.

A sugestão que logo vem à mente, quando se lê os resultados do trabalho, é a de implementar neste simulador a setorização das ERBs, seja esta setorização de 120 ou 60 graus. Este é um importante mecanismo para a redução da interferência recebida por uma determinada ERB e conseqüentemente, para um ganho em termos do número médio de usuários por célula e também implementar um padrão de repetição quando um usuário gera uma chamada e não consegue acessar o sistema, simulando o caso onde o usuário tenta por várias vezes acessar o sistema antes de desistir.

Outra sugestão seria a obtenção de resultados análogos aos obtidos ao longo deste trabalho, mas desta vez usando-se o modelo de perda de propagação COST 231-Walfish-Ikegami, e não mais o modelo de perda de propagação com decréscimo logarítimo com a distância. Apesar de implementados neste simulador ambos os modelos, optou-se por usar somente o modelo com decréscimo logarítimo, por ser muito menos complexo que o COST 231 e assim, gastar menos tempo de processamento em um micro computador.

Uma importante característica em um software é a sua interface com o usuário. Por se tratar de uma pesquisa científica, não me preocupei com este detalhe, pois eu fui o único

usuário do programa. Como se trata de um programa com alta aplicabilidade prática, é fundamental que ele tenha uma *interface* amigável e fácil de usar, uma vez que ninguém irá ficar procurando em intermináveis listas de código fonte o parâmetro que deve ser modificado.

Outros parâmetros poderiam ser objeto de variação, tais como *PWR_STEP* (passo que deve ser usado no controle de potência, talvez até passos diferentes para baixas e altas relações sinal/ruído), o parâmetro *T_COMP* e a duração média das chamadas. Poderia também ser implementado um algoritmo que variasse a velocidade e direção dos usuários móveis de tempos em tempos.

O grande limite a que se pesquise o comportamento deste sistema com um número maior de estações rádio base e altas taxas de chegada de uma maneira mais profunda é o esforço computacional requerido pelo software para simular este tipo de sistema. Para o caso de 25 ERBs com uma taxa de chegada de 0,5 (50 usuários em média por célula), o tempo requerido para a simulação de 600 segundo era de aproximadamente 8 horas (Pentium 300 com 64 Mb de RAM).

Bibliografia

- [1] William C. Y. Lee. *Mobile Cellular Telecommunications: Analog and Digital Systems*. McGraw-Hill, 2nd edition edition, 1995.
- [2] Michel Daoud Yacoub. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. CRC Press, 1st edition edition, 1993.
- [3] Theodore S. Rappaport. *Wireless communications, Principles & Practice*. Prentice Hall PTR, 1st edition edition, 1996.
- [4] Kamilo Feher. *Wireless Digital Communications - Modulation & Spread Spectrum Applications*. Prentice-Hall. Inc., 1995.
- [5] Rashad Barghouti Laurence B. Milstein, Theodore S. Rappaport. Performance evaluation for cellular cdma. *IEEE Journal on in selected areas in communications*, 10:680–689, May 1992. NO. 4.
- [6] Michel Daoud Yacoub. Propagation consideration for mobile radio systems. In *The Eletronic Handbook*. CRC Press, IEEE Press, 1996.
- [7] J. Walfish and H. L. Bertoni. Theorecal model of uhf propagation in urban environments. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, AP-36(12):1788–1796, 1988.
- [8] T. Takeuchi F. Ikegami, S. Yoshida and M. Umeriha. Propagation factor controlling mean field strength on urban streets. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, AP-32(8):822–829, 1984.
- [9] Roddy Dennis. *Eletronic Communications*. Prentice-Hall. Inc., 4th edition edition, 1995.
- [10] J. D. Parsons and J. G. Gardiner. *Mobile Communication Systems*. Blackie & Sons, 1989.
- [11] Simon Haykin. *Communication Systems*. McGraw-Hill, 3rd edition edition, 1994.
- [12] Murray Ralph Spiegel. *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*. McGraw-Hill, 2nd edition edition, 1992.
- [13] Robert C. Dixon. *Spread Spectrum System with commercial applications*. John Willey & Sons, third edition edition, 1994.
- [14] K. S. Gilhosen. On the capacity of a celluar cdma system. *IEEE Trans. Veh. Technology*, VT-40:303–312, 1991.

- [15] John G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 3rd edition edition, 1995.
- [16] TIA/EIA/IS-95. *Telecommunications Industry Association/Eletronic Industry Association*, July 1995.
- [17] Kenneth Smolik Vijay K. Garg and Joseph E. Wilkes. *Applications of CDMA in wireless/personal communications*. Prentice Hall PTR, 1st edition edition, 1997.
- [18] W. C. Y. Lee. Overview of cellular cdma. *IEEE Trans. Veh. Technology*, VT-40:291–302, 1991.
- [19] Seon-Ho Hwang Seong-Lyun Kim, Chankyu Kim and Youngnam Han. A radio network simulator for is-95 based cellular cdma systems: Cdma wins. *IEEE Trans. Veh. Technology*, pages 541–545, 1996.
- [20] Mark Wallace and Rod Walton. Cdma radio network planning. *Anual Inter. Conf. on Universal Personal Communications*, pages 62–67, 1994.
- [21] Szu-Wei Wang and Hua Mary Chion. Network simulations for is-95 cdma systems. *Proc. 5th WINLAB Workshop*, pages 193–215, 1995.
- [22] A. O. Fapojuwo. A simulation study of speech traffic capacity in digital cordeless telecommunication system. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, VT-40:5–17, 1992.
- [23] G. Gordon. *System simulation*. Prentice-Hall. Inc., 2nd edition edition, 1978.
- [24] Herbert Schildt. *C++: The Complete Reference*. McGraw-Hill, 2nd edition edition, 1995.
- [25] Herbert Schildt. *Borland C++: The Complete Reference*. McGraw-Hill, 1st edition edition, 1997.
- [26] Roberto Pacheco Fernando Montenegro. *Orientação a objetos em C++*. Ciência Moderna LTDA, 1994.
- [27] Victorine Viviane Mizrahi. *Treinamento em Linguagem C++ - Módulo 1,2*. Makron Books, 1994.
- [28] John R. Hubbard. *Programming with C++*. McGraw-Hill, 1996.
- [29] Kris Jamsa. *Sucess with C++*. Jamsa Press, 1994.