

Influência do Regime de Alocação de Usuários no Desempenho de um Sistema CDMA

Ricardo Gouveia do Monte

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação -
Comunicações

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Ricardo Gouveia do Monte, Março de 1999

Influência do Regime de Alocação de Usuários no Desempenho de um Sistema CDMA

Ricardo Gouveia do Monte

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação -
Comunicações

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Ricardo Gouveia do Monte, Março de 1999



Monte Ricardo Gouveia
M 791i Influência do regime de alocação
de usuarios no desempenho de um
sistema CDMA. Ricardo Gouveia Monte Campina Grande:
UFPB 1999
Inclui bibliografia
80P.
Dissertação (Mestrado) CCT/UFPB
1-Telefonia 2-Sistema celular I-Título
CDU 621,395

**INFLUÊNCIA DO REGIME DE ALOCAÇÃO DE USUÁRIOS NO DESEMPENHO
DE UM SISTEMAS CDMA**

RICARDO GOUVEIA DO MONTE

Dissertação Aprovada em 29.03.1999



PROF. MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFPB
Orientador



PROF. BENEDITO GUIMARÃES AGUIAR NETO, Dr.-Ing., UFPB
Componente da Banca



PROF. JOÃO MARQUES DE CARVALHO, Ph.D., UFPB
Componente da Banca



GIUSEPPE GLIONNA, Mestre, TELENORDESTE-PE
Componente da Banca

Agradecimentos

- A Deus - Pela força, determinação e coragem de enfrentar os desafios da vida, e de saber diferenciar os limites impostos pelo mundo e pelas pessoas sobre o nosso futuro daqueles a serem superados;
- À minha família - Pelo apoio, compreensão e muitas vezes pela loucura de abdicarem de si próprios tentando promover o bem ao próximo;
- Ao mestre Prof. Marcelo Sampaio de Alencar - Pela confiança em mim depositada, e pelas palavras de incentivo a mim direcionadas, evitando que o sonho caísse no esquecimento e reavivando a chama do desejo pelo saber a cada encontro e a cada conversa;
- Aos professores que muito contribuíram com os seus ensinamentos para minha formação acadêmica e a elaboração deste trabalho;
- A todos os que fazem o meu ambiente de trabalho e que direta ou indiretamente contribuíram com a conclusão deste trabalho, dando o apoio, a torcida, o alerta e o incentivo necessários ao bom andamento e conseqüente término de mais esta etapa de trabalho.

Resumo

Os sistemas de rádio móveis celulares formam um mercado crescente e diversificado.

Redes de primeira geração, com um considerável número de usuários, tiveram início no final da década de setenta e foram implantadas até o final da década de oitenta com sistemas analógicos utilizando o acesso múltiplo por divisão em frequência (FDMA).

Na segunda geração, os sistemas digitais têm sido padronizados e implantados para aumentar a capacidade, o número de serviços, bem como o grau e a qualidade dos serviços. O objetivo é dispor de um sistema com baixo custo, fácil de instalar, com alto desempenho e com operação transparente para o usuário. Alguns destes sistemas utilizados atualmente são baseados no acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA) e outros baseados no acesso múltiplo por divisão de código (CDMA).

O sistema CDMA, ao contrário dos sistemas analógicos e os que utilizam o acesso múltiplo por divisão em tempo, que possuem sua capacidade limitada pela quantidade de canais disponíveis em cada instante, apresenta a sua capacidade limitada pela máxima interferência aceitável sobre o sinal original.

A interferência total existente no sistema é um somatório das diversas interferências existentes, dentre elas pode-se destacar a interferência devido à sobreposição de sistemas, o ruído branco, e a interferência devido à existência de outros usuários na mesma área, que compartilham o mesmo espectro de frequências, sendo esta proporcional à quantidade de usuários ativos em cada instante no sistema.

O trabalho consiste em analisar como a variação no número de usuários ativos no sistema influencia na probabilidade de erro média do sistema CDMA, de forma que se possa fazer um projeto mais coerente do sistema, sem que exista um superdimensionamento da quantidade de portadoras e estações necessárias para prover o serviço de telefonia móvel celular em uma determinada área. Considera-se neste trabalho um regime de alocação estatístico de usuários no sistema, decorrente da Teoria de Filas, para realizar uma comparação com as probabilidades de erro empregadas nos projetos de sistemas de comunicações móveis atuais.

Abstract

Mobile radio systems comprise an increasing and diversified market. First generation networks, with a large number of subscribers, were deployed up to the end of the eighties and used frequency division multiple access (FDMA). The second generation, using digital systems, has been standardized and launched to increase the capacity, number of subscribers and quality of service. Some of those systems use time division multiple access (TDMA) and other code division multiple access (CDMA).

The CDMA system, differently from the analog and other digital systems, has its capacity limited by the number of active users in the system, or by multiple access interference. This interference is composed of noise, other users sharing the same frequency and jamming.

The objective of this work is to analyze the influence of the number of active users in the average probability of error of a CDMA system. Using this approach one expects to design mobile cellular systems in a more consistent and optimized way, avoiding the deployment of excessive radio-base stations in a certain area. This work considers a statistical allocation of users, using Queueing Theory, in order to compute the error rates and compare with the usual procedures for the design of mobile communications systems.

Lista de Notações

- N – Número de usuários
- E_b/N_0 – Relação sinal-ruído
- $a(t)$ – Sinal existente na saída de cada transmissor CDMA
- $s_j(t)$ – Sinal original a ser transmitido
- $c_j(t)$ – Código que irá prover o espalhamento espectral do sinal original
- $I(t)$ – Interferência devido à sobreposição de sistemas
- $n_u(t)$ – Interferência devido aos outros usuários do sistema
- $n(t)$ – Ruído proveniente do sistema, ruído branco
- $r(t)$ – Sinal recebido no demodulador do receptor CDMA
- $u(t)$ – Sinal decodificado pelo receptor CDMA
- G_p – Ganho de processamento
- ξ – Relação sinal-ruído do sistema
- M – Número de canais disponíveis
- B – Largura de faixa
- A – Tráfego oferecido
- η – Rendimento espectral
- G_v – Ganho de atividade de voz
- G_a – Ganho de setorização
- E_b – Energia de bit
- N_o – Densidade espectral de potência do ruído branco

Lista de Abreviaturas

- AMPS - Advanced Mobile Phone System, Sistema Telefônico Móvel Avançado
- D-AMPS - Digital Advanced Mobile Phone System, Sistema Telefônico Móvel Avançado Digital
- FDMA - *Frequency Division Multiple Access*, Acesso Múltiplo por Divisão em frequências
- TDMA - *Time Division Multiple Access*, Acesso Múltiplo por Divisão em Tempo
- CDMA - *Code Division Multiple Access*, Acesso Múltiplo por Divisão em Códigos
- RTPC - Rede de Telefonia Pública Comutada
- ERB - Estação Radiobase
- CCC - Central de Comutação e Controle
- DPSK - *Differential Phase Shift Keying*, Chaveamento por Desvio Diferencial de Fase
- PSK - *Phase Shift Keying*, Chaveamento por Desvio de Fase

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Projeto de Sistemas de Comunicações	4
2.1	Sistemas Convencionais Fixos	4
2.2	Sistemas Móveis Celulares	5
2.3	Espectro de frequências Alocado	5
2.4	Implantação e Ampliação de Sistemas Móveis	6
3	Sistemas Móveis Analógicos e Digitais	13
3.1	Sistema Analógico - AMPS	13
3.2	Padrão TDMA	15
3.3	Padrão Digital Europeu - GSM	17
3.4	Padrão CDMA IS-95	18
3.4.1	Representação matemática	22
3.4.2	Modulação DPSK	23
3.4.3	Número Máximo de Usuários em Função da Probabilidade de Erro	25
3.4.4	Número máximo de usuários permitidos	26
3.5	Probabilidade de Erro Média para um Sistema CDMA com Modulação DPSK e Número Variável de Usuários no Sistema	30
4	Análise de Tráfego	32
5	Aplicações da Influência do Número de Usuários	37
5.1	Sistema CDMA com Quantidade Equiprovável de Usuários	37

5.2	Sistema CDMA com taxas de chegada e partida de usuários constante .	40
5.3	Sistema CDMA com taxas de chegada e partida de usuários desestimuladas	44
5.4	Influência do ganho de processamento	48
6	Conclusões	50
A	Análise Estocástica	60
A.1	Variável Aleatória	60
A.1.1	Média de uma Variável Aleatória	60
A.2	Distribuições de Probabilidade	61
A.2.1	Distribuição Uniforme	61
A.2.2	Distribuição Geométrica	63
A.2.3	Distribuição de Poisson	63
B	Rendimento Espectral	66
C	Princípios de Espalhamento Espectral	71
D	Análise de Sistemas de comunicação sob a Ótica da Teoria de Filas	75
D.0.4	Solução Geral de Equilíbrio	75
D.0.5	Sistema com perda e m servidores - Erlang-B	77
D.0.6	Sistema com taxas constantes	78
D.0.7	Sistema com Chegadas Desestimuladas	79

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de rádio móveis celulares formam um mercado crescente nestes últimos anos. Redes de primeira geração, com um considerável número de usuários, tiveram início no final da década de setenta e foram implantadas até o final da década de oitenta com sistemas analógicos utilizando o acesso múltiplo por divisão em frequência (FDMA), tais como NMT e TACS na Europa, AMPS nos Estados Unidos e NTT e J-TACS no Japão.

Na segunda geração, os sistemas digitais têm sido padronizados e implantados para aumentar a capacidade, o número de serviços, bem como o grau e a qualidade dos serviços, abrindo novas oportunidades para conceitos emergentes, tal como a “multimídia”. O objetivo é dispor de um sistema com baixo custo, fácil de instalar, com alto desempenho e com operação transparente para o usuário. Alguns destes sistemas são baseados no acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA) e outros baseados no acesso múltiplo por divisão de código (CDMA), ambos incluindo uma componente de acesso múltiplo por divisão em frequência para realizar a coordenação dos espectros em faixas pré-estabelecidas.

O sistema CDMA, ao contrário dos sistemas analógicos e dos que utilizam o acesso múltiplo por divisão em tempo, e possuem sua capacidade limitada pela quantidade de canais disponíveis em cada instante, apresenta a sua capacidade limitada pela máxima interferência aceitável sobre o sinal original.

A interferência total existente no sistema é um somatório das diversas interferências

existentes, dentre elas pode-se destacar a interferência proveniente da sobreposição de sistemas, o ruído branco, e a interferência devido à existência de outros usuários na mesma área, que compartilham o mesmo espectro de frequências, sendo esta última proporcional à quantidade de usuários ativos em cada instante no sistema.

O trabalho proposto consiste em analisar como a quantidade de usuários existente influencia na probabilidade de erro média do sistema CDMA, de forma que se possa fazer um projeto mais otimizado do sistema, sem que exista um superdimensionamento da quantidade de portadoras e estações necessária para prover o serviço de telefonia móvel celular em uma determinada área .

Considera-se neste trabalho alguns modelos para representar a variação na quantidade de usuários ativos no sistema, os quais conduzem a probabilidades associadas à ocorrência de cada quantidade de usuários ativos no sistema.

No capítulo 2 faz-se uma introdução mostrando a diferença principal entre o sistema convencional fixo e os sistemas móveis, definindo a medida de qualidade do sistema, grau de serviço, e mostrando os procedimentos básicos para a elaboração do projeto de um sistema móvel.

No capítulo 3 descreve-se os principais sistemas analógicos e digitais de comunicações móveis em operação comercial, mostrando algumas das suas características principais, enfatizando-se o sistema CDMA que será abordado durante todo este trabalho. Mostra-se neste capítulo o princípio de funcionamento, o modelamento matemático para os sinais transmitidos e recebidos, e a probabilidade de erro de um sistema CDMA empregando uma modulação DPSK.

No capítulo 4 são mostradas as principais fórmulas de bloqueio existentes atualmente, descrevendo-se as suas características e as situações em que elas podem ser empregadas. Posteriormente é feita uma comparação entre a capacidade de tráfego dos sistemas AMPS e D-AMPS.

No capítulo 5 verifica-se a influência do número de usuários em um sistema CDMA utilizando uma modulação DPSK, quando assume-se que a quantidade de usuários seja fixa, calculando-se a probabilidade de erro [45], posteriormente empregou-se modelos para representar o comportamento de chegada e saída de usuários ao sistema, em função das características assumidas para os sistemas, as quais levaram à utilização

das distribuições uniforme, geométrica e poissoniana para representar a probabilidade de existência de uma determinada quantidade de usuários ativos no sistema em um determinado instante, e uma forma de se diminuir o piso de erro médio quando se considera esta influência do regime de alocação de usuários.

Capítulo 2

Projeto de Sistemas de Comunicações

2.1 Sistemas Convencionais Fixos

Para um sistema convencional de comunicação, cada usuário encontra-se em um local fixo, possibilitando que seja determinada a quantidade de terminais existentes em cada área, esta característica favorece o dimensionamento do sistema de comunicações, pois não existindo variação na localização destes terminais é possível se aplicar a teoria tradicional de tráfego para o dimensionamento do número de órgãos a serem disponibilizados, transformando o tráfego oferecido ao sistema em tráfego escoado.

Define-se então uma medida de qualidade, denominada grau de serviço do sistema [5], como sendo o percentual de tempo em que todos os canais de voz estão ocupados simultaneamente, fazendo com que uma tentativa de chamada não se realize com sucesso. Pode-se observar que este é um termo enganoso, na medida em que quanto maior o grau de serviço, maior a probabilidade do sistema não ter condições de escoar a chamada e conseqüentemente pior o desempenho do sistema.

2.2 Sistemas Móveis Celulares

Embora as características de tráfego de um sistema de rádio móvel sejam diferentes de uma rede telefônica fixa, o planejamento e projeto dos sistemas continuam atualmente sendo feitos com as ferramentas da teoria de tráfego tradicional.

De acordo com o tráfego esperado e os requisitos de interferência desejados a região geográfica é dividida em células. Dado o tráfego em cada célula e a probabilidade de erro média desejada, utiliza-se a fórmula de Erlang B, a mesma utilizada em sistemas fixos, para determinar o número de canais necessários por célula, desprezando-se o efeito da mobilidade do usuário.

Posteriormente o projeto é ajustado utilizando-se os dados de tráfego extraídos da central, de forma a levar em consideração os efeitos provenientes da mobilidade inerente ao terminal, através da inclusão de fatores de ponderação, modelando a sazonalidade do tráfego em cada célula do sistema, tornando o projeto mais coerente com a realidade.

Dentre as principais funções que caracterizam a mobilidade do usuário pode-se destacar os seguintes:

Handoff - Função que permite manter a continuidade da conversação quando um usuário passa de uma célula para outra

Roaming - Função que permite a passagem de um usuário para a área de atuação de uma outra CCC, ou para uma área de tarifação diferente dentro de uma mesma CCC, permitindo que a chamada seja tarifada de forma diferenciada..

2.3 Espectro de frequências Alocado

Os sistemas de comunicações móveis celulares apresentam uma faixa de frequências regulamentada, de acordo com normas federais que estabelecem regras de utilização do espectro existente, destinando faixas de frequências específicas para cada tipo de serviço. Para o serviço móvel celular foi destinada a faixa compreendida entre 806 e 890 MHz, conforme a Figura 2.1.

A faixa de frequências destinada ao serviço móvel celular foi então subdividida em faixas menores, que devem ser utilizadas por cada uma das operadoras, de forma a

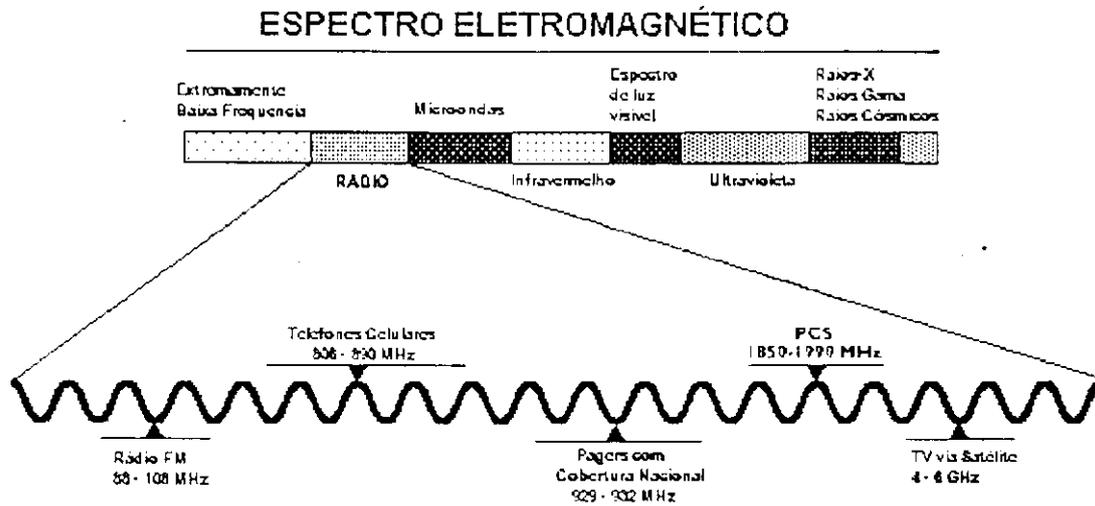


Figura 2.1: Espectro Eletromagnético

proporcionar a divisão do espectro em duas bandas de igual largura, proporcionando uma igualdade de direitos na utilização do espectro por cada uma das operadoras, estas sub-faixas estão mostradas na Figura 2.2

2.4 Implantação e Ampliação de Sistemas Móveis

O projeto de implantação/ampliação de um sistema de comunicações móvel é realizado seguindo-se algumas etapas e procedimento, de forma a se padronizar os procedimentos e medições necessárias à execução da expansão da planta, estas etapas principais estão mostradas conforme a Figura 2.3.

Inicialmente o projeto passa pela etapa de definição das localidades a serem atendidas, nessas localidades é feito o levantamento dos dados necessários para se verificar o interesse pelo serviço de telefonia móvel celular, através de pesquisas de opinião, levantamento do poder aquisitivo dos moradores, estratificação dos tipos de profissionais

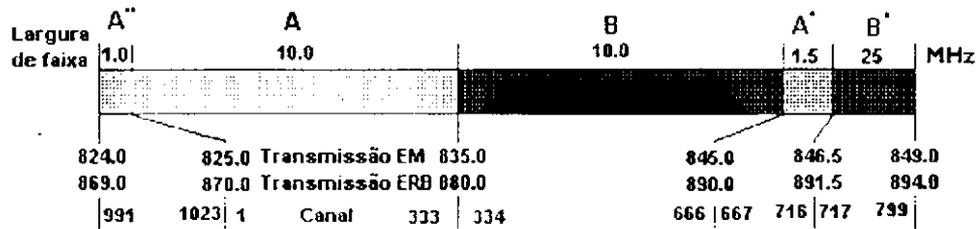


Figura 2.2: Faixas de Frequências Utilizadas pelo Serviço Móvel Celular Banda A e B

existentes. Com isso é determinado o interesse pelo serviço em cada área que se pretende atender.

O próximo passo no projeto do sistema é a verificação das leis existentes sobre este tipo de serviço em cada área, de forma a compatibilizar a implantação desse tipo de serviço em cada uma delas, verificando quais as exigências legais para a sua implantação.

A partir dos dados de demanda existentes é feita uma distribuição teórica das Estações Rádio Bases - *ERB's*, de forma a tentar prover a cobertura com o serviço móvel celular em toda a área desejada, nesta etapa é feita uma modelagem de cada um dos locais, de acordo com o tipo de área predominante, área urbana, suburbana e rural.

Feito o modelamento, segue-se a etapa de simulação do modelamento feito, através das fórmulas de predição disponíveis, tal como Lee, Okumura, ou alguma variação existente, de forma a verificar se a escolhas das *ERB's* foi satisfatória. Em caso de existirem locais sem cobertura, denominados áreas de sombra, é feita uma análise das relocações/inclusões de estações possíveis, visando o atendimento de toda a área desejada.

Uma vez que se tenha obtido sucesso na cobertura, mesmo que teórica, de toda a área segue-se a etapa de dimensionamento da quantidade de canais necessários para atender à expectativa de tráfego de cada uma das áreas, através do uso das fórmulas de tráfego existentes.

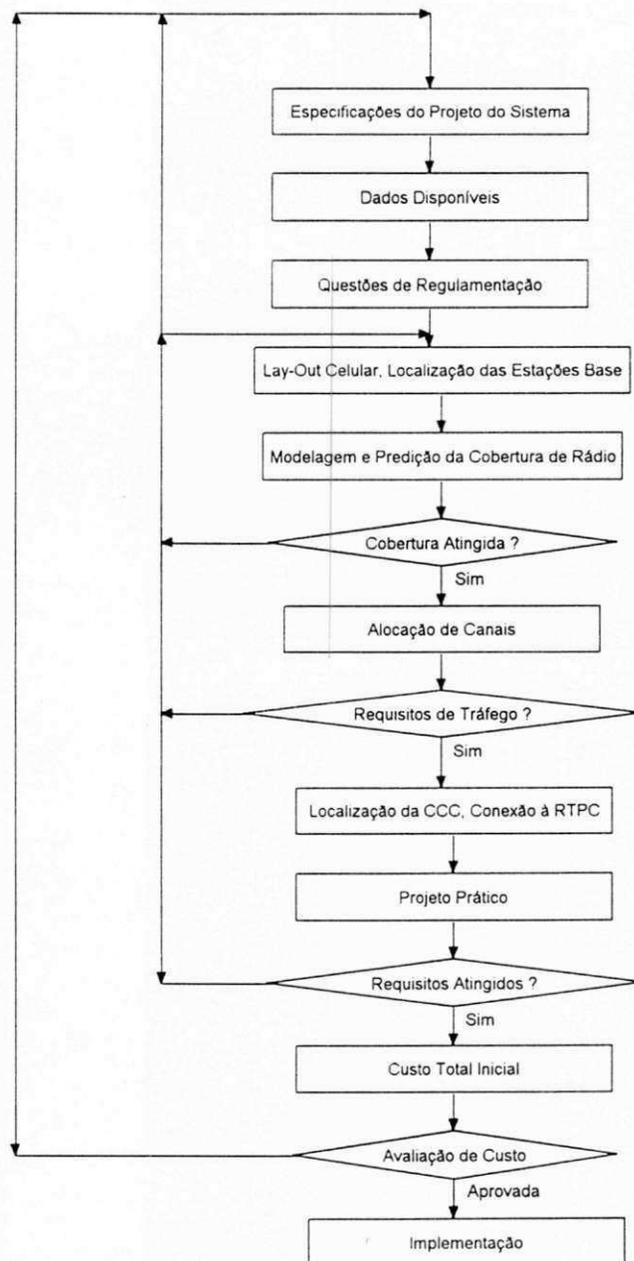


Figura 2.3: Projeto básico de um sistema celular

Após a escolha da localização das ERB's, é feita a escolha de um local para a implantação da Central de Comutação e Controle - CCC, e conseqüentemente o ponto de interconexão com a Rede de Telefonia Pública Comutada - RTPC, de forma a minimizar os gastos com meios de interligação entre as ERB's e a CCC, ou entre a CCC e a RTPC.

Após a determinação dos requisitos teóricos iniciais para a implantação do sistema, segue-se a elaboração do projeto prático do sistema, o qual levará em consideração alguns fatores operacionais desprezados no projeto teórico, dentre estes fatores pode-se destacar os seguintes:

- *Processo de aquisição/locação dos imóveis para implantação das ERB's* - Os locais possíveis de serem implantadas ERB's devem satisfazer alguns requisitos básicos, tais como disponibilidade de energia, área útil suficiente, possibilidade de coexistência da ERB com outros equipamentos existentes. Desta forma os locais disponíveis para a implantação das ERB's nem sempre coincidem com os especificados no projeto e usados na predição, sendo portanto necessário que seja feita uma avaliação da viabilidade dos locais através de novas simulações e conseqüente comprovação da cobertura desejada.
- *Verificação da Modularidade dos Equipamentos* - O processo teórico de alocação de canais em função do tráfego desejado para uma determinada área pode levar à conclusão de ser necessária a utilização de uma quantidade de canais que não coincida com o número de canais existente em um módulo do equipamento. Nesses casos deve-se optar entre oferecer um tráfego maior que o necessário, com a alocação de uma quantidade de canais maior, ou reduzir a quantidade de tráfego oferecida, usando uma quantidade de canais menor que a prevista para o local, de acordo com as perspectivas de expansão da capacidade do sistema. Geralmente nos projetos opta-se pela disponibilização de um tráfego superior ao tráfego requerido na expansão, reduzindo a necessidade de expansão em um curto período de tempo.
- *Disponibilidade de meios de interligação* - O projeto prático deve considerar a situação real dos meios de interligação/interconexão, de forma a considerar a

quantidade de meios, próprios ou alugados, disponíveis para serem usados na formação da rede do serviço móvel celular.

Terminado o processo de elaboração do projeto prático, parte-se para a avaliação da viabilidade econômica do projeto, através da avaliação dos custos envolvidos, caso estes custos sejam compatíveis com as pretensões de alocação de recursos e com o retorno financeiro desejadas.

Após a análise da viabilidade econômico-financeira do projeto procede-se então a etapa final do projeto com a elaboração de um projeto mais detalhado do sistema, o qual envolve parâmetros de RF, escolha de antenas, tipos de cabos, grupos de frequência, para então ser iniciada a etapa de realização física do projeto, através da implantação dos equipamentos das *ERB's*, *CCC* e meios de transmissão.

O processo de ampliação do sistema é feito basicamente da mesma maneira que o projeto inicial, diferindo basicamente no fato de que já se conhece a legislação a ser empregada e de não ser necessária a elaboração de um projeto inicial, os quais já foram feitos no projeto de implantação.

Este conhecimento do comportamento de tráfego dos assinantes facilita o dimensionamento dos equipamentos a serem utilizados para prover a ampliação do sistema.

Um ponto que deve ser levado em consideração no processo de ampliação do sistema é o fato de sempre ser necessária uma análise criteriosa do sistema já existente, de forma a evitar que os equipamentos a serem introduzidos no sistema não venham a degradar a qualidade dos serviços existente, causando um impacto negativo no usuário do sistema.

Para que as ampliações não provoquem uma degradação muito acentuada na qualidade do sistema, são feitas modificações no plano de frequências, potências irradiadas, posicionamento de antenas (tilt e azimute), análise das antenas empregadas, de forma a serem utilizadas as que mais se adequem a cada situação (ângulos vertical e horizontal, ganho, relação frente-costa), e até eventuais trocas de equipamentos, tais como, antenas, rádios.

Em casos extremos pode-se chegar até mesmo à relocação de *ERB's* inteiras, de forma a favorecer expansões futuras no sistema e adequar a disposição das *ERB's* à localização do tráfego existente.

Em virtude do grande crescimento ocorrido na demanda pelos serviços de telefonia móvel celular, tornou-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas de transmissão dos sinais mais eficientes, de forma a possibilitar o atendimento dessa gama de usuários novos. Essas técnicas direcionam para a migração do processamento analógico dos sinais para um processamento digital, onde existe uma maior confiabilidade e facilidade no tratamento dos dados, pois os investimentos necessários à ampliação do sistema utilizando-se a tecnologia analógica começaram a ficar muito elevados, aumentando o custo total de implantação e inviabilizando economicamente muitos dos projetos.

Dentre os objetivos principais da transição para o sistema celular digital pode-se destacar os seguintes:

- Permitir que dentro de uma mesma faixa espectral possam ser acomodados mais assinantes, através das vantagens de um acesso temporal (TDMA) ou por código (CDMA);
- Assegurar capacidade adequada para expandir a cobertura para assinantes analógicos;
- Garantir a qualidade, no desempenho de transmissão, tanto para os assinantes analógicos como digitais;
- Minimizar o impacto de hardware e os custos de sistemas implantados.
- Uma integração mais natural com a rede digital;
- Flexibilidade na mistura dados/voz e suporte a novos serviços;
- Um potencial aumento de capacidade com a implementação de vocoders mais eficientes;
- Potência da portadora de RF transmitida reduzida;
- Possibilidade do uso de criptografia;
- Redução na complexidade de gerenciamento dos sistemas;

- Rejeição à interferência - A comunicação digital proporciona um tratamento mais eficiente dos sinais interferentes, reduzindo os efeitos da interferência através de técnicas de detecção e correção de erros.

A tecnologia digital tornou-se atraente, pois muitos dos ajustes finos que são inerentes a aparelhos analógicos são desnecessários a sistemas digitais o que implica também numa diminuição sistemática dos custos de produção.

A seguir será feita uma descrição dos principais sistemas de telefonia móvel celular existentes atualmente em operação comercial, mostrando de forma sucinta as suas características e posteriormente será feita uma análise da probabilidade de erro de um sistema CDMA em função da quantidade de usuários em conversação em um determinado momento.

Capítulo 3

Sistemas Móveis Analógicos e Digitais

3.1 Sistema Analógico - AMPS

O sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), desenvolvido no Estados Unidos encontra-se em serviço desde de 1983, tendo sido iniciada a utilização no Brasil em 1991. Neste sistema, os sinais de voz modulam em frequência (FM) as portadoras dos canais e a sinalização utiliza a modulação FSK (*frequency shift keying*) a uma taxa de 10 kbits/s, nos quais os canais de voz e sinalização ocupam, individualmente, uma largura de faixa de 30 kHz.

A fim de manter a interferência co-canal em níveis aceitáveis, um plano típico de reuso de frequência emprega um cluster de 12 células com antenas omnidirecionais ou um cluster de 7 células com 3 setores por célula. O AMPS também está em operação no Canadá, América do Sul e Central e Austrália.

Dentre os sistemas analógicos em operação no mundo pode-se incluir: o *Total Access Communications System* (TACS), usado no Reino Unido, Itália, Espanha, Áustria e Irlanda do Norte; *Nordic Mobile Telephone* (NMT) em vários países; *C-450*, Alemanha e Portugal; *Radiocom-200*, França; *Radio Telephone Mobile System* (RTMS), Itália. Todos utilizam modulação FM para voz e FSK para sinalização.

As mensagens transmitidas nos sistemas de comunicações sofrem interferências

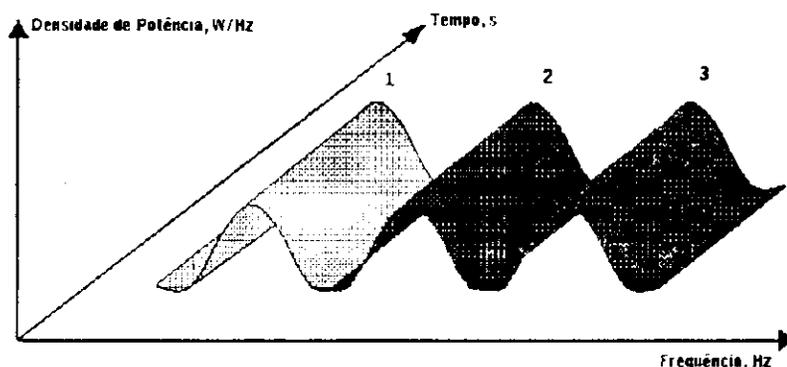


Figura 3.1: Alocação de Potência do Sistema FDMA

provenientes do meio de transmissão, interferências provenientes do reuso de frequência utilizado, entre outras. De forma a minimizar os efeitos desta interferência, utiliza-se uma proteção para as mensagens, sendo mais utilizados os seguintes os métodos:

- Princípio de Decisão por Maioria (PMD) - Neste princípio um sinal é transmitido várias vezes, e o receptor verifica dentre os sinais recebidos qual ocorreu sem erros com maior frequência, assumindo que o sinal transmitido foi este mais frequente;
- Solicitação de Repetição Automática (ARQ) - No princípio de solicitação de repetição automática (ARQ), o receptor envia uma mensagem ao transmissor solicitando que seja retransmitida uma determinada mensagem sempre que ela tiver chegado com erro.

Em ambientes com forte desvanecimento, devido à existência de uma grande quantidade de palavras com erro, o PMD é uma boa opção, enquanto que para ambientes de desvanecimento lento o ARQ é a melhor opção, pois a retransmissão das palavras com erro representa uma carga no sistema pequena. Em virtude das características do canal de transmissão o sistema AMPS, adotado no Brasil, utiliza o PMD.

O sistema AMPS tem como característica um total de 50 MHz nas faixas de 824 - 849 MHz na direção ERB-EM e 869 - 894 MHz na direção EM - ERB. Nesse sistema, o espectro é dividido em 832 canais, com 30 kHz cada um, e possui um raio de cobertura

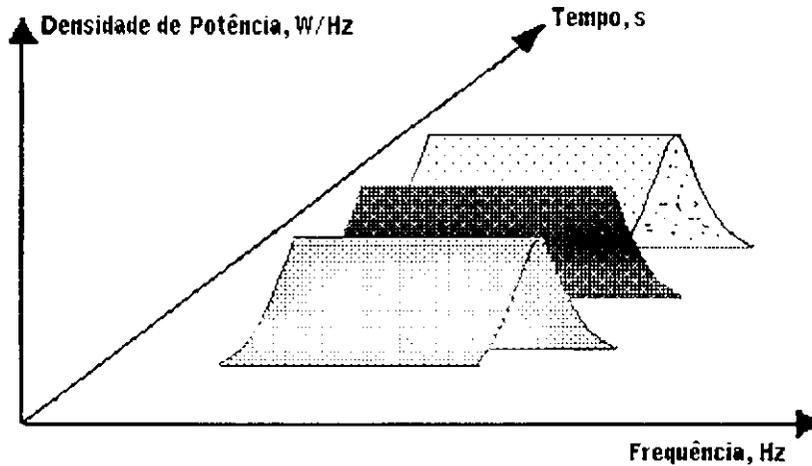


Figura 3.2: Alocação de Potência do Sistema TDMA

que varia entre 150 metros para microcélulas e 20 km para *ERB's* localizadas em áreas rurais, dependendo da configuração dos equipamentos empregada.

Como exemplo pode-se mostrar através da Tabela 3.1 qual a frequência central em MHz correspondente ao número de um canal da banda A:

Transmissão	Número do Canal	freqüência Central MHz
Móvel	$1 \leq N \leq 799$	$0,030N + 825.000$
	$990 \leq N \leq 1023$	$0,030(N - 1023) + 825.000$
Base	$1 \leq N \leq 799$	$0,030N + 870.000$
	$990 \leq N \leq 1023$	$0,030(N - 1023) + 870.000$

(3.1)

3.2 Padrão TDMA

Para manter compatibilidade com o sistema existente, os Estados Unidos e Japão optaram por desenvolver um sistema que permitisse, com o uso de telefones duais, uma

transição suave para a tecnologia digital.

Todos utilizam codificadores de fonte híbridos, aproveitando a combinação da qualidade dos codificadores de forma de onda com a eficiência de compressão dos codificadores paramétricos (*vocoders*).

De forma a compensar as não linearidades inerentes dos amplificadores de potência de alto rendimento, são empregadas variações da modulação por desvio de fase de quatro níveis (QPSK - *Quaternary Phase Shift Keying*), as quais propiciam também uma relação de compromisso satisfatória entre a largura de faixa do canal de transmissão e a tolerância ao ruído. A técnica TDMA (*Múltiplo Acesso por Divisão no Tempo*) é usada em um dos padrões americanos e nos padrões europeu e japonês. O outro padrão americano adotou a técnica CDMA (*Múltiplo Acesso por Divisão em Código*).

Tendo como requisito a compatibilidade com o sistema existente, foi aprovado pela EIA/TIA um padrão de acesso múltiplo, baseado na divisão do tempo, o TDMA com 30 kHz por frequência de portadora, designado originalmente por IS-54 (Interim Standard). Isto devido a crescente necessidade de aumento da capacidade do sistema celular em áreas de alta densidade populacional. Este padrão utiliza um TDMA com 3 usuários por portadora.

O padrão digital baseado no multiacesso por divisão em tempo foi proposto inicialmente com os seguintes objetivos principais:

- Aumento de capacidade de 10 vezes em relação ao sistema analógico;
- Compatibilidade com o sistema analógico;
- Evolução suave entre os sistemas analógicos e digitais.

Atualmente apenas a primeira meta não foi alcançada, pois a capacidade total do sistema na implementação atual é de apenas 3 vezes a quantidade de canais do sistema analógico.

Este aumento para 3 vezes a quantidade de canais analógicos não significa que o sistema digital apresenta uma capacidade de tráfego três vezes maior que o sistema analógico, pois analisando-se o modelo proposto por Erlang B [31] pode-se verificar

que o tráfego escoada por um sistema não apresenta um comportamento linear com a quantidade de canais disponíveis.

Parâmetros de frequência

A fim de facilitar a evolução do sistema analógico para o digital, foi mantida no sistema digital a banda de 30 kHz utilizada pelo AMPS. A transmissão da Estação Móvel (EM) dual para a Estação Rádio Base (ERB) é a partir de 825.030 MHz, enquanto que a ERB transmite a partir de 870.030 MHz, sendo esse primeiro canal denominado canal número 1 de transmissão. No sistema TDMA, igualmente ao sistema analógico AMPS, o espectro de frequências ocupado é de 25 MHz, a qual é dividida em 832 canais, sendo 416 destinados ao uso pela banda A e 416 para banda B.

A Taxa de transmissão utilizada atualmente é de 48,6 kbits/s, sendo utilizada a modulação $\pi/4 - DQPSK$ a 24,3 kbauds/s.

3.3 Padrão Digital Europeu - GSM

Na Europa, em virtude da multiplicidade de sistemas analógicos existentes, não havia a necessidade de compatibilização com o sistema anterior, direcionando para o desenvolvimento de um sistema que pudesse ser implantado em toda a Europa e fosse adotado como um padrão, desta forma criou-se um único sistema denominado GSM (*Global System for Mobile Communications*).

Este padrão é utilizado em toda Europa, na Austrália e em diversos países asiáticos e possui uma largura de faixa por portadora de 200 kHz. A técnica de acesso utilizada é o TDMA, de forma que cada usuário dispõe de toda esta faixa durante $577 \mu s$, isto é, o período de tempo de uma janela (*slot*). A reunião de 8 usuários distintos corresponde ao quadro (*frame*), cuja duração é de $4,615 ms$ ($8 \times 0,577$). Essa estrutura simplifica a parte de RF das ERBs e dos terminais móveis, uma vez que não é necessário um receptor independente para cada canal, como no caso dos sistemas analógicos e os que utilizam a técnica de acesso TDMA.

O processo de handoff também possui uma característica distintas dos sistemas analógicos. Deve-se notar que o terminal móvel utiliza apenas $1,18 ms$ do total de $4,615$

ms de duração do quadro para transmitir e receber mensagens da ERB. O tempo (480 ms no caso do GSM) e os 6 níveis de maior intensidade são enviados por um canal de controle à ERB que está conectado ao terminal móvel. Este procedimento é conhecido como handoff com a ajuda do terminal móvel (MAHO - *Mobile Assisted Handoff*).

A modulação GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) é derivada da MSK, onde o sinal a ser transmitido, antes de entrar no modulador, passa por um filtro gaussiano. A vantagem dessa técnica de modulação é o fato de apresentar envoltória constante, permitindo operar com amplificadores de potência operando na região não-linear, de modo a elevar a eficiência dos mesmos.

A taxa de transmissão na saída do codificador de fonte é de 13 kbits/s, acrescentando-se 9,8 kbits/s do circuito corretor de erro (*código convolucional de razão 1/2*) e 11,05 kbits/s relativos ao canal de controle e sincronismo. tem-se 33,85 kbits/s por usuário e uma taxa total de 270,8 kbits/s com a formação do quadro[3].

Para compensar o efeito do desvanecimento por multipercurso, o padrão GSM utiliza equalizadores de canal, o código convolucional citado anteriormente, o entrelaçamento de bits (*interleaving*) e o salto em frequência (*frequency hopping*), onde cada janela é transmitida em diferentes frequências de portadoras, são as técnicas utilizadas para aumentar o desempenho do GSM. O salto em frequência é uma função opcional na ERB e obrigatória no terminal móvel.

O padrão GSM foi projetado de modo a ser compatível com a RDSI (*Rede Digital de Serviços Integrados*). Assim, o GSM oferece uma série de opções de chamadas, tais como a espera, desvio de chamada, chamada com restrição e uma variedade de serviços de dados até 9600 kbits/s, onde é dispensável o emprego de *modems* específicos.

3.4 Padrão CDMA IS-95

Norma americana, que entrou no mercado em abril de 1995 e é baseada no sistema CDMA proposto pela QUALCOMM. Nesse sistema diversos usuários compartilham o mesmo canal de transmissão. A taxa básica de transmissão do usuário é de 8 kbits/s utilizando o codificador QCELP, tendo sido posteriormente desenvolvido um codificador de fonte para transmissão a uma taxa de 13 kbits/s, denominado QCELP13.

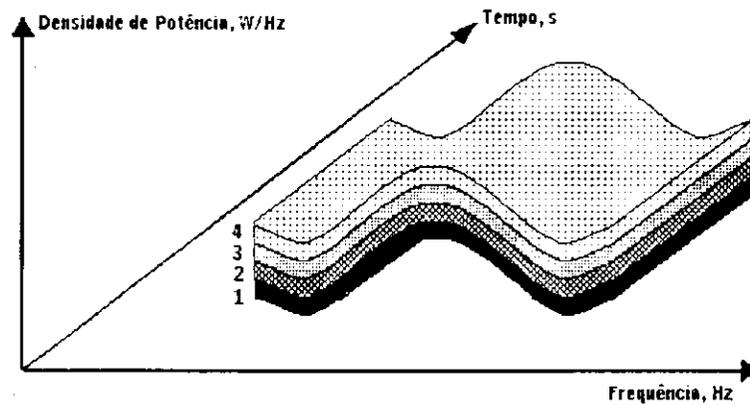


Figura 3.3: Alocação de Potência no Sistema CDMA

O sinal original sofre um espalhamento para uma taxa de chip de 1,2288 Mchip/s, resultando num ganho de processamento nominal de 128, para o codificador de 8 kbits/s.

Um chip é definido como um pulso, gerado usualmente a partir de uma sequência pseudoaleatória, que apresenta um período menor que aquele referente ao bit do sinal do sinal original a ser transmitido e serve para modular este sinal, espalhando o seu espectro.

Code Division Multiple Access (Acesso Múltiplo por Divisão em Códigos) é um método de acesso no qual todos os usuários podem transmitir simultaneamente, operando na mesma faixa de frequência utilizando completamente a largura de faixa do sistema. Uma das principais características do sistema CDMA é fato de ser necessária uma coordenação de frequências muito pequena, ao contrário dos sistemas FDMA e TDMA nos quais o gerenciamento de frequência e tempo é crucial [50].

Em um sistema CDMA cada sinal consiste de uma sequência binária pseudoaleatória que combinada com o sinal digital modula uma portadora, espalhando o espectro. Um grande número de sinais CDMA compartilha o mesmo espectro de frequências. Os sinais são diferenciados no receptor usando-se um correlator que aceita somente a energia do sinal da sequência binária selecionada de forma a condensar o espectro.

Os sinais provenientes dos outros usuários representam uma interferência gerada

pelo sistema sendo portanto tratados como ruído, e representam uma interferência de acesso múltiplo.

Os parâmetros primordiais que determinam a capacidade do sistema celular digital CDMA são: Ganho de processamento G_p , Relação Sinal-Ruído ξ , Taxa de Ocupação de Voz G_v , eficiência de reuso de frequência e o número de setores na célula. O sistema telefônico CDMA alcança uma eficiência espectral teórica de até vinte vezes a eficiência do sistema FM, utilizado nos sistemas tradicionais AMPS, quando servindo a mesma área com o mesmo sistema de antenas, isto é uma chamada por cada 10 kHz de espectro.

Cada usuário CDMA ocupa o espectro total alocado para o sistema, através da aplicação de uma seqüência diferente de espalhamento de forma de onda ao sinal original, resultando em um sistema limitado em interferência, diferente dos sistemas tradicionais, na medida em que a limitação é feita pela máxima interferência admissível sobre o sinal original e não por uma limitação física de número de canais.

Segundo esses parâmetros obtém-se para o sistema CDMA uma capacidade de até 62 usuários por faixa de 1,25 MHz, em virtude da necessidade de utilização de duas destas seqüências para os canais de busca e de controle.

Esses valores utilizados coincidem com os resultados encontrados para a quantidade máxima de usuários possíveis de serem alocados em cada portadora CDMA, que proporciona uma utilização satisfatória do canal [8].

O sistema CDMA é introduzido no sistema substituindo-se uma faixa de 1,25 MHz do espectro analógico, equivalente a aproximadamente 40 canais, por um único canal CDMA, que tem capacidade para transportar o sinal de até 64 usuários, já que são empregadas 64 seqüências pseudo-aleatórias diferentes em cada célula.

Atualmente não são transmitidos 64 sinais de voz, em virtude da necessidade de transmissão dos sinais de controle para o sistema, podendo ser utilizado na prática um máximo de 50 canais por portadora.

A tecnologia de acesso múltiplo por divisão em códigos (CDMA), em operação comercial, propõe um padrão de acesso múltiplo que visa alcançar a segunda geração dos sistemas celulares capazes de prover uma eficiência de espectro, economia e serviços celulares com qualidade digital a baixos custos.

Um protótipo de um sistema celular CDMA consistindo de seis células (nove setores) e setenta estações móveis, também foi desenvolvido e testado extensivamente em San Diego, Estados Unidos, em conjunto com muitas operadoras celulares, operadores de rede e operadores móveis [39]. O sistema está atualmente em operação comercial nos Estados Unidos, regiões da Ásia, incluindo Taiwan e Hong Kong e América do Sul, incluindo vários estados do Brasil.

Os parâmetros primordiais que determinam a capacidade de um sistema celular digital CDMA são: ganho de processamento, relação sinal ruído E_b/N_0 , fator de utilização de voz, eficiência de reuso de frequência e o número de setores na célula.

O acesso por divisão em códigos apresenta alguns benefícios que podem justificar a sua utilização como uma alternativa sobre os outros sistemas. Primeiramente, pode-se citar como vantagens do sistema CDMA uma maior capacidade, na medida que os testes de campo indicaram um aumento de até 12 vezes em relação ao sistema analógico; maior privacidade, devido ao formato de sinalização em faixa larga; compatibilidade com o sistema analógico, devido ao fato de ser possível implantar o sistema CDMA apenas substituindo-se faixas do espectro do sistema analógico por canais do sistema CDMA, havendo portanto uma coexistência entre os sistemas, o que possibilita a transferência de usuários do sistema analógico para o sistema CDMA; um serviço de alta qualidade, devido à utilização de um vocoder de taxa variável; técnica de *handoff* suave e utilização de receptores RAKE para a sintonia independente de sinais provenientes de multipercursos.

Em segundo lugar o sistema CDMA utiliza múltiplas formas de diversidade, na medida em que emprega a diversidade em frequência, através do espalhamento do espectro em uma faixa bastante larga, diversidade em tempo, através do entrelaçamento dos bits do sinal para evitar erros de rajada, uso de códigos corretores de erro e finalmente a diversidade de espaço, representada pela utilização do receptor RAKE, múltiplos caminhos entre a estação móvel e duas ou mais estações radiobase e utilização de várias antenas em cada célula.

Finalmente o sistema CDMA necessita de um controle de potência mais efetivo, esse controle representa uma das deficiências deste sistema e tem como objetivo manter um nível constante do sinal independente da posição do móvel, ou das condições de

propagação do meio em que ele se encontra, evitando um aumento da interferência de um usuário em outro, um mascaramento do sinal decodificado, ou uma queda na relação sinal ruído do sistema.

3.4.1 Representação matemática

Sinal Transmitido por cada usuário

O sinal $a(t)$ existente na saída de cada transmissor é dado pelo produto do sinal original $s_j(t)$, pelo sinal de faixa larga que proverá o espalhamento espectral $c_j(t)$, sendo dado por [46]

$$a(t) = c_j(t)s_j(t);$$

em que $s_j(t)$ é o sinal faixa estreita que é utilizado para modular a seqüência pseudo-aleatória $c_j(t)$.

Pela análise de Fourier, sabe-se que a multiplicação de dois sinais no domínio do tempo corresponde a sua convolução no domínio da frequência, portanto o sinal resultante do produto de $c_j(t)$ por $s_j(t)$ apresenta uma característica espectral aproximadamente igual a $c_j(t)$, devido à banda do sinal original ser muito menor que a banda passante do código aplicado.

Sinal Recebido

O sinal transmitido passa então através de um canal no qual existe a superposição de outros sinais de faixa larga, proveniente dos outros usuários existentes no sistema, da interferência originada pela sobreposição de sistemas $I(t)$ e do ruído proveniente do sistema $n(t)$ sobre o sinal desejado, formando então o sinal recebido. Assumindo-se uma quantidade instantânea de usuários N no sistema, o sinal recebido será dado por

$$r(t) = \sum_{j=1}^N c_j(t)s_j(t) + I(t) + n(t) . \quad (3.2)$$

Processo de decodificação

Assume-se que a mesma seqüência de espalhamento utilizada na transmissão está disponível no receptor, através de uma geração local em perfeito sincronismo com a seqüência utilizada na transmissão.

O sinal recebido é então submetido a um processo de encolhimento da sua largura de banda ocupada, dado por uma nova aplicação de um código ao sinal recebido, este processo está descrito pela equação

$$u(t) = c_i(t) \left(\sum_{j=1}^N c_j(t) s_j(t) + I(t) + n(t) \right),$$

que desenvolvendo fornece

$$u(t) = c_i^2(t) s_i(t) + c_i(t) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N c_j(t) s_j(t) + I(t) + n(t) \right). \quad (3.3)$$

Se os códigos que representam o conjunto de funções de espalhamento forem escolhidos de forma a possuírem uma baixa correlação cruzada, a primeira parte do sinal decodificado dada pela Equação 3.3 representará o sinal original ponderado por um fator $K = c_i^2(t)$. O fator K representa a correlação cruzada entre os dois códigos, a qual idealmente, pelo fato dos códigos terem sido assumidos iguais tanto no transmissor quanto no receptor, apresenta valor unitário. A segunda parcela do sinal decodificado dada pela Equação 3.3 representará o ruído existente devido ao canal e à existência de outros usuários no sistema.

Estes sinais estão mostrados na Figura 3.4.

3.4.2 Modulação DPSK

A modulação DPSK utilizada no sistema CDMA é uma versão não coerente da modulação PSK, eliminando a necessidade de um sinal de referência no receptor através da combinação de duas operações básicas no transmissor: (1) Codificação diferencial do sinal no transmissor da forma de onda binária e (2) Deslocamento por chaveamento de

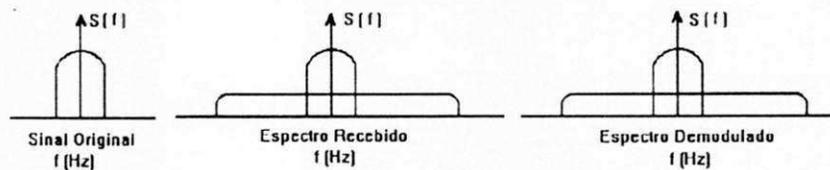


Figura 3.4: Sinal CDMA

freqüências. Na verdade, para ser transmitido o símbolo 0, desloca-se a fase do sinal de 180 graus, e para transmitir-se o símbolo 1, mantém-se a fase do sinal. O receptor é dotado de um poder de armazenamento, de forma a ter condições de comparar a diferença relativa de fase do sinal recebido em dois intervalos de símbolo consecutivos e daí definir se . Dado que a fase desconhecida θ varie lentamente (devagar o suficiente para ser considerada constante durante dois intervalos de símbolo consecutivos), a diferença de fase entre estes dois intervalos de bit será independente de θ .

Probabilidade de Erro

A probabilidade de erro para um sistema DPSK é dada por

$$P_e = \frac{1}{2}e^{-\xi} \tag{3.4}$$

para a qual $\xi = \frac{E_b}{N_0}$.

Esta probabilidade de erro apresenta um ganho de 3dB sobre o sistema FSK não coerente [38], para uma mesma relação sinal-ruído.

3.4.3 Número Máximo de Usuários em Função da Probabilidade de Erro

Ao contrário do FDMA usual ou TDMA, a natureza dos sistemas digitais que utilizam o espalhamento espectral levam ao uso do CDMA [45]. Em um sistema CDMA cada usuário transmite um código específico que o identifica no sistema.

Será analisado neste trabalho o desempenho de um sistema CDMA com transmissão assíncrona, utilizando espalhamento por seqüência direta e modulação DPSK.

Os diferentes códigos são projetados de forma a serem quase-ortogonais, isto significa que a função de correlação cruzada entre os códigos $c_i(t)$ e $c_j(t)$, com $0 \leq t \leq T$, dada por

$$r_{ij}(\tau) \triangleq \int_0^T c_i(t)c_j(t-\tau)dt, \text{ com } |\tau| \leq T \quad (3.5)$$

apresenta uma energia pequena se comparada com a energia própria de cada um deles, que é dada por

$$\varepsilon_c \triangleq \int_0^T c_i^2(t)dt, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (3.6)$$

geralmente,

$$|r_{ij}(\tau)| \leq \frac{k\varepsilon_c}{\sqrt{TW}}, \quad |\tau| \leq T \text{ e } i \neq j \quad (3.7)$$

sendo para essa expressão k um fator de ordem unitária e W a largura de faixa ocupada pelas formas de onda dos códigos.

O uso simultâneo do canal por diversos usuários introduz uma degradação no desempenho do sistema, que não ocorre quando apenas um usuário utiliza o canal, fato existente nos sistemas TDMA e FDMA.

Dois problemas são de particular interesse:

1) Como os códigos não são exatamente ortogonais, ou seja, $|r_{ij}(\tau)| \neq 0$, para qualquer $i \neq j$, a recepção do código c_i sofre interferência de outros usuários no sistema. Essa interferência é chamada "ruído de correlação cruzada". Quanto mais usuários existam no sistema, pior é a qualidade do sinal código recebido.

Ao contrário do TDMA e FDMA, em que os N canais são utilizados sem a existência de interferência mútua, mas os usuários potenciais $N+1, N+2, \dots$ são bloqueados até que um canal seja liberado, os sistemas CDMA podem acomodar um usuário a mais através de uma pequena degradação na qualidade do sinal, evitando que estas chamadas sejam perdidas. O problema que surge então é, qual a quantidade de usuários que podem ser alocados simultaneamente no sistema sem que haja uma degradação excessiva do sinal, a ponto de tornar inviável a conversação, de forma que nenhuma comunicação exceda uma probabilidade de erro dada por um valor específico.

2) A maioria dos trabalhos sobre o problema 1 assumem que todos os sinais no canal, incluindo o sinal desejado chegam ao receptor com o mesmo nível de potência, cada um através de um caminho sem desvanecimento. Esse modelo é satisfatório para um sistema via satélite, com o satélite como o receptor central.

No contexto de um rede de rádio, a distribuição geográfica aleatória leva a uma recepção de diversos sinais com diferentes níveis de potência cada um com uma multiplicidade de caminhos com desvanecimento.

A interferência no código c_i causada pelo código c_j é amplificado (a) pela possibilidade de que o j -ésimo transmissor esteja mais próximo do receptor que o i -ésimo transmissor, problema do perto-distante. (b) o número de caminhos pelos quais c_j é recebido, que produz um ruído de correlação cruzada adicional, (c) o desvanecimento dos caminhos pelos quais c_i e os outros c_j 's são recebidos, pois mesmo que os transmissores c_i 's estejam mais próximos dos receptores c_i 's o sinal pode ser recebido muito mais fraco que o de algum dos transmissores de c_j 's.

A seguir será calculada a quantidade máxima de usuários possíveis de serem alocados no sistema simultaneamente, de forma a que a qualidade da transmissão ainda esteja dentro de limites aceitáveis para a transmissão de sinais de voz.

3.4.4 Número máximo de usuários permitidos

Teoricamente o sistema CDMA não estabelece um limite para a quantidade de usuários simultâneos no sistema, o que ocorre é uma degradação suave no desempenho do sistema à medida que o número de usuários aumenta. Desta forma o sistema CDMA

apresenta uma característica de limitação de número de usuários determinada pela máxima interferência admitida no sistema, e não em função do número de canais disponíveis, como acontece usualmente com os sistemas de telefonia baseados no múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA e GSM) e os baseados no acesso múltiplo por divisão de frequência (AMPS), nos quais existe uma ligação bastante forte entre o tráfego máximo admissível e o número de canais disponíveis no sistema.

Seja $d_{ij} = \pm 1, i = 0, 1, \dots, N$ uma seqüência de bits DPSK binária, modulando o sinal transmitido pelo i -ésimo transmissor, e seja o sinal desejado aquele correspondente a $i = 0$, dado por

$$s_0(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} d_{0j} c_0(t - jT) \cos [\omega_0(t - jT)];$$

em que T é o tempo de duração de um bit. Sejam os códigos c_i códigos de uma seqüência direta consistindo de M chips de valor ± 1 cada, de duração T/M . Considerando-se a origem dos tempos igual ao início da transmissão do bit d_{00} .

Os outros N usuários presentes no sistema, representam interferência no o -ésimo receptor da forma

$$n_u(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) \sum_{i=1}^N \sum_{j=-\infty}^{\infty} d_{ij} c_i(t - jT - \tau_i) \cos [\omega_0(t - jT - \tau_i) + \theta_i] . \quad (3.8)$$

Assume-se um assincronismo tanto de bit quanto da fase da portadora dos $N + 1$ usuários, ou seja, que os atrasos τ_i , se comportam como variáveis independentes, uniformemente distribuídas no intervalo $[0, T)$, e que as fases θ_i são variáveis aleatórias independentes, uniformemente distribuídas no intervalo $[0, 2\pi)$, e ainda que todos os τ_k e θ_l são independentes. Todos os transmissores são assumidos estarem operando na mesma frequência ω_0 e por questão de conveniência assume-se que $\omega_0 T = 2\pi p$, sendo p um inteiro.

Uma hipótese crítica implícita na Equação 3.8 é que todos os sinais chegam ao receptor com a mesma potência, esta hipótese será removida posteriormente neste trabalho.

Para simplicidade de cálculo, será assumido que todos os d_{ij} são independentes, com igual probabilidade de serem iguais a +1 ou -1, e que os códigos $c_i(t)$ são independentemente escolhidos a partir de um conjunto de códigos aleatórios, daí devido à distribuição uniforme de τ_k e θ_l , n_u é um processo aleatório estacionário.

Adicionalmente à interferência entre usuários, o canal apresenta um ruído aditivo branco gaussiano $n_o(t)$, de densidade de potência bilateral igual a $N_0/2$, tal que a forma de onda total recebida pelo detector DPSK é dada por

$$r(t) = S_0(t) + n_u(t) + n_o(t). \quad (3.9)$$

Assumindo-se que o detector DPSK é um filtro casado seguido de um detector DPSK, o processo de detecção da polaridade do bit d_{0j} se dará pela comparação da fase da saída do filtro em um instante $t = (j + 1)T$ com a fase no instante $t = jT$. A probabilidade de erro do receptor é dependente da relação sinal ruído da saída do filtro, como a sua saída é estacionária, pode-se calcular a sua relação sinal ruído em qualquer instante.

De agora em diante será analisada a saída do filtro x_0 no instante $t = jT$.

$$\begin{aligned} x_0(jT) &\triangleq \int_0^T c_0(\tau) \cdot \cos(\omega_0\tau) \cdot r(\tau) d\tau \\ &= \frac{1}{2}d_{00}\varepsilon_c + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=-\infty}^{\infty} d_{ij} \left[\int_0^T c_0(t - jT - \tau_i) d\tau \right] \cdot \cos[\phi_{ij}] \\ &\quad + \int_0^T c_0(\tau) \cos(\omega_0\tau) n_o(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (3.10)$$

com $\phi_{ij} = \theta_i - \omega_0\tau_i - j\omega_0T$, e a suposição de que $\omega_0T = 2\pi p$.

A variável aleatória x_0 é por definição gaussiana, pelo fato de que $n_o(\tau)$ $n_u(t)$ são definidas como gaussianas. Para se encontrar o SNR da variável x_0 deve-se localizar a sua média e variância, o que deve ser feito termo a termo.

A média e variância do terceiro termo da Equação 3.10 são 0 e $N_0\varepsilon_c/4$ respectivamente. A média do segundo termo é 0. Após algumas manipulações matemáticas encontra-se que a variância do segundo termo da equação 3.10 é dada por $\frac{NT^2}{12G_p}$ [45].

Em resumo, tem-se que x_0 é uma variável aleatória com características dadas por:

Média

$$\mu = d_{00}\varepsilon_c/2$$

Variância dada aproximadamente por

$$\sigma^2 = \left(\frac{NT^2}{12G_p} \right) + \frac{N_0\varepsilon_c}{4}$$

A partir da equação 3.6 e do fato de que $c_i(t) = \pm 1$, têm-se que $\varepsilon_c = T$, daí a variância é dada aproximadamente por

$$\sigma^2 = \left(\frac{N\varepsilon_c^2}{12G_p} \right) + \frac{N_0\varepsilon_c}{4}$$

e a relação sinal ruído é dada por

$$SNR = \frac{\mu^2}{\sigma^2} = \left[\frac{N}{3G_p} + \frac{N_0}{2\varepsilon_b} \right] \quad (3.11)$$

para a qual

$$\varepsilon_b = \int_0^T c_i^2(t) \cos^2(\omega_0 t) dt = \frac{\varepsilon_c}{2}. \quad (3.12)$$

O receptor DPSK operando em um canal somente com o ruído aditivo branco gaussiano possui uma probabilidade de erro dada por

$$Pe(n) = \frac{1}{2} e^{-\xi(n)} \quad (3.13)$$

O expoente na Equação 3.4 corresponde à metade da relação sinal-ruído dada pela Equação 3.11 quando a quantidade de usuários provocando interferência no canal é nula, ou seja, $N = 0$. Por extensão, devido à premissa assumida de que o efeito da interferência inter-usuário equivale à adição de mais ruído gaussiano ao canal, tem-se para $N > 0$ a variância total do ruído dada por

$$\sigma_I^2 = \frac{(N-1)E_b^2}{3G_p} + \frac{N_0E_b}{2} \quad (3.14)$$

e a probabilidade de erro do sistema CDMA usando a modulação DPSK e quantidade fixa de usuários dada por

$$Pe = \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{N}{3G_p} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-1}} \quad (3.15)$$

em que se define para esta equação:

N - Número de usuários no sistema;

G_p - Ganho de processamento do sistema, definido como a relação entre a taxa de transmissão do sinal em banda larga (1,228 Mchips/s) e a taxa de transmissão do sinal original (9,6 kbits/s), tendo valor nominal igual a 128;

E_b - Energia de Bit;

$N_0/2$ - Densidade espectral de potência do ruído branco gaussiano.

A partir desta expressão será feita uma análise de como a variação no número de usuários influencia na probabilidade de erro média de um sistema CDMA.

Neste trabalho será empregado inicialmente o valor nominal para o ganho de processamento, e quantidade de seqüências possíveis de serem transmitidas, de forma a se padronizar os resultados e torná-los o mais coerente com a realidade possível. Esta padronização também permitirá uma comparação da influência das diversas distribuições de probabilidade para o número de usuários existentes no sistema em um determinado instante, sendo esta influência mostrada no Capítulo 5

3.5 Probabilidade de Erro Média para um Sistema CDMA com Modulação DPSK e Número Variável de Usuários no Sistema

Deseja-se a partir de agora analisar como a variação na quantidade de usuários ativos no sistema em um determinado momento pode influenciar na probabilidade de erro média, e conseqüentemente na capacidade máxima de um sistema CDMA.

Tomando-se o valor esperado da probabilidade de erro condicional dada pela Equação 3.4, obtida através de [45], é possível se obter a probabilidade de erro média do sistema, utilizando a modulação DPSK, esta probabilidade de erro média é dada por:

$$E[Pe(n)] = E\left[\frac{1}{2}e^{-\xi(n)}\right] \quad (3.16)$$

$$E[Pe(n)] = \frac{1}{2}E[e^{-\xi(n)}] \quad (3.17)$$

$$E[Pe(n)] = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-\xi(n)} p(n) \quad (3.18)$$

Sabendo-se que o número de usuários no sistema somente apresenta valores positivos, a probabilidade de erro média torna-se

$$\overline{P_{cDPSK}} = E[Pe(n)] = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\xi(n)} p(n) \quad (3.19)$$

Esta será a equação básica para o desenvolvimento das expressões que relacionam a probabilidade de erro do sistema com o tipo de distribuição de probabilidade que represente os usuários ativos existentes no sistema, que serão utilizadas posteriormente neste trabalho.

Capítulo 4

Análise de Tráfego

Uma rede de assinantes móveis consiste de inúmeros usuários, comunicando-se através de uma ou mais estações radio-base (ERB's), que se interconectam com a rede de telefonia móvel e serve também como elo de conexão com a rede de telefonia pública comutada (RTPC).

Para qualquer sistema de comunicações multiusuário, a medida de sua utilidade econômica não é o número máximo de usuários que podem ser atendidos, mas mais precisamente o pico de carga que pode ser suportado com uma determinada qualidade de serviço e com uma disponibilidade definida pela probabilidade de bloqueio. Esta é a probabilidade de que um novo usuário encontre todos os canais ocupados e daí tenha o serviço recusado. Serviços adequados geralmente se encontram na faixa de 2% ou menos. A carga de tráfego média em termos de número médio de usuários requisitando serviços, resultando na sua probabilidade de bloqueio, é conhecida como a capacidade de Erlang do sistema.

As três principais fórmulas de bloqueio existentes, Poisson, Erlang B e Erlang-C, diferem entre si nas hipóteses básicas em relação ao comportamento de chamadas que falham ao tentar ocupar um canal de voz livre [15].

Poisson – Chamadas bloqueadas não esperam mais que o seu tempo médio de retenção. Se um canal tornar-se livre antes do tempo de retenção expirar, a chamada o ocupará e utilizará este canal na parte restante do seu tempo de serviço.

Erlang B – Todas as chamadas bloqueadas são abandonadas imediatamente. O usuário não faz outra tentativa.

Sabe-se, no entanto, que um usuário ao tentar realizar uma chamada e não conseguir, volta a tentar a conexão, gerando um tráfego artificial adicional, o qual deve ser levado em consideração no dimensionamento final do sistema como um todo. Uma forma de modelamento utilizada para levar em consideração esse tráfego adicional é através do uso da tabela de *trafirt*, que relaciona a probabilidade de ocorrência de uma nova tentativa com o percentual de congestionamento e de linha ocupada do sistema.

Erlang-C – Todas as chamadas, quer sejam bloqueadas ou não, esperam um tempo indefinido para obter um canal, formando filas infinitas.

Este tipo de modelamento não representa satisfatoriamente um sistema usual, na medida em que os sistemas atuais não possuem uma capacidade ilimitada de armazenamento de informações e ainda que a possuíssem, o simples atraso introduzido na comunicação seria suficiente para induzir o usuário a desistir da chamada. Uma forma de viabilização desses tipo de sistema seria o caso em que fosse possível a emissão de um aviso ao usuário na hora que o sistema dispusesse de um canal para escoar esta chamada. Essa facilidade encontra-se atualmente implementada, pelo menos em parte, em alguns aparelhos celulares, sendo implementada através da repetição da tentativa de chamada um número finito de vezes, assemelhando-se à existência de uma fila infinita no servidor e é empregada também em centrais PABX que armazenam a chamada, executando uma conexão posterior com o usuário desejado e emitindo o tom de campainha para os dois aparelhos.

Em sistemas de comunicação fixa, ou baseados nas técnicas de multiacesso convencionais, tais como FDMA e TDMA, os canais de tráfego são alocados para os usuários sempre que estiverem disponíveis, após a ocupação de todos os canais, todas as chamadas que chegam são bloqueadas até que algum dos canais torne-se novamente livre.

A probabilidade de bloqueio para este tipo de sistema origina-se da análise clássica feita por Erlang do comportamento de uma fila, a qual apresenta uma taxa de chegada

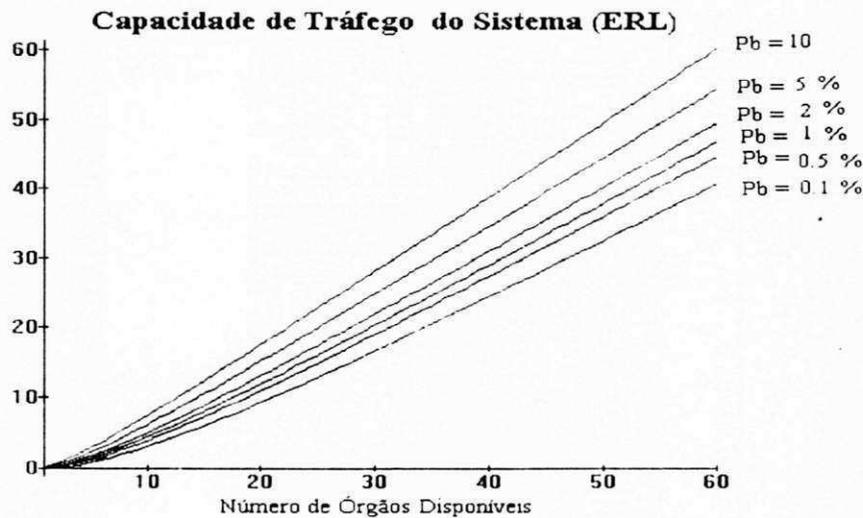


Figura 4.1: Probabilidade de Bloqueio - Erlang-B

poissoniana de 1 chamada por segundo: um tempo de serviço do tipo exponencial, com média $1/\mu$ segundos por chamada; e um número de servidores (canais) igual a N ; sendo esta quantidade o número máximo de usuários que o sistema pode atender simultaneamente sem que haja o bloqueio de nenhuma chamada.

A fórmula desenvolvida por Erlang B [31], fornece a probabilidade de bloqueio sob estas condições

$$P_{\text{Bloqueio}}(\lambda/\mu, N) = \frac{(\lambda/\mu)^N / N!}{\sum_{k=0}^N (\lambda/\mu)^k / k!}, \quad (4.1)$$

sendo λ/μ o tráfego médio oferecido em Erlangs.

O gráfico da máxima capacidade de tráfego em função da quantidade de usuários, tendo como parâmetro a probabilidade de bloqueio é mostrado na Figura 4.1

Quantidade de Canais Disponíveis por Sistema

Para o sistema AMPS convencional, com canais de 30 kHz, reuso de frequência de 7 e três setores por célula, padrão 3/21, o número de canais M em 12,5 MHz é igual a

$$M_{AMPS} = \frac{12500}{(30)(7)(3)} = 19 \text{ canais por setor.}$$

Similarmente, para um sistema do tipo TDMA, ou D-AMPS, que insere 3 usuários em uma faixa de frequência de 30 kHz, obtém-se para o número de canais em uma faixa de 1,25 MHz, $M_{D-AMPS} = 57$ canais por setor, não considerando o canal de controle, pelo fato do canal de controle não proporcionar o escoamento de tráfego no sistema.

Para um sistema GSM, reuso de frequência 7, e três setores, a quantidade de canais em uma faixa de 12,5 MHz é dada por

$$M_{GSM} = \frac{(12500)(8)}{(200)(7)(3)} = 23 \text{ canais por setor.}$$

Usando-se a fórmula de Erlang-B para a probabilidade de bloqueio, que é dada pela Equação 4.1, o tráfego máximo escoado por cada um destes sistemas, em uma faixa de 12,5 MHz, para uma perda de 2% é igual a

Sistema	Canais	Tráfego
<i>AMPS</i>	19	12,33 <i>Erl</i>
<i>D - AMPS</i>	57	46,8 <i>Erl</i>
<i>GSM</i>	23	15,8 <i>Erl</i>

Pode-se observar através destes dados que o tráfego total possível de ser escoado quando se aumenta a quantidade de canais não apresenta um aumento linear, isto deve-se ao fato de que para uma quantidade de canais maior a taxa de utilização média do canal aumenta. No caso mostrado aumentamos por um fator de três a quantidade de canais, e obteve-se um aumento de quase quatro vezes o tráfego total escoado.

Expandindo-se a análise dos sistemas de filas é possível se chegar a seis modelos que podem representar os sistemas mais frequentemente encontrados [31], dependendo das características da sua população de usuários e comportamento da fila, estes modelos são resumidos na Tabela 4.2.

<i>Comportamento da Fila</i>	<i>Fontes (População de Usuários)</i>	
	Fila Infinita	Fila Finita
Chamadas bloqueadas apagadas	Erlang-B	Engset
Chamadas bloqueadas mantidas	Poisson	Binomial
Chamadas bloqueadas atrasadas	Erlang-C	Atraso

(4.2)

Capítulo 5

Aplicações da Influência do Número de Usuários

5.1 Sistema CDMA com Quantidade Equiprovável de Usuários

Define-se como um sistema CDMA com quantidade equiprovável de usuários, como aquele que apresenta um número limitado N de usuários, e que qualquer quantidade de usuários apresente uma probabilidade de ocorrência igual. Esta probabilidade é dada pelo inverso da quantidade total de usuários no sistema.

Matematicamente a probabilidade de existência de n usuários ativos no sistema em um determinado instante é dada por

$$p(n) = \frac{1}{N}. \quad (5.1)$$

Condicionando-se a probabilidade de erro do sistema CDMA com modulação DPSK à probabilidade de ocorrência de cada uma destas quantidades de usuários, e calculando-se a esperança deste erro, pode-se obter a probabilidade de erro média do sistema.

Substituindo-se a Equação 5.1 na expressão da probabilidade de erro dada pela

Equação. 3.19 obtém-se:

$$E[Pe(n)] = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N e^{-f(n)} \frac{1}{N}, \quad (5.2)$$

para a qual

$$f(n) = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{3G_p} + \frac{1}{2SNR} \right)^{-1}. \quad (5.3)$$

Desenvolvendo-se esta expressão é possível chegar a uma fórmula para a probabilidade de erro média, sob a influência de usuários equiprováveis no sistema:

$$E[Pe(n)] = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N e^{-f(n)} \quad (5.4)$$

ou seja

$$E[Pe(n)] = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{n}{3G_p} + \frac{1}{2SNR} \right)^{-1}}$$

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram a influência do regime de alocação de usuários. Este tipo de alocação apresenta uma probabilidade constante para a ocorrência de qualquer quantidade de usuários ativos no sistema.

Pode-se notar, quando se assume uma probabilidade constante para a ocorrência de qualquer das quantidades de usuários no sistema, que para populações de usuários variando entre 5 e 60 a probabilidade de erro média é sempre inferior àquela quando se considera uma quantidade fixa de usuários no sistema.

Observa-se também que a probabilidade de erro média reduz significativamente à medida que aumenta o valor da população total de usuários, fazendo com que a isto deve-se ao fato de que quando esta quantidade aumenta a probabilidade associada a cada quantidade de usuários no sistema diminui, reduzindo assim a probabilidade de erro média do sistema.

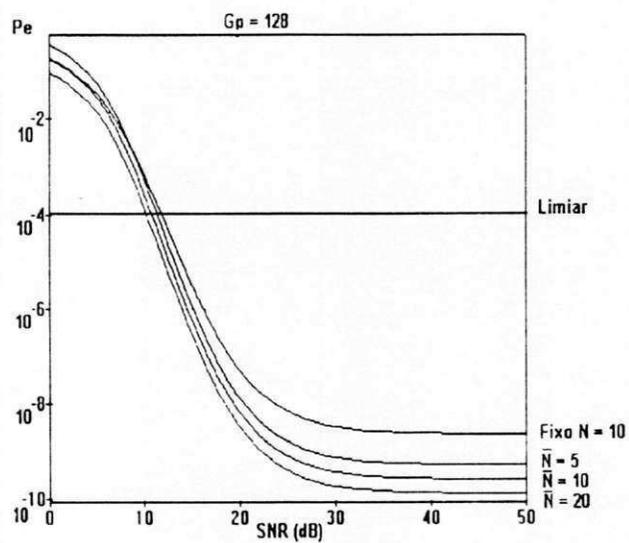


Figura 5.1: Distribuição Uniforme - $N = 10$ usuários

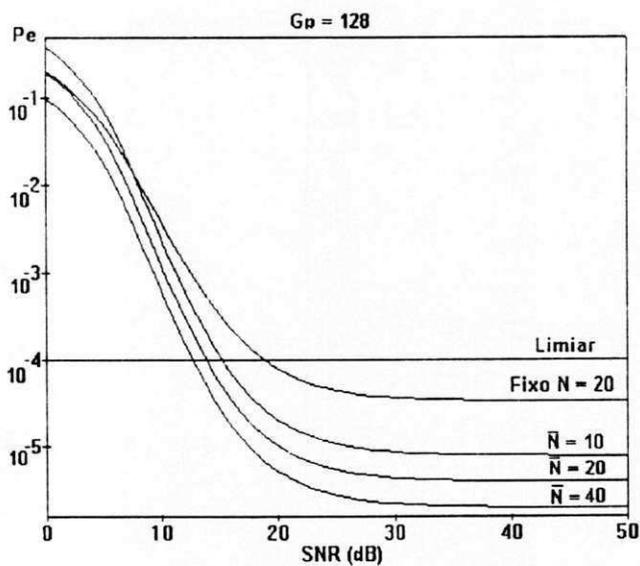
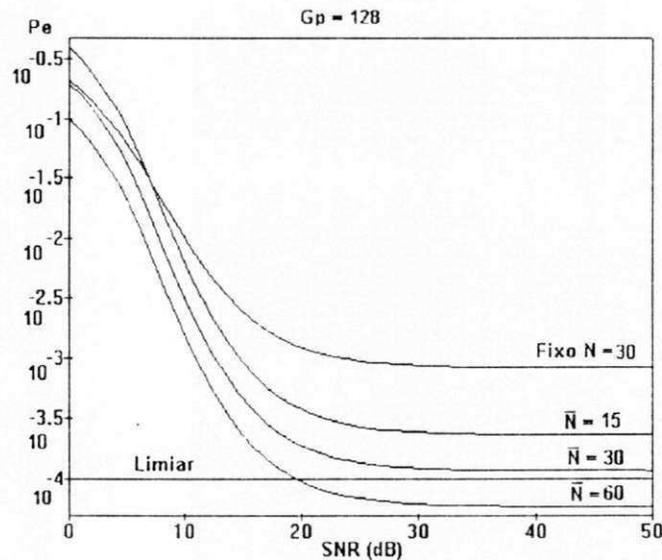


Figura 5.2: Distribuição Uniforme - $N = 20$ usuários

Figura 5.3: Distribuição Uniforme - $N = 30$ usuários

5.2 Sistema CDMA com taxas de chegada e partida de usuários constante

Conforme mostrado no apêndice D, o modelo de um sistema que apresente uma taxa constante de chegada e partida de usuários possui uma probabilidade de ocorrência associada a cada uma das quantidades de usuários, descrita conforme uma distribuição geométrica.

Um sistema que poderia se enquadrar neste tipo de modelamento, seria aquele em que os usuários não recebessem nenhuma informação sobre quantos usuários já existiam no sistema, de forma que o usuário não pudesse ser influenciado por nenhuma característica do sistema a abandonar a conversação. A implementação de um sistema deste tipo, para um sistema CDMA, seria possível caso todos os códigos empregados para prover o espalhamento dos sinais, referentes a cada um dos usuários, fossem perfeitamente ortogonais, desta forma, um aumento na quantidade de usuários em conversação no sistema não representaria um aumento na interferência total existente

no sistema, e conseqüentemente uma diminuição na sua relação sinal-ruído.

A partir do modelo de taxas fixas de conexão e desconexão ao sistema, obtém-se para a probabilidade de se encontrar o sistema com uma quantidade n de usuários em conversação, uma distribuição do tipo geométrica, a qual é dada por

$$p(x = n) = (1 - p)p^n$$

em que p é um parâmetro que determina a forma da curva de distribuição, e assume valores no intervalo $0 \leq p < 1$.

Este parâmetro p é muito importante para a distribuição geométrica, em virtude de ser ele quem determina a quantidade média de usuários presente no sistema, sendo esta quantidade média dada por

$$\bar{N} = \frac{p}{1 - p} \quad (5.5)$$

Para esta distribuição a probabilidade de erro média do sistema CDMA com modulação DPSK é dada por.

$$\overline{P_{eDPSK}} = E[Pe(n)] = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\xi(n)} p(n)$$

sendo a distribuição geométrica a ser utilizada para condicionar a probabilidade de erro.

Aplicando-se esta distribuição chega-se à seguinte expressão para o erro médio

$$\overline{P_{eDPSK}} = E[Pe(n)] = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\xi(n)} (1 - p)p^n;$$

$$\overline{P_{eDPSK}} = E[Pe(n)] = \frac{(1 - p)}{2} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\xi(n)} p^n;$$

em que

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{3G_p} + \frac{1}{2SNR} \right)^{-1}$$

Os gráficos da probabilidade de erro media em função da relação sinal ruído total do sistema estão mostradas nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6

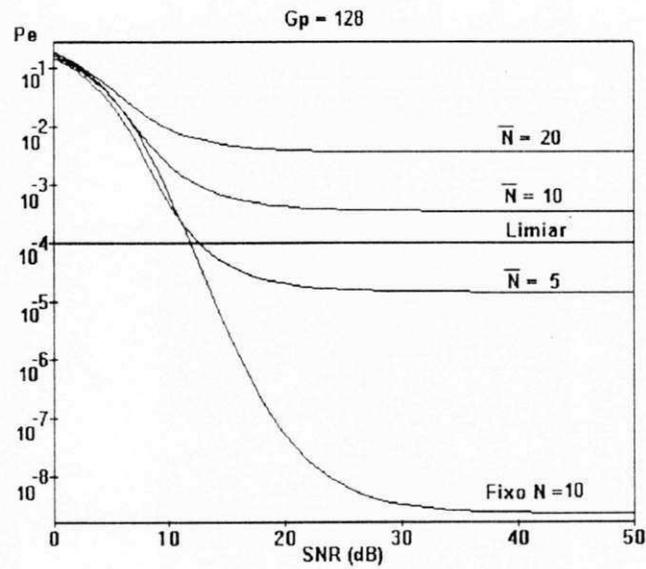


Figura 5.4: Probabilidade Geométrica - $N = 10$ usuários

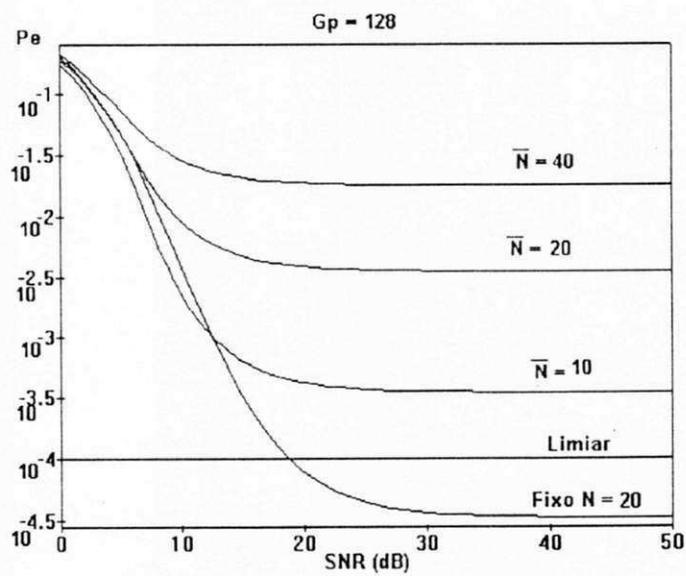


Figura 5.5: Distribuição Geométrica - $N = 20$ usuários

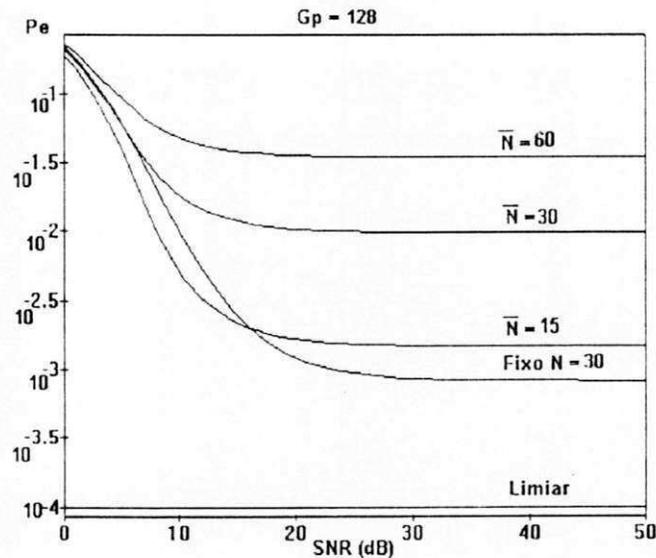


Figura 5.6: Distribuição Geométrica - $N = 30$ usuários

Para facilitar a visualização dos resultados obtidos, evitando que a necessidade de se referir a várias Figuras, as principais informações existentes nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 foram reunidas na Figura 5.7, a qual servirá para que se possa visualizar as observações que se seguem.

Observa-se através destes gráficos que a probabilidade de erro média sob a influência do número de usuários tende a estabilizar sempre acima de 10^{-4} para valores de \bar{N} entre 10 e 30.

Um aumento na relação sinal ruído para valores acima de 20 dB não representa uma redução proporcional na probabilidade de erro média do sistema sob a influência do regime de alocação de usuários.

Uma variação no número médio de usuários reflete diretamente no parâmetro p da distribuição geométrica, já que este parâmetro é quem determina a média da distribuição, conforme mostrado na Equação 5.2. Um aumento neste parâmetro implica em um espalhamento na curva envoltória da distribuição geométrica, fazendo com que os estados que representam uma quantidade maior de usuários apresentem uma probabilidade de ocorrência maior.

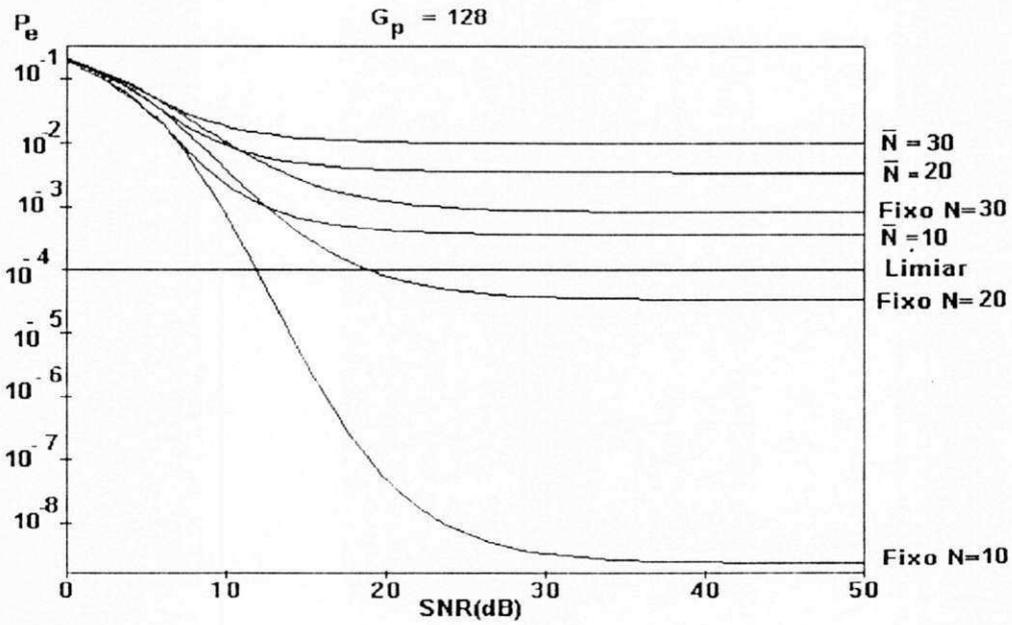


Figura 5.7: Sistema com taxa de chegada e partida constante

Em virtude deste aumento nas probabilidades referentes aos estados que representam quantidades maiores quando se considera números médios usuários mais elevados, pode-se observar que a probabilidade de erro média do sistema aumenta à medida que esta quantidade média de usuários aumenta, visto que os estados com uma quantidade maior de usuários representam uma interferência maior no sistema, contribuindo com uma parcela maior de interferência inter-usuário.

5.3 Sistema CDMA com taxas de chegada e partida de usuários desestimuladas

Em virtude dos sinais referente aos códigos utilizados para proverem o espalhamento do sinal original, em sistemas CDMA implementados na prática, não serem completamente ortogonais, a entrada de novos usuários no sistema representa uma acréscimo na interferência total existente sobre o sinal de cada um dos usuários, este aumento na

interferência tende a provocar uma sensação de desconforto ao usuário, este desconforto provocado pela degradação da qualidade de transmissão pode vir a induzir o usuário a abandonar o sistema.

Uma forma de modelar um sistema com estas características, é assumir que os usuários são desestimulados a iniciarem uma conversação, isto pode ser feito utilizando o modelo de chamadas desestimuladas descrito no apêndice D.

Desta forma obtém-se para a probabilidade de existência de n usuários ativos no sistema em um determinado instante uma distribuição poissoniana

A partir da Equação 3.19 e aplicando-se a distribuição poissoniana, dada pela Equação A.7, para a probabilidade de existência de n usuários ativos no sistema em um determinado momento, a probabilidade de erro média do sistema CDMA com modulação DPSK é dada por

$$\overline{P_{eDPSK}} = E[Pe(n)] = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\xi(n)} e^{-a} \frac{a^n}{n!}$$

$$\overline{P_{eDPSK}} = \frac{1}{2} e^{-a} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\xi(n)} \frac{a^n}{n!}$$

para a qual

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{3G_p} + \frac{1}{2SNR} \right)^{-1}$$

As probabilidades de erro médias levando em consideração o número de usuários para valores de N na faixa de 10 a 30 usuários estão mostradas nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

De forma a facilitar a visualização dos resultados obtidos, foram reunidas as principais informações contidas nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 em uma única Figura, a qual servirá para que se possa visualizar as observações a seguir.

Observa-se, para o sistema com distribuição de Poisson, que quando a quantidade média de usuários coincide com o número fixo N utilizado, a curva de probabilidade de erro sob a influência do regime de usuários tende a coincidir com a curva que assume

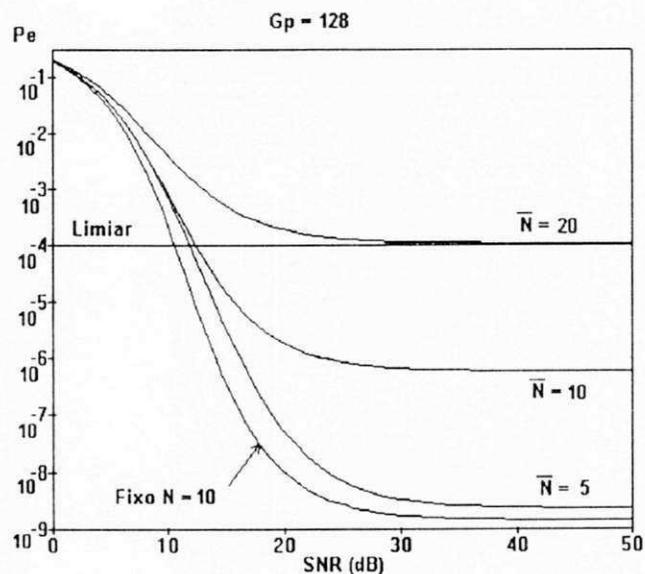


Figura 5.8: Distribuição de Poisson - $N = 10$ usuários

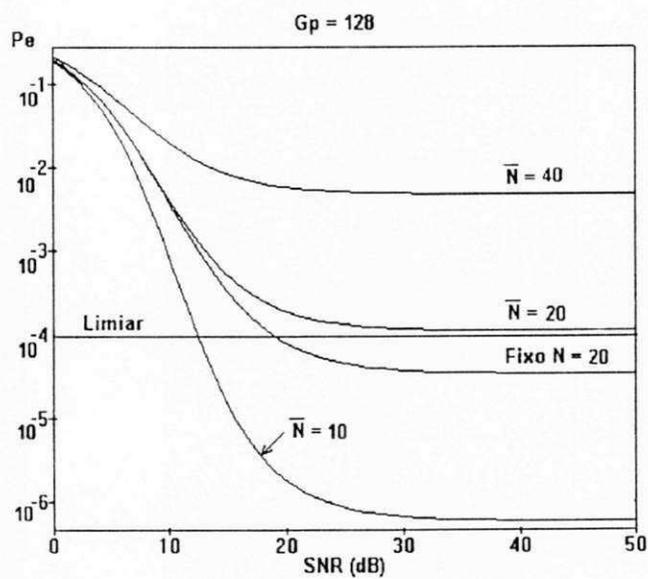


Figura 5.9: Distribuição de Poisson - $N = 20$ usuários

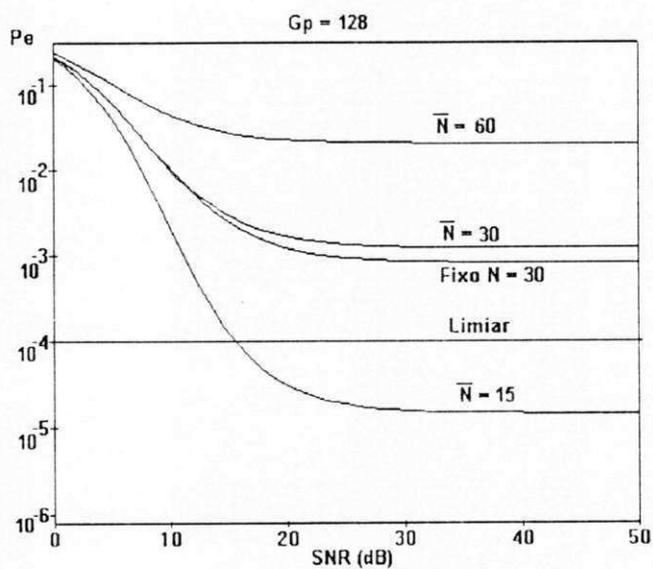


Figura 5.10: Distribuição de Poisson - $N = 30$ usuários

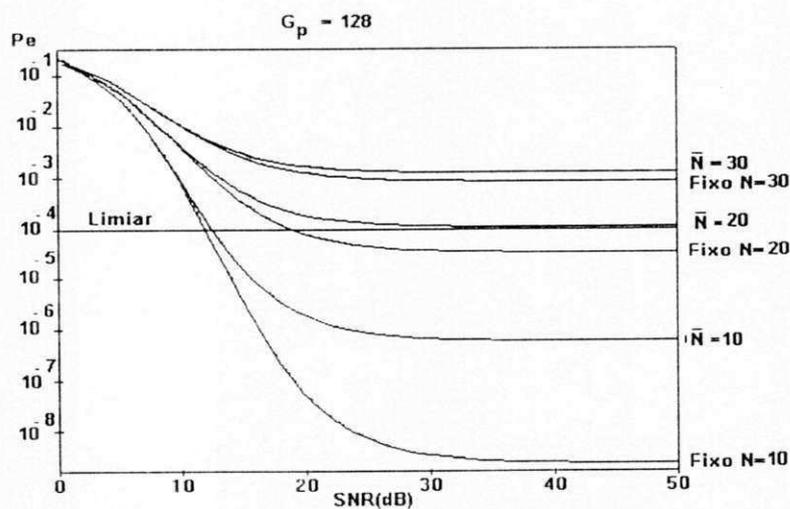


Figura 5.11: Sistema com chegadas desestimuladas

uma quantidade fixa de usuários, à medida que a quantidade de usuários ativos no sistema aumenta.

Para valores pequenos de relação sinal ruído, pode-se observar que as curvas referentes à probabilidade de erro média e à probabilidade de erro quando assumido que a quantidade de usuários é fixa tendem a coincidir.

Pode-se verificar que a probabilidade de erro média do sistema sob o regime de usuários descritos pela distribuição de Poisson tende a estabilizar em um determinado patamar, tornando-se praticamente insensível ao aumento na relação sinal-ruído, para valores acima de 30 dB.

Finalmente pode-se verificar também que é possível se obter probabilidades de erro médias menores que 10^{-4} para valores de \bar{N} abaixo de 20.

5.4 Influência do ganho de processamento

Pode-se observar através da Equação 3.15 que o ganho de processamento influencia na probabilidade de erro do sistema CDMA, na medida em que através da sua variação pode-se variar o expoente existente nesta equação, variando assim o piso de erro, visto que o ganho de processamento está sendo assumido como uma constante neste trabalho.

Um aumento no ganho de processamento implica em uma redução na probabilidade de erro média do sistema, e este artifício é empregado de forma a melhorar o desempenho de sistemas CDMA em operação comercial.

A variação do ganho de processamento ocorre através da variação na taxa de transmissão do sinal original, em que se reduz a taxa de transmissão do sinal original nos momentos de pausa, aumentando-se portanto o ganho de processamento, já que o valor numérico de G_p é dado por

$$G_p = \frac{W_{SS}}{W_B} = \frac{R_{SS}}{R_B} \quad (5.6)$$

em que

G_p - Ganho de processamento

W_{SS} - Largura de banda do sinal em espectro espalhado

W_B -Largura de banda do sinal original

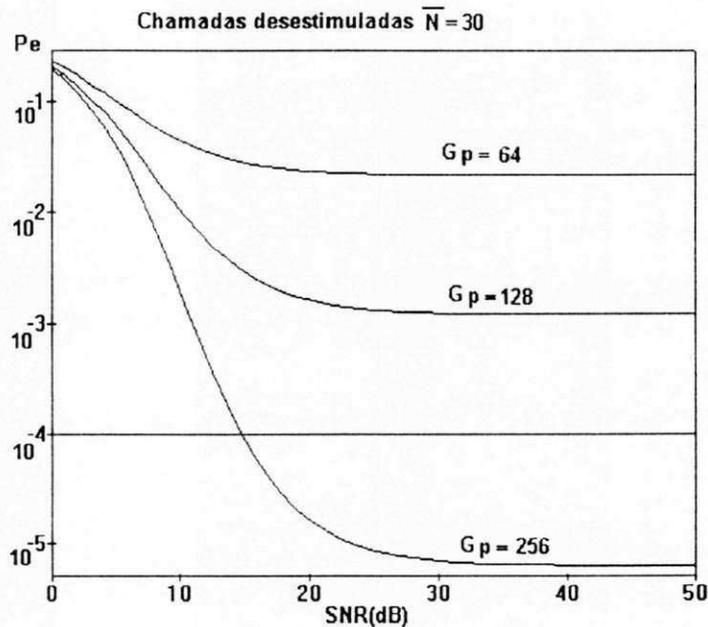


Figura 5.12: Efeito da variação do Ganho de Processamento

R_{SS} — Taxa de transmissão do sinal em espectro espalhado

R_B —Taxa de transmissão do sinal original

De forma a exemplificar o efeito desta variação no ganho de processamento, mostra-se através da Figura 5.12

Pode-se verificar que para um sistema com chamadas desestimuladas, $\bar{N} = 30$ usuários, e $G_p = 128$, o piso de erro se encontra acima do valor utilizado em sistema de comunicações para a transmissão de voz, que é de 10^{-4} , não sendo possível a utilização de sistemas com esta característica para a transmissão de voz.

Mostra-se através da Figura 5.12 que através do aumento no ganho de processamento pode-se reduzir este piso de erro, viabilizando a utilização de sistemas com esta quantidade média de usuário para a transmissão de sinais de voz, a qual não seria possível para sistemas que utilizassem o ganho de processamento fixo e igual a 128.

Capítulo 6

Conclusões

De acordo com os gráficos relativos à influência do número de usuários na probabilidade de erro média de um sistema CDMA utilizando modulação DPSK, pode-se chegar às seguintes conclusões a respeito da influência do número de usuários ativos em um determinado instante no sistema.

Inicialmente pode-se afirmar que, conforme esperado, o regime de alocação de usuários influencia na probabilidade de erro média dos sistemas CDMA, limitando a quantidade média de usuários aceitável e podendo, muitas vezes, tornar teoricamente inviável a utilização deste sistema para a transmissão de sinais de voz.

Distribuição uniforme

Num um sistema, que utilize uma distribuição uniforme para representar a probabilidade de existência de uma determinada quantidade de usuários ativos, pode-se observar, que à medida em que esta quantidade de usuários aumenta, a probabilidade de erro média diminui, encontrando-se valores para essa probabilidade sempre menores que os obtidos quando se assume uma quantidade fixa de usuários ativos no sistema. Isto deve-se ao fato de que à medida que a população de usuários aumenta, a probabilidade de ocorrência de cada estado do sistema diminui proporcionalmente.

Sistema com taxas de chegada e partida constantes

Para um sistema com taxas de chegada e partida constantes, o qual conduz a uma probabilidade de ocorrência de cada estado descrita pela distribuição Geométrica, pode-se verificar, que o sistema tende a apresentar um piso de erro acima de 10^{-4} , para

quantidades médias de usuários ativos no sistema entre 10 e 30 e ganho de processamento de 128.

Pode-se verificar também, que um aumento na relação sinal-ruído provoca pequena melhora na qualidade do sinal, para valores de SNR acima de 20 dB;

Sistema com chamadas desestimuladas

Pode-se observar, que um sistema com chamadas desestimuladas, conduz a uma probabilidade de ocorrência associada com cada estado, descrita por uma distribuição de Poisson. Este é um modelo mais apropriado para representar o sistema CDMA, em virtude da característica de que um aumento na quantidade de usuários ativos no sistema representa um aumento na interferência total existente, esta interferência resulta da não ortogonalidade dos códigos utilizados para prover o espalhamento do sinal original.

Para este tipo de sistema é possível de ser obtida uma probabilidade de erro média abaixo de 10^{-4} , para uma quantidade média de usuários abaixo de 20.

Um aumento na relação sinal-ruído, para valores acima de 30 dB, não provoca uma melhora significativa na qualidade do sinal do sistema;

Quando a quantidade média de usuários aumenta, a probabilidade de erro sob influência do regime de usuários se aproxima daquela que considera uma quantidade fixa de usuários. Este mesmo tipo de comportamento é observado quando se reduz a relação sinal-ruído.

Analisando-se os resultados obtidos e as características do sistema CDMA, pode-se concluir que entre os modelos mostrados neste trabalho, o modelo que representa um sistema com chamadas desestimuladas é o que melhor representa o sistema CDMA em operação comercial, em virtude das suas características de implementação práticas, dentre as quais, pode-se destacar o fato de que os sinais utilizados para espalhar o espectro do sinal original não são perfeitamente ortogonais. Esta não perfeição, provoca uma interferência inter-usuário que influencia na probabilidade de ocorrência de uma quantidade elevada de usuários ativos no sistema, em virtude da baixa qualidade do sinal de transmissão resultante desta interferência inter-usuários.

Efeito da variação no ganho de processamento

Pode-se observar, através da Figura 5.12, que o aumento do ganho de processamento

baixa o piso referente à probabilidade de erro média.

Este resultado mostra que a variação do ganho de processamento é uma ferramenta importante, de forma a viabilizar uma utilização de sistemas com quantidades médias de usuários maiores, para a transmissão de sinais de voz, na medida em que, através desta variação, pode-se reduzir o piso de erro médio até valores aceitáveis para a transmissão deste tipo de sinal.

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que os objetivos deste trabalho foram alcançados, na medida em que foram obtidos os resultados esperados e, conseqüentemente, o trabalho representou uma contribuição para se analisar a influência da variação do número de usuários ativos em um sistema CDMA, na probabilidade de erro, quando assumidos alguns modelos de comportamento dos usuários.

Trabalhos futuros

Propõe-se como trabalho futuro, a montagem de um ambiente computacional onde se possa simular sistemas CDMA com modulação DPSK, levando-se em consideração as características principais deste sistema, bem como os diversos modelos para representar um canal de comunicações, visando reproduzir com a maior precisão possível os sistemas implementados na prática, e, com isto, verificar a aderência dos resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos através da simulação do sistema CDMA.

Propõe-se também, como outro trabalho futuro, uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e dados de tráfego extraídos de medições feitas em centrais que utilizem sistemas CDMA, e que estejam em operação comercial atualmente. Esta comparação servirá para se verificar o comportamento do usuário do sistema, o que poderá a levar à proposição de algum outro modelo para representar a forma como os usuários chegam e partem do sistema, podendo serem definidas assim, novas distribuições de probabilidade para representar o regime de alocação de usuário em um sistema CDMA, e conseqüentemente, se chegar a novos limiares para a probabilidade de erro média em sistemas CDMA, quando se considera este regime de alocação de usuários.

Após o desenvolvimento do ambiente computacional, para a simulação do sistema CDMA e a obtenção dos dados práticos de tráfego, propõe-se também um trabalho, que consiste na comparação entre os resultados obtidos pela simulação do sistema CDMA e os dados de tráfego obtidos na prática, de forma a verificar a aderência entre estes

resultados, validando o modelo empregado.

Pretende-se também, fazer a aplicação dos modelos de regime de alocação de usuários a outros sistemas de comunicações, notadamente nos sistemas de comunicações móveis de terceira geração, tais como o CDMA2000 e o WCDMA.

Bibliografia

- [1] C. Pimentel. "Generating Series and Capacity for Constrained Sequences". *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, (2):104-107, Dezembro 1997.
- [2] M. S. Alencar. "Capacity Analysis for the Code Division Multiple Access Channel". PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo. Waterloo, Canada, December 1993.
- [3] M. S. Alencar. *Disciplina teee - comunicações móveis*, 1995.
- [4] M. S. Alencar. "The Effect of Fading on the Capacity of a CDMA Channel". In *Proceedings of the The Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - PIMRC'95*, pages 1321-1325, Toronto, Canada, September 1995.
- [5] M. S. Alencar. *Telefonia Digital*. Livros Érica Editora Ltda., 1998.
- [6] M. S. Alencar and F. M. Assis. "Use of the RAKE Receiver to Counterbalance the Effect of Fading on the Capacity of a CDMA Channel". In *Proceedings of the IEEE 46th Vehicular Technology Conference - VTC'96*, May 1996.
- [7] M. S. Alencar and I. F. Blake. "A Bound on the Capacity of a CDMA System with DPSK Modulation". In *Proceedings of the International Telecommunications Symposium - ITS'94*, pages 102-106, Rio de Janeiro, Brazil, August 1994.
- [8] M. S. Alencar and R. G. Monte. "Análise dos Parâmetros Utilizados no Sistema CDMA Comercial em Relação à Capacidade do Canal". In *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, pages 443-448, Curitiba, Brasil, Julho 1996.

- [9] M. A. R. N. Alens and M. Gerken. "Transitórios em Codificadores de Voz CELP". pages 220–224, Recife, Brasil, Setembro 1997.
- [10] R. Altieri, A. N. Barreto, and J. ao Célio Brandão. "Efeito da Setorização no Desempenho de Sistemas de Telefonia Celular CDMA". In *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, pages 437–442, Curitiba, Brasil, Julho 1996.
- [11] F. M. Assis and M. S. Alencar. "Code Division Multiple Access Using Hermitean Codes". In *Proceedings of the The Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - PIMRC'95*, pages 697–700, Toronto, Canada, September 1995.
- [12] M. N. B., H. Jack, and S. Barberis. "Erlang Capacity for an Integrated Voice/Data DS-CDMA Wireless System with Variable Bit Rate Sources". In *Proceedings of the IEEE 46th Vehicular Technology Conference - VTC'96*, pages 1078–1082, may 1996.
- [13] A. N. Barreto and J. ao Célio Brandão. "Capacidade de Tráfego em um Sistema de Telefonia Celular CDMA com Limitação de Canais e Fila de Espera". In *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, pages 455–460, Curitiba, Brasil, Julho 1996.
- [14] A. N. Barreto and J. ao Célio Brandão. "The Impact of Soft Handoff on the Downlink Capacity of Mobile CDMA Systems". pages 465–468, Recife, Brasil, Setembro 1997.
- [15] J. Bellamy. *Digital Telephony*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1991.
- [16] R. E. Blahut. *Digital Transmission of Information*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass., 1990.
- [17] I. F. Blake. *An Introduction to Applied Probability*. Robert E. Krieger Publishing Co., Malabar, Florida, 1987.

- [18] CNTr. "Básico de Telefonia Móvel Celular". Apostila, Centro Nacional de Treinamento da TELEBRAS, Brasília, Brasil, 1992.
- [19] A. S. de Almeida and J. ao Célio Brandão. "Análise do Controle de Potência no Enlace Direto de Sistemas CDMA". pages 460–464, Recife, Brasil, Setembro 1997.
- [20] D. C. de Souza and G. P. dos Santos Cavalcante. "Modelo de Trajetórias de Raios para Sistemas Móveis em Ambientes Florestais com Descontinuidade Abrupta de Relevo". In *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, pages 693–698, Curitiba, Brasil, Julho 1996.
- [21] P. W. H. et al. *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2^ª edition, 1995.
- [22] S. M. K. et al. *Spread Spectrum Communications Handbook*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.
- [23] A. A. A. Faria, C. K. d'Ávila, R. de Magalhães, and M. D. Yacoub. "Predição de Cobertura em Ambientes Indoor Utilizando Ray-Tracing Força Bruta Modificado". In *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, pages 705–710, Curitiba, Brasil, Julho 1996.
- [24] O. A. S. Filho and J. ao Marcos T. Romano. "Cancelamento de Interferência de Banda Estreita em Sistemas CDMA Utilizando Filtros Seletivos Adaptativos". pages 85–88, Recife, Brasil, Setembro 1997.
- [25] J. E. Flood. *Telecommunications Switching, Traffic and Networks*. Prentice-Hall, New York, USA, 1995.
- [26] P. Frederick, N. C. Sanches, and E. Costa. "Aplicação do Traçado de Raios no Planejamento de Sistemas Rádio Microcelulares". In *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, pages 699–704, Curitiba, Brasil, Julho 1996.

- [27] F. G., P.-B. F. J., G. A., and F. I. "Transmitted Power Control for DS/CDMA Cellular Mobile Radio Networks". In *Proceedings of the IEEE 46th Vehicular Technology Conference - VTC'96*, pages 46-50, may 1996.
- [28] GSM. *Transmission and Reception*. European Telecommunications Standards Institute, Paris, France, March 1989.
- [29] A. Hald. *Statistical Theory With Engineering Applications*.
- [30] W. Heger and W. Mohr. "Pro's and Con's of TDMA and CDMA for Digital CELLular Networks ". In *Proceedings of the IEEE 46th Vehicular Technology Conference - VTC'96*, pages 810-815, may 1996.
- [31] L. Kleinrock. *Queueing Systems*. John Wiley & Sons, New York, USA, 1975.
- [32] W. C. Y. Lee. *Mobile Cellular Telecommunications Systems*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1989.
- [33] W. C. Y. Lee. "Estimate of Channel Capacity in Rayleigh Fading Environment". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 39(3):187-189, August 1990.
- [34] W. C. Y. Lee. "Overview of Cellular CDMA". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(2):291-302, May 1991.
- [35] W. Lindgreen B. and G. W. McElrath. *Introduction to Probability and Statistics*.
- [36] H. S. Misser, C. A. F. J. Wijffels, and R. Prasad. "Throughput Analysis of CDMA with DPSK Modulation and Diversity in Indoor Rician Fading Radio Channels". *EL*, 27(7):601-603, March 1991.
- [37] A. Papoulis. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, Tokyo, 1981.
- [38] J. G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1990.

- [39] Qualcomm. *The CDMA Network Engineering Handbook*, volume 1. Qualcomm Incorporated, 10555 Sorrento Valley Road, San Diego, California, USA, November 1992.
- [40] Sebastião M. C. Gomes. *“Tráfego – Teoria e Aplicações”*. Makron/McGraw-Hill/EMBRATEL, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.
- [41] K. M. Shan and W. Hong-shen. “Adjacent Cell Interference Analysis of Reverse-Link in CDMA Cellular Radio Systems”. January 1995.
- [42] S. S. Wilks. *Mathematical Statistics*.
- [43] S. Szu-Lin and S. Shinn-Shyue. “Reverse-Link Power Control Strategies for CDMA Cellular Network”. In *Proceedings of the IEEE 46th Vehicular Technology Conference – VTC’96*, pages 461–465, may 1996.
- [44] A. S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, USA, 1989.
- [45] G. L. Turin. “The Effects of Multipath and Fading on the Performance of Direct-Sequence CDMA Systems”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2(4):597–603, July 1984.
- [46] A. J. Viterbi. *CDMA - Principles of Spread Spectrum Communication*. Addison-Wesley, 1995.
- [47] F. William. *An Introduction to Probability Theory and It’s Applications*, volume 1. 3z edition.
- [48] J. M. Wozencraft and I. M. Jacobs. *Principles of Communication Engineering*. John Wiley & Sons, New York, 1965.
- [49] T. Y.-R. Wu Chyi-Nan and C. Jin-Fu. “A Quality Birth-and-Death Queuing Model for Evaluating the Performance of an Integrated Voice/Data CDMA Cellular System”. 1995.

- [50] M. D. Yacoub. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. CRC Press, Boca Raton, USA, 1993.

Apêndice A

Análise Estocástica

A.1 Variável Aleatória

Uma variável aleatória $x(k)$ é um número real entre $-\infty$ e $+\infty$ que é associado a cada ponto k que possa ocorrer, representando qualquer evento possível de ocorrer.

A.1.1 Média de uma Variável Aleatória

A média, ou valor esperado, de uma variável aleatória X é definida matematicamente como

$$m_x = E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx; \quad (\text{A.1})$$

em que $E[.]$ representa o operador expectativa. Isto significa que a média localiza o centro de gravidade da área abaixo da curva de densidade de probabilidade da variável aleatória quando este existe. Similarmente, o valor esperado de uma função de X , $g(X)$, é definida por

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) f_x(x) dx. \quad (\text{A.2})$$

Para uma variável aleatória discreta o valor médio da variável é dada por

$$E[x] = \sum_{x=-\infty}^{\infty} x.p(x) . \quad (\text{A.3})$$

A.2 Distribuições de Probabilidade

A.2.1 Distribuição Uniforme

Supondo-se que um experimento consista da escolha aleatória de um ponto em um intervalo $[a, b]$, incluindo os extremos. Uma variável aleatória contínua $x(k)$ para este exemplo pode ser definida pelo valor numérico do ponto escolhido. A distribuição de probabilidade resultante é dada por

$$P(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases}$$

Daí a função densidade de probabilidade é dada por

$$p(x) = \begin{cases} (b-a)^{-1} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Para esta distribuição, os valores da média e variância são dados por

$$\mu_x = \frac{a+b}{2} \quad \sigma_x^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$$

Os gráficos de $p(x)$ e $P(x)$ são mostrados nas Figuras A.1 e A.2

Uma variável é tida como tendo uma distribuição de probabilidades uniforme, quando ela apresenta uma probabilidade de ocorrência de qualquer número de usuários no sistema, constante.

Esta distribuição é dada pela Equação

$$P(n = i) = 1/N, \text{ para } 1 \leq i \leq N \quad (\text{A.4})$$

À medida que o número de usuários no sistema aumenta, diminui proporcionalmente a probabilidade de cada usuário adicional estar ativo em um determinado momento.

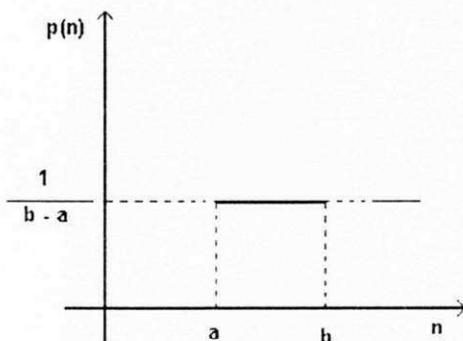


Figura A.1: Função densidade de probabilidade - Distribuição Uniforme

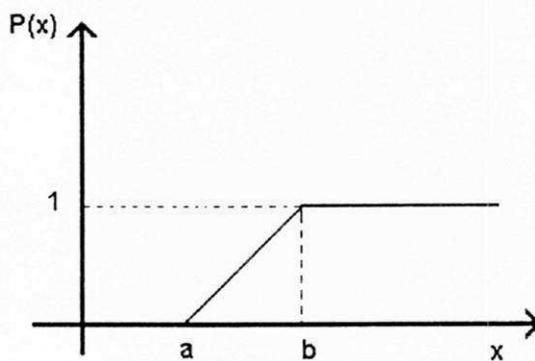


Figura A.2: Função cumulativa de probabilidade - Distribuição Uniforme

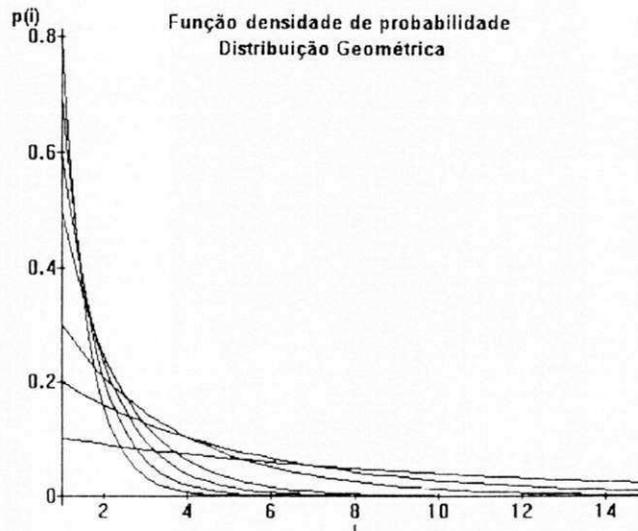


Figura A.3: Função densidade de probabilidade - Distribuição Geométrica

A.2.2 Distribuição Geométrica

Uma variável aleatória é tida como geometricamente distribuída com parâmetro $p \in (0, 1)$ quando

$$P(x = i) = (1 - p)p^{i-1} \text{ para } i \geq 1 \quad (\text{A.5})$$

A distribuição geométrica é importante na estatística e probabilidade porque ela é a distribuição do tempo de espera até que ocorra um sucesso em uma seqüência de experimentos de Bernoulli, o gráfico desta distribuição está mostrado na Figura A.3

Observa-se que quanto maior é o parâmetro p da distribuição geométrica, mais abrupta é a variação da curva com o aumento da variável i .

A.2.3 Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é uma das mais importantes distribuições existentes, posto que muitos dos processos encontrados na natureza baseiam-se nela. Devido a este fato será discutida, em linhas gerais, a sua origem.

Esta distribuição baseia-se na distribuição binomial, cuja fórmula é a seguinte

$$P(x = n) = \binom{r}{n} p^n q^{r-n} \quad (\text{A.6})$$

Ao serem feitas as considerações de que $n \rightarrow \infty$ e $np \rightarrow a$, obtém-se uma fórmula que representa a distribuição de Poisson, a qual é dada pela fórmula abaixo.

$$P(x = k) = e^{-a} \frac{a^k}{k!}, \quad (\text{A.7})$$

com $k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$

Para a obtenção desta fórmula foi utilizada a seguinte aproximação:

$$\left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \simeq e^x$$

para $n \gg |x|$.

Partindo da distribuição binomial

$$\begin{aligned} Pr(x = n) &= \binom{r}{n} p^n q^{r-n} \\ &= \frac{r!}{(r-p)!p!} p^n (1-p)^{r-n}, \text{ fazendo-se } p = a/r \\ &= \frac{r!}{(r-p)!p!} \left(\frac{a}{r}\right)^n \left(1 - \frac{a}{r}\right)^{r-n} \\ &= \frac{r!}{(r-p)!p!} \left(\frac{a}{r}\right)^n \left(1 - \frac{a}{r}\right)^r \left(1 - \frac{a}{r}\right)^{-n} \end{aligned}$$

Quando $r \rightarrow \infty$, os dois primeiros termos tendem para a unidade, o terceiro tende para e^{-a} , enquanto que o último termo permanece inalterado, obtendo-se assim a representação matemática para a distribuição de Poisson. portanto

$$Pr(x = n) = e^{-a} \frac{a^n}{n!}, \text{ com } n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

O gráfico desta distribuição tendo como variável a variável n e como parâmetro a variável a está mostrado na Figura A.4

Nota-se a partir destes gráficos que ao ser aumentado o fator a , a curva que representa a envoltória da função de Poisson, apresenta um decréscimo mais suave, mostrando que a probabilidade de ocorrência de um número maior de usuários torna-se cada vez mais provável, este parâmetro a significa para a distribuição de Poisson o valor médio da distribuição.

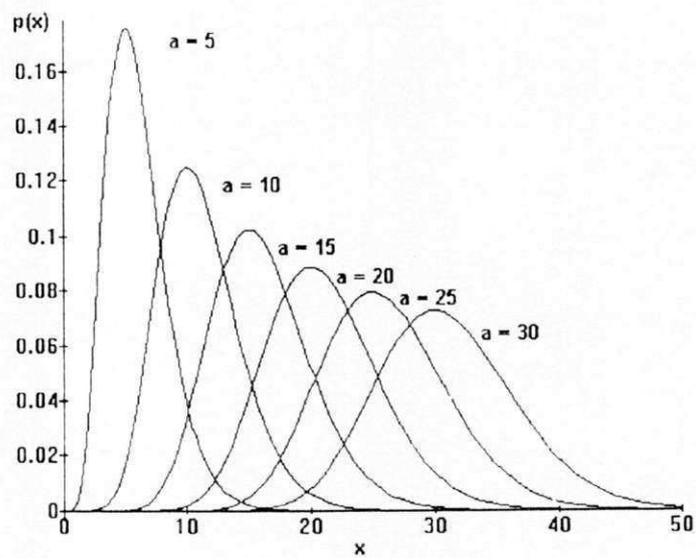


Figura A.4: Função densidade de probabilidade - Distribuição de Poisson

Apêndice B

Rendimento Espectral

Este apêndice procura demonstrar, utilizando o conceito de rendimento, a opção pelo sistema CDMA para prover os serviços de telefonia móvel celular, na medida em que o sistema apresenta uma capacidade de atendimento, como mostrado, bastante superior aos outros sistemas.

Um parâmetro importante para a comparação entre sistemas existentes é o rendimento espectral, definido como o quociente entre o máximo tráfego possível de ser escoado e o produto da área atendida e a largura de faixa ocupada por este sistema.

$$\eta = \frac{\text{Tráfego Escoado (A)}}{\text{Largura de Faixa (B) x Área (S)}} \quad (\text{B.1})$$

Tráfego Escoado O tráfego total escoado é dado por

$$A = \text{Número de Células Tráfego de Cada Célula}$$

Área Coberta A área coberta por um *cluster* do sistema AMPS depende da forma da célula e da quantidade de células por *cluster*. Para um sistema com células hexagonais e padrão 3/21 (3 Setores com 21 células) a área de cobertura é dada por

$$S = \text{Número de Células} \cdot \text{Área de cada célula}$$

Área de cada célula = $2,6 R^2$, sendo R o raio da circunferência circunscrita ao hexágono.

Sistema AMPS (Padrão 7/21) O Tráfego Escocado T é dado por

$$A = 21x[19 \text{ Canais}] = 21x12.33,$$

$$A = 258,3 \text{ Erl.} \quad (\text{B.2})$$

Área Coberta Para um *cluster* com 21 células a área total é dada por

$$S = 21x2,6x\left(\frac{0,7}{3}\right)^2 = 2,97 \text{ km}^2,$$

$$S = 2,97 \text{ km}^2. \quad (\text{B.3})$$

Rendimento Espectral O rendimento espectral do sistema AMPS, obtido a partir da Equação B.1 é igual a

$$\eta = \frac{258.3}{12,5x2,97},$$

$$\eta = 6,96 \text{ (Erl/MHz.km}^2\text{)}. \quad (\text{B.4})$$

Sistema D-AMPS (Padrão 7/21) O Tráfego Escocado T é dado por

$$A = 21x \overset{\text{Tráfego}}{[54 \text{ Canais}]} = 21x44$$

$$A = 924 \text{ Erl.} \quad (\text{B.5})$$

Área Coberta Para um *cluster* com 21 células a área total é dada por

$$S = 21x2,6x\left(\frac{0,7}{3}\right)^2 = 2,97 \text{ km}^2..$$

$$S = 2,97 \text{ km}^2. \quad (\text{B.6})$$

Rendimento Espectral O rendimento espectral do sistema D-AMPS, obtido a partir da Equação B.1 é igual a

$$\eta = \frac{924}{12,5 \times 2,97},$$

$$\eta = 24,86 \text{ (Erl/MHz.km}^2\text{)}. \quad (\text{B.7})$$

Sistema CDMA (Padrão 1/1) O Tráfego Escorado T é dado por

$$A = 1x \left[\frac{\text{Tráfego}}{9 \times 18 \text{ Canais}} \right] = 1.148,6,$$

$$A = 148,6 \text{ Erl.} \quad (\text{B.8})$$

Área Coberta Para um *cluster* com 1 célula a área total é dada por

$$S = 1,2,6.(0,2)^2,$$

$$S = 0,14 \text{ km}^2. \quad (\text{B.9})$$

Rendimento Espectral O rendimento espectral do sistema CDMA, obtido a partir da Equação B.1 é igual a

$$\eta = \frac{148,6}{12,5 \times 0,14},$$

$$\eta = 83,2 \text{ (Erl/MHz.km}^2\text{)}. \quad (\text{B.10})$$

Sistema GSM (Padrão 3/9) O Tráfego Escorado T é dado por

$$A = 9x \left[\frac{\text{Tráfego}}{7 \text{ Canais} \cdot 8} \right],$$

$$A = 412,88 \text{ Erl.} \quad (\text{B.11})$$

Área Coberta Para um *cluster* com 9 células a área total é dada por

$$S = 9 \times 2,6 \times (0,2)^2,$$

$$S = 1,27 \text{ km}^2. \quad (\text{B.12})$$

Rendimento Espectral O rendimento espectral do sistema GSM, obtido a partir da Equação B.1 é igual a

$$\eta = \frac{412,88}{12,5M, 1,27},$$

$$\eta = 26,01 \text{ (Erl/MHz.km}^2\text{)}. \quad (\text{B.13})$$

Sistema D-AMPS (Padrão 4/12) O Tráfego Escoado T é dado por

$$A = 12x \left[\overset{\text{Tráfego}}{105 \text{ Canais}} \right] = 12x90,$$

$$A = 1080 \text{ Erl}. \quad (\text{B.14})$$

Área Coberta Para um *cluster* com 12 células a área total é dada por

$$S = 12 \times 2,6 \times \left(\frac{0,7}{3} \right)^2,$$

$$S = 1,7 \text{ km}^2. \quad (\text{B.15})$$

Rendimento Espectral O rendimento espectral do sistema D-AMPS, obtido a partir da Equação B.1 é igual a

$$\eta = \frac{1080}{12,5M, 1,7},$$

$$\eta = 50,82 \text{ (Erl/MHz.km}^2\text{)}. \quad (\text{B.16})$$

Conclusões Nota-se através dos dados anteriores que o rendimento espectral de cada sistema depende da configuração utilizada. O sistema CDMA apresenta-se como uma solução que possui o maior rendimento dentre todos os sistemas, mesmo se comparado com o sistema D-AMPS com a configuração 4 ERB's e 12 células por *cluster*, padrão que ainda não está sendo utilizado comercialmente.

Apêndice C

Princípios de Espalhamento Espectral

Uma aproximação completamente diferente da utilizada atualmente para a alocação de usuários em um sistema, sugerida pelo menos em parte pelos princípios da teoria da informação de Shannon, não tenta alocar frequências ou intervalos de tempo diferentes para cada usuário. Ao invés disto esta aproximação aloca todos os recursos para todos os usuários simultâneos no sistema, controlando a potência transmitida por cada um deles, de forma a que transmitam na potência mais baixa exigida para manter um determinado nível de relação sinal-ruído para um determinado nível de desempenho.

Neste tipo de alocação cada usuário aplica um sinal ruidoso de faixa larga ocupando a largura de faixa total tanto quanto seja necessária,. desta forma cada usuário contribui para o ruído de fundo, afetando todos os outros usuários. Esta interferência adicional limita a capacidade do sistema, mas devido à alocação dos recursos de tempo e frequência não serem restringidas, a capacidade resultante continua sendo significativamente maior que para os sistemas convencionais.

Uma estimativa rápida da capacidade do enlace reverso com a utilização de sistemas de espectro espalhado é obtida pelos seguintes argumentos.

Supondo-se cada usuário apresente uma portadora em forma de ruído gaussiano de faixa larga. Para o presente propósito suponha que essas formas de onda estão armazenadas tanto no transmissor quanto no receptor e que a modulação e demodulação

são simples operações de multiplicação em banda básica, sincronizadas entre o transmissor e o receptor.

Suponha posteriormente que a potência transmitida por cada usuário é controlada de forma que todos os sinais cheguem à estação base com um nível igual de potência. Se o sinal recebido por cada usuário é P_s watts, e o ruído de fundo é desprezível, a potência de interferência total I , apresentada no demodulador de cada usuário é

$$I = (N - 1)P_s \quad (\text{C.1})$$

em que N é o número total de usuários com igual energia no sistema.

Agora supondo-se que o demodulador digital de cada usuário possa trabalhar com um ruído gaussiano a um nível E_b/I_0 de energia de bit para densidade de ruído. Este parâmetro é a Figura de mérito de um *modem* digital, e varia tipicamente entre 3 e 9 *dB*, dependendo da sua implementação, uso de códigos de correção de erros, desbalanceamentos de canal tal como desvanecimento, e obviamente, taxa de erro de bit.

A densidade de ruído recebida por cada usuário é dada por

$$I_0 = I/W \quad (\text{C.2})$$

em que W , dado em *Hz*, é a largura de faixa espalhada completa das portadoras de ruído em banda larga, cuja densidade espectral é assumida ser uniforme dentro desta faixa.

Igualmente, a energia recebida por bit é a potência do sinal recebido, dividido pela taxa R em bits por segundo, tal que

$$E_b = P_s/R \quad (\text{C.3})$$

Combinando-se C.1, C.2 e C.3, mostra-se que sob as premissas anteriores, o número de usuários simultâneos possíveis em uma célula isolada é relacionado com o fator de espalhamento e o requisito E_b/I_0 do demodulador por

$$N - 1 = \frac{I}{P_S} = \frac{W/R}{E_b/I_0}. \quad (\text{C.4})$$

Supondo-se agora que duas características de processamento sejam adicionadas de forma a diminuir a interferência. A primeira é parar a transmissão, ou pelo menos reduzir sua taxa e potência quando a voz está ausente ou reduzida. Para uma população uniforme, isto reduz a potência média do sinal de todos os usuários, e conseqüentemente a interferência recebida por cada usuário. A capacidade é portanto incrementada proporcionalmente a essa redução da taxa de transmissão.

Dado que a população seja grande o suficiente para que a lei dos grandes números garanta que a interferência esteja no seu valor médio na maior parte do tempo, será então denotado este fator por ganho de atividade de voz G_v .

Numerosos experimentos em conversações bidirecionais [39], estabelecem que a voz permanece ativa apenas em três oitavos do tempo total de conversação, então $G_v = 2,67$. Similarmente assume-se que a população de usuários é uniformemente distribuída na área de uma célula isolada, utilizando-se uma antena setorizada pode-se reduzir a interferência e daí aumentar a capacidade do sistema por um fator igual a G_a .

Deve-se observar que se os usuários forem uniformemente distribuídos em uma determinada área, isto é a definição clássica do ganho bidimensional de uma antena [32], que é a energia recebida em uma determinada direção do transmissor dividida pela energia média recebida tomada sobre um círculo. Para um antena de três setores, este fator de ganho é menor que 3 dB. Tomando-se a perda em relação ao ganho ideal como sendo de 1 dB, obtém-se $G_a \approx 2,4$.

Finalmente, para um sistema celular em que todos os usuários de todas as células utilizam a mesma alocação espectral de W Hz, deve-se calcular a interferência introduzida no demodulador de cada usuário por todos os usuários das outras células. Um argumento baseado em características geométricas e estatísticas, baseado na perda por propagação de transmissões terrestres, leva à conclusão de que para uma população uniformemente distribuída de usuários em todas as células, cada uma com a sua potência controlada por sua estação base apropriada, a interferência total dos usuários de todas as outras células é igual a aproximadamente três quintos da causada pelos

usuários de uma dada célula. Daí a capacidade dada pela Equação C.4 deve ser reduzida pelo fator

$$f + 1 = \frac{\text{Interferência de Outras Células}}{\text{Interferência de uma Dada Célula}} + 1 \approx 1,6 \quad (\text{C.5})$$

Introduzindo estes fatores de ganho de voz e antena, bem como o fator de interferência das outras células, a expressão para a capacidade do sistema resulta em

$$N \approx \frac{W/R \cdot G_v \cdot G_a}{E_b/I_0 \cdot (1 + f)} \quad (\text{C.6})$$

Com os valores de $G_v = 2,67$, $G_a = 2,4$ e $f = 0,6$, esta expressão resulta em

$$N \approx \frac{4 \cdot W/R}{E_b/I_0} \quad (\text{C.7})$$

Com sistemas de modulação bem projetados, utilizando codificação para correção de erros, diversidade de antenas e receptor RAKE para desempenhar a diversidade de multipercurso, é possível se alcançar um alto nível de desempenho, baixas taxas de erro de bit, com $E_b/I_0 = 6 \text{ db}$. Para este sistema a capacidade por célula dada pela Equação C.7 é aproximadamente

$$N \approx W/R \text{ Usuários.} \quad (\text{C.8})$$

Apêndice D

Análise de Sistemas de comunicação sob a Ótica da Teoria de Filas

Um sistema de comunicações pode ser representado através de uma cadeia de Markov, na qual cada estado representa uma quantidade de usuários ativos no sistema, e ocorre uma mudança de estado na cadeia toda vez que chega ou parte um usuário do sistema.

Após o sistema atingir o equilíbrio, cada estado da cadeia apresenta uma probabilidade de ocorrência, que depende do modelo utilizado para representar a variação na quantidade de usuários ativos, ou seja, das taxas de chegada λ'_n s e de partida μ'_n s no sistema. Estas probabilidades são obtidas através da solução geral de equilíbrio dada pelas equações mostradas abaixo.

D.0.4 Solução Geral de Equilíbrio

A fórmula que relaciona a probabilidade de existência de k usuários em um determinado momento em um sistema é dada pela solução das seguintes equações, que depende da configuração assumida para o sistema.

$$p_k = p_o \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}$$
$$p_o = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}}$$

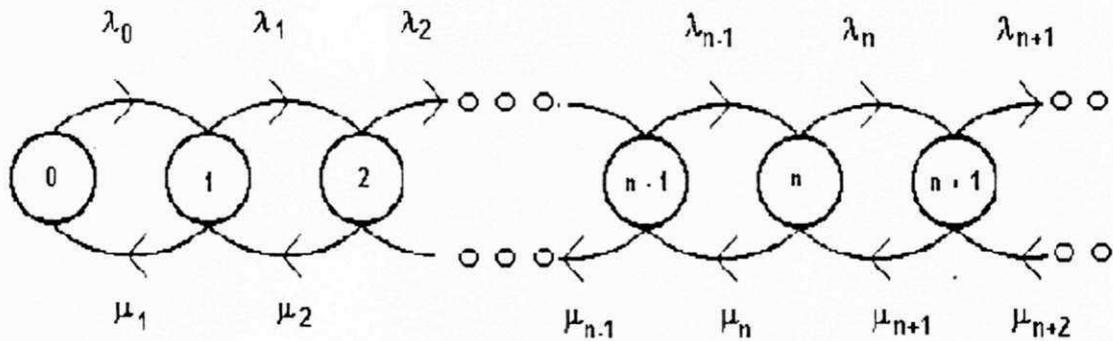


Figura D.1: Cadeia de Markov

$$\bar{N} = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot p_k$$

$$\sigma_N^2 = \sum_{k=0}^{\infty} (k - \bar{N})^2 \cdot p_k$$

$$\bar{N} = T\lambda$$

dados:

- p_0 probabilidade de não haver usuários no sistema
- p_k probabilidade de haver k usuários no sistema
- λ_i Taxa de chegada de usuários ao estado i
- μ_{i+1} Taxa de partida de usuários ao estado $i + 1$
- \bar{N} Número médio de usuários no sistema
- σ_N^2 Variância do número de usuários no sistema
- T Tempo médio de espera na fila

Estas equações servem de ponto de partida para o cálculo de diversos problemas da teoria elementar de filas e de fato é o partida para as diversas soluções que serão mostradas a seguir neste apêndice.

Será feito agora um breve resumo dos diversos modelos de distribuição de probabilidade, com as suas respectivas características, e posteriormente será mostrado um resumo em forma de uma tabela demonstrativa dos diversos parâmetros de cada sistema. Estes parâmetros foram descritos anteriormente, seguindo o mesmo princípio.

D.0.5 Sistema com perda e m servidores - Erlang-B

Tem-se agora um sistema do tipo chamadas bloqueadas apagadas, no qual existe somente m servidores disponíveis. A cada usuário novo que chegue ao sistema é atribuído um canal dedicado. No entanto, se um usuário chegar ao sistema quando todos os canais estiverem ocupados a chamada é tida como perdida. Esse tipo de sistema representa os sistemas usuais fixos e os sistemas digitais limitados pela quantidade de canais disponíveis.

Pode-se descrever os coeficientes que descrevem este sistema da seguinte forma:

$$\lambda_k = \begin{cases} \lambda & k < m \\ 0 & k > m \end{cases}$$

$$\mu_k = k\mu \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

A probabilidade de existência de k usuários no sistema é dada por [25](pag 96,97):

$$p_k = \begin{cases} p_o \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} & k \leq m \\ 0 & k > m \end{cases}$$

A probabilidade de não haver usuários no sistema é dada por:

$$p_o = \left[\sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!} \right]^{-1}$$

A probabilidade de os m servidores estarem ocupados p_m , que descreve a fração de tempo em que todos os servidores estão ocupados é dada por

$$p_m = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m / m!}{\sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!}}$$

Esta equação também é referenciada como a fórmula de Erlang B [31] e é denotada usualmente como $B(m, \lambda/\mu)$. Esta fórmula foi originalmente deduzida por Erlang em 1917 e é largamente utilizada para o cálculo do tráfego máximo possível de ser escoado por um sistema com m servidores e uma probabilidade de ocupação do canal dada por p_m . Este tipo de modelamento representa perfeitamente os sistemas que utilizam as técnicas de múltiplo acesso por divisão em frequências ou divisão em tempo, pois os sistemas deste tipo apresentam uma limitação na quantidade máxima de órgãos (canais) disponíveis.

D.0.6 Sistema com taxas constantes

Neste tipo de sistema, a taxa de chegada e saída de chamadas é constante, podendo ser descritas pelos coeficientes da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}\lambda_k &= \lambda & k = 1, 2, 3, 4, \dots \\ \mu_k &= \mu & k = 1, 2, 3, 4, \dots\end{aligned}$$

Segundo este tipo de modelamento, as probabilidades de existência de k usuários e de nenhum usuário ativos no sistema, são dadas a partir das equações para a solução geral de equilíbrio por

$$\begin{aligned}p_k &= p_o \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda}{\mu} \\ p_k &= p_o \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \\ p_o &= \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}} \\ p_o &= 1 - \frac{\lambda}{\mu}\end{aligned}$$

Com a restrição de que $\frac{\lambda}{\mu}$ tem que ser menor que 1.

Fazendo-se $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ tem-se:

$$p_k = (1 - \rho)\rho^k \text{ e } p_o = (1 - \rho)$$

O número médio de usuários no sistema pode ser descrito como o somatório do produto do número de usuários no sistema em determinado instante pela probabilidade de existência deste número de usuários no sistema, matematicamente isto pode ser representado por:

$$\bar{N} = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot p_k$$

fazendo-se algumas manipulações matemáticas e lembrando que $p_o = (1 - \rho)$, é possível se chegar a:

$$\bar{N} = \frac{\rho}{(1-\rho)}$$

A variância do número de usuários no sistema é dada por:

$$\sigma_N^2 = \sum_{k=0}^{\infty} (k - \bar{N})^2 \cdot p_k$$

$$\sigma_N^2 = \frac{\rho}{(1-\rho)^2}$$

Note-se que as quantidades descritas até agora não dependem dos parâmetros λ e μ individualmente, e sim do quociente entre eles, o qual determina a quantidade média de usuários ativos no sistema.

D.0.7 Sistema com Chegadas Desestimuladas

Considere-se um sistema no qual a chegada de chamadas tende a ser desestimulada à medida que o número de usuários aumenta no sistema.. Este é o modelamento mais adequado para um sistema CDMA, no qual à medida em que o número de usuários aumenta, a interferência inter-usuários também aumenta, desestimulando os usuários a iniciarem uma nova conversação, ou estimulando os usuários a saírem do sistema .

Uma possibilidade de modelar este sistema é atribuindo os coeficientes da seguinte forma:

$$\lambda_k = \frac{\alpha}{k+1} \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$\mu_k = \mu \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Assume-se aqui que existe um desestímulo incremental de chegadas à medida que o número de usuários no sistema aumenta.

Para este sistema tem-se:

$$p_k = p_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\alpha}{\mu_{i+1}}$$

$$p_k = p_0 \left(\frac{\alpha}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!}$$

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}}$$

$$p_0 = e^{-\frac{\alpha}{\mu}}$$

$$\rho = 1 - e^{-\frac{\alpha}{\mu}}$$

$$\bar{N} = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot p_k$$

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \frac{\alpha}{\mu} \\ T &= \frac{\bar{N}}{\lambda} \\ T &= \frac{\alpha}{\mu^2(1-e^{-\frac{\lambda}{\mu}})}\end{aligned}$$

Este tipo de sistema é equivalente a um sistema em que seja assumida uma taxa de chegada de usuários constante e uma taxa de partida de usuários proporcional ao número de usuários presentes no sistema em cada instante.

p