

Este exemplar corresponde a edição final da tese
defendida por ROGER P. F. HOEFEL
Julgada em 10 de 7 de 2000 pela Comissão
[assinatura]
Orientador

CDMA/PRMA:

UM MECANISMO DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO

PARA TRANSMISSÃO DE PACOTES

EM SISTEMAS SEM FIO DE TERCEIRA GERAÇÃO

Roger Pierre Fabris Hoefel

Tese de Doutorado

Orientador: Prof. Dr. Celso de Almeida

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Sindi Yamamoto – CPqD/USF

Prof. Dr. Walter Godoy Jr. – CEFET-Pr

Prof. Dr. Jaime Portugheis – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Renato Baldini Filho - FEEC/UNICAMP

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica
e de Computação da Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título
de Doutor em Engenharia Elétrica

Campinas, Julho de 2000

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

2000 15701

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	H671c
V.	Ex.
TOMBO BC/	42714
PROC.	16/278/00
C	☐
D	☒
PRECº	R\$ 44,00
DATA	17/10/00
N.º CPD	

CM-00147023-B

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

H671c Hoefel, Roger Pierre Fabris
CDMA/PRMA: um mecanismo de controle de acesso ao
meio para transmissão de pacotes em sistemas sem fio de
terceira geração / Roger Pierre Fabris Hoefel. --Campinas,
SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Celso de Almeida.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Multiplexação. 2. Comutação de pacotes (Transmissão
de dados). 3. Telefonia celular. 4. Sistemas de comunicação
móvel. 5. Rádio - Transmissores e transmissão -
Desvanecimento. I. Almeida, Celso de. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o de analisar, caracterizar e apresentar soluções para o excitante desafio de projetar protocolos de acesso para o transporte de pacotes multimídia no enlace reverso de sistemas celulares terrestres que empregam interface do ar do tipo TD/DS-CDMA (Time Division/Direct Sequence Code Division Multiple Access).

Os estudos relativos aos aspectos inerentes à transmissão de pacotes em sistemas TD/DS-CDMA são particularizados na análise dos protocolos CDMA/PRMA (Code Division Multiple Access/ Packet Reservation Multiple Access) e Slotted CDMA/ALOHA. CDMA/PRMA é um protocolo de múltiplo acesso híbrido, no qual se aplicam os conceitos de multiplexação no tempo, por código e de alocação de recursos por meio de reserva. O acesso controlado ao canal do protocolo CDMA/PRMA permite a redução da variação da carga instantânea do canal e, conseqüentemente, redução da interferência de múltiplo acesso em relação ao protocolo Slotted CDMA/ALOHA, onde os terminais acessam no próximo slot de tempo tão logo tenham pacotes a transmitir.

Utiliza-se simulação computacional de maneira intensiva para a obtenção de resultados concernentes ao desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e Slotted CDMA/ALOHA em distintas condições operacionais. Estes resultados são validados por análises numéricas.

Entre outros aspectos deste trabalho, destaca-se: (i) o modelo do ponto de equilíbrio proposto para os protocolos CDMA/PRMA e Slotted CDMA/ALOHA; (ii) as expressões numéricas propostas para uma análise de desempenho do protocolo CDMA/PRMA; (iii) o desenvolvimento de um simulador de rede de pacotes para a investigação dos efeitos da interferência externa nas redes de pacotes CDMA/PRMA e Slotted CDMA/ALOHA; (iv) efeitos dos parâmetros de projeto no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e Slotted CDMA/ALOHA; (v) estudo do desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e Slotted CDMA/ALOHA com tráfego de vídeo com taxa variável e tráfego de dados WWW; (vi) a investigação dos efeitos do controle de potência, do desvanecimento rápido e do desvanecimento lento no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e Slotted CDMA/ALOHA com tráfego multimídia; (vii) o projeto integrado do protocolo CDMA/PRMA com receptor de detecção conjunta descorrelacionadora.

ABSTRACT

This thesis has the objective of to analyze, to characterize and to propose solutions to the challenge of design medium access control protocols for transmission of multimedia packets over the reverse channel of land mobile cellular systems based on TD/DS-CDMA (Time Division/Direct Sequence Code Division Multiple Access) air interface.

Some inherent aspects of packet transmission over the reverse link of TD/DS-CDMA systems are particularized in the analysis of the CDMA/PRMA (Code Division Multiple Access/Packet Reservation Multiple Access) and Slotted CDMA/ALOHA protocols. The joint CDMA/PRMA protocol is a hybrid multiple-access technique that combines time-division, code-division and Reservation ALOHA concepts. The CDMA/PRMA medium access control brings to reduction of the users variance on the channel, so a larger capacity is obtained in relation to the Slotted CDMA/ALOHA protocol, where a mobile station accesses a time slot as soon as it has packets to transmit.

It is used intensely computational simulation techniques to obtain some performance results concerning to CDMA/PRMA Slotted and CDMA/ALOHA behavior over distinct operational conditions. It is utilized numerical techniques to validate some of obtained results.

It is emphasized the following aspects of this Thesis: (i) a equilibrium point analysis model for the CDMA/PRMA and Slotted CDMA/ALOHA protocols; (ii) some numerical expressions that permits to analyze the CDMA/PRMA behavior on voice-only traffic; (iii) a system level network simulator developed to assess and to compare the intercell interference effects on the CDMA/PRMA and Slotted CDMA/ALOHA protocols performance; (iv) the design parameters effects on the performance of CDMA/PRMA and Slotted CDMA/ALOHA systems; (v) some studies of CDMA/PRMA and Slotted CDMA/ALOHA behavior on mixed voice/ variable bit rate video and voice/WWW browsing traffic; (vi) some analysis of the imperfect power control effects, slow and fast fading effects on the capacity of CDMA/PRMA and Slotted CDMA/ALOHA protocols; (vii) a integrated design of CDMA/PRMA protocol and a multiuser decorrelator detector.

AGRADECIMENTOS

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro parcial desta Tese;

Ao Prof. Dr. Celso de Almeida pela orientação e confiança dispensada ao longo desta Tese;

A minha mãe e a minha esposa Edna.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Sistemas de comunicações móveis de terceira geração	1
1.2 Metodologia	2
1.3 Estrutura do trabalho	3
1.4 Principais contribuições	4
2. ANÁLISE NUMÉRICA DO PROTOCOLO CONJUNTO CDMA/PRMA	5
2.1 Introdução	5
2.2 Modelagem da atividade de voz	6
2.3 Descrição qualitativa do protocolo CDMA/PRMA para tráfego de voz	8
2.4 Parâmetros de projeto do protocolo CDMA/PRMA	10
2.5 Modelagem do canal reverso: aproximação Gaussiana padrão	12
2.6 Análise do ponto de equilíbrio do protocolo CDMA/PRMA	16
2.7 Descrição do protocolo CDMA/ALOHA para tráfego de voz	17
2.8 Validação do simulador CDMA/PRMA	18
2.8.1 Valores de equilíbrio do sistema	19
2.8.2 Taxa de perda de pacotes	21
2.9 CDMA/PRMA versus CDMA/ALOHA	28
2.10 Protocolo CDMA/FRMA	33
2.11 CDMA/PRMA versus CDMA/ALOHA: dispersão da taxa média de pacotes em torno de seu valor médio	35
2.12 Efeitos da variação do número de slots na capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA	36
2.13 Efeitos do atraso máximo permissível dos pacotes de voz na capacidade do protocolo CDMA/PRMA	37
2.14 Efeitos da determinação do número de usuários em reserva na capacidade do protocolo CDMA/PRMA	38
2.15 Protocolo CDMA/PRMA com detetor de atividade de voz de três estados	39
2.15.1 Efeitos do ganho de processamento na capacidade do sistema	42
2.15.2 Efeitos do número de slots por quadro na capacidade do sistema	43
2.15.3 Efeitos do atraso máximo dos pacotes de voz na capacidade do sistema	44

2.16 Protocolo CDMA/ALOHA com detetor de atividade de voz de três estados	45
2.16.1 Efeitos do ganho de processamento na capacidade do sistema	45
2.16.2 Efeitos do número de slots por quadro na capacidade do sistema	46
2.17 Protocolo CDMA/PRMA com detetor de atividade de voz de três estados	47
2.18 Efeitos do período de quadro no desempenho do protocolo CDMA/PRMA	47
2.19 Aproximação Gaussiana Incrementada	49
2.20 Permissões de acesso adaptativas para o protocolo CDMA/FRMA	51
2.20.1 Detetor de atividade de voz de dois estados	52
2.20.2 Detetor de atividade de voz de três estados	53
2.21 Desempenho dos protocolos CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA com códigos convolucionais e decodificador de Viterbi com decisão abrupta	54
 3. REDE DE PACOTES CELULAR CDMA/PRMA	 56
3.1 Introdução	56
3.2 Simulador de sistema para o enlace reverso de redes DS-CDMA	56
3.3 Interferência externa no enlace reverso de sistemas DS-CDMA	58
3.4 Simulador de redes CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA	64
3.5 Efeitos do expoente da perda de percurso, do sombreamento log-normal e da setorização na capacidade de sistemas CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA	67
 4. DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA EM CANAIS COM DESVANECIMENTO	 70
4.1 Introdução	70
4.2 Desempenho do protocolo CDMA/PRMA com entrelaçamento entre quadros	70
4.3 Efeitos do desvanecimento do tipo Rayleigh no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA	72
4.3.1 Desvanecimento plano em frequência: interferência modelada como uma densidade espectral de potência plana	73
4.3.2 Desvanecimento plano em frequência: interferência modelada como uma soma de variáveis aleatórias	74
4.3.3 Desvanecimento seletivo em frequência: interferência modelada como uma densidade espectral de potência plana	75
4.3.4 Desvanecimento seletivo em frequência: interferência modelada como uma soma de variáveis aleatórias	76
4.3.5 Comentários adicionais sobre desvanecimento rápido e lento	76

4.3.6 Análise de desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA	78
4.3.6.1 Canais com mesma potência em todos os percursos e número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do cana	78
4.3.6.2 Canais com potência distintas em cada percurso e número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal.....	82
4.3.6.3 Canais com potência distintas em cada percurso e número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal.....	83
 4.4 Efeitos do desvanecimento do tipo Nakagami-m e Rice no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA	84
4.5 Breves comentários sobre canais com desvanecimento Weibull	88
4.6 Não-idealidade no controle de potência.....	90
4.6.1 Interferência interna no enlace reverso modelada como uma soma de variáveis aleatórias do tipo log-normal	91
4.6.2 Interferência interna no enlace reverso modelada como uma soma de variáveis aleatórias do tipo log-normal	96
4.6.3 Interferência interna no enlace reverso modelada como uma soma de variáveis aleatórias correlacionadas do tipo log-normal	97
 5. DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA COM TRÁFEGO MULTIMÍDIA	99
5.1 Introdução	99
5.2 Modelos de tráfego de vídeo	99
5.2.1 Modelo on/off.....	99
5.2.2 Processo de Markov com taxa modulada.....	99
5.3 Modelos de tráfego de dados.....	101
5.4 Desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com tráfego misto voz/vídeo	102
5.4.1 – Taxa de Vídeo Contínua.....	103
5.4.2 – Taxa de Vídeo Variável	108
5.5 Desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com tráfego misto voz/dados	110
5.5.1 Tráfego de dados on/off	110
5.5.2 Tráfego de dados do tipo WWW.....	113
 6. CONCLUSÃO	115
6.1 Retrospectiva	115
6.2 Perspectivas de trabalhos futuros.....	118

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
ANEXO A CONFIGURAÇÕES DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA....	126
A.1 – Configuração Básica FDDGp7T _q 20N20D20	126
A.2 – Configuração Básica FDDGp7T _q 10N20D20	127
A.3 – Configuração Básica FDDGp7T _q 5N20D20	127
A.4 – Configuração Básica FDDGp7T _q 4,6N20D20	127
A.5 Configuração Básica TDDGp7T _q 20N20D40	128
A.6 Configuração Básica TDDGp7T _q 10N20D40	128
A.7 Configuração Básica TDDGp7T _q 4,6N20D40	128
A.8 Configuração Básica TDDGp16T _q 10N10D20	129
ANEXO B PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE ACESSO PARA O PROTOCOLO CDMA/PRMA	130
B.1 Introdução.....	130
B.2 Funções de acesso utilizadas no Capítulo 2.....	130
B.3 Funções de acesso utilizadas no Capítulo 3.....	135
B.4 Funções de acesso utilizadas no Capítulo 4.....	137
B.5 Funções de acesso utilizadas no Capítulo 5.....	145
APÊNDICE C CÓDIGOS BCH GERADOS POR ELEMENTOS PRIMITIVOS COM ORDEM MENOR DO QUE 2⁹.....	146
APÊNDICE D ARTIGOS PUBLICADOS.....	148
APÊNDICE E Desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com detector conjunto descorrelacionador.....	188
E.1 Introdução.....	188
E.2 Modelagem teórica	188
E.3 Desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA.....	190
E.2.1 Controle de potência imperfeito	191
E.2.2 Desvanecimento plano do tipo Nakagami-m	193
E.3 Comentários Finais.....	193

LISTA DE SÍMBOLOS

- **ACK:** ACKnowledgment
- **AWGN:** Additive White Gaussian Noise
- **ATDMA:** Advanced Time Division Multiple Access
- **APE:** Análise do Ponto de Equilíbrio
- **BCH:** Bose-Chadhuri-Hocquenghem
- **BER:** Bit Error Rate
- **BPSK:** Binary Phase-Shift Keying
- **CBR:** Continuous Bit Rate
- **CDMA/FRMA:** Code Division Multiple Access/Frame Reservation Multiple Access
- **CDMA/PRMA:** Code Division Multiple Access/Packet Reservation Multiple Access
- **CP:** Controle de Potência
- **DAV:** Detetor de Atividade de Voz
- **DS-SS:** Direct Sequence-Spread Spectrum
- **EE:** Entrelaçamento entre Quadros
- **EM:** Estação Móvel
- **ERB:** Estação Rádio Base
- **ETSI:** European Telecommunications Standardization Institute
- **FDD:** Frequency Division Duplex
- **FIFO:** First-In First-Out
- **FDP:** Função Densidade de Probabilidade
- **IMA:** Interferência de Múltiplo Acesso
- **LN:** Log-Normal
- **ITU:** International Telecommunications Union
- **MAC:** Medium Access Control
- **MAI:** Multiple Access Interference
- **MMRP:** Markov Modulated Rate Process
- **MRC:** Maximum Ratio Combiner
- **MUD-D:** MultiUser Detector Decorrelator
- **QoS:** Quality Of Service
- **RSI:** Relação Sinal-Interferência
- **RSR:** Relação Sinal-Ruído
- **SARQ:** Selective Automatic Repeat Request
- **SUD:** Single User Detector
- **TD-CDMA:** Time Division / Code Division Multiple Access
- **TDD:** Time Division Duplex
- **TDMA:** Time Division Multiple Access
- **VA:** Variável Aleatória
- **VBR:** Variable Bit Rate

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 – Máquina de estados para a modelagem do DAV: (a) detetor de dois estados, (b) detetor de três estados...	6
Figura 2.2 – Mecanismo de acesso do protocolo CDMA/PRMA [Bra96].....	9
Figura 2.3 – Função de permissão de acesso [Bra96].....	9
Figura 2.4 – Procedimento para determinar $Q_E^{(i)}$ e $Q_E^{(s)}$ nas regiões convexa e côncava de $g(x,n,t)$	15
Figura 2.5 – Modelo de terminal de voz para o protocolo CDMA/PRMA com DAV de dois estados	17
Figura 2.6 – Modelo de terminal de voz para o protocolo CDMA/ALOHA com DAV de dois estado	18
Figura 2.7 – Distribuição estacionária da ocupação de estados: (a) acesso; (b) contenção; (c) reserva; (d) carga no canal. Sistema uncelular com 358 terminais de voz. Configuração: <i>FDDGp7Tq20N20D20</i>	22
Figura 2.8 - Distribuição estacionária da ocupação de estados: (a) acesso; (b) contenção; (c) reserva; (d) carga no canal. Sistema uncelular com 775 terminais de voz. Configuração: <i>FDDGp15Tq20N20D20</i>	23
Figura 2.9 - Distribuição estacionária dos usuários por slot no estado de reserva: (a) $f=0$, $M=360$; (b) $f=0,37$, $M=216$. Configuração: <i>FDDGp7Tq20N20D20</i>	25
Figura 2.10 – Distribuição estacionária dos usuários por slot no estado de reserva: $f=0$, $M=775$; (b) $f=0,37$, $M=572$. Configuração: <i>FDDGp15Tq20N20D20</i>	25
Figura 2.11 - Perda de pacotes versus terminais de voz. Configuração: <i>FDDGp7Tq20N20D20</i>	26
Figura 2.12 - Perda de pacotes versus terminais de voz. Configuração: <i>FDDGp15Tq20N20D20</i>	27
Figura 2.13 – Taxa de perda de pacotes versus o número de conversações simultâneas para o protocolo CDMA/ALOHA. Figura parametrizada pelo ganho de processamento e pelo fator de interferência das células externas. Configurações: <i>FDDGpxTq20N20D20</i> , onde x assume 7 ou 15	28
Figura 2.14 – Distribuição estacionária da probabilidade do número de usuários por slot no canal em um sistema celular ($f=0,37$) com 572 terminais de voz: (a) CDMA/PRMA; (b) CDMA/ALOHA. Configuração: <i>FDDGp15Tq20N20D20</i> . Função de acesso do protocolo CDMA/PRMA: Tab. B.2.1	29
Figura 2.15 – Protocolo CDMA/PRMA carregado com 572 usuários em um sistema celular ($f=0,37$): (a) número de usuários no canal; (b) número de pacotes corrompidos. Configuração: <i>FDDGp15Tq20N20D20</i>	30
Figura 2.16 – Protocolo CDMA/ALOHA carregado com 572 usuários em um sistema celular ($f=0,37$): (a) número de usuários no canal; (b) número de pacotes corrompidos. Configuração: <i>FDDGp15Tq20N20D20</i>	31
Figura 2.17 - Número de terminais de voz suportado pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do ganho de processamento. Configurações: <i>FDDGpxTq20N20D20</i> , onde x assume 7, 15 ou 31	33
Figura 2.18 – Função distribuição de probabilidade da perda de pacotes para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/FRMA: (a) $M=358$, $G_p=7$, $f=0$; (b) $M=292$, $G_p=7$, $f=0$. Configuração: <i>FDDGp7Tq20N20D20</i> . Funções de acesso: Tab. 2.5	34
Figura 2.19 – Função distribuição de probabilidade da perda de pacotes, parametrizada pelo tempo de comunicação, para o protocolo CDMA/FRMA: (a) $M=1607$, $G_p=31$, $f=0$; (b) $M=1430$, $G_p=31$, $f=0$. Configuração: <i>FDDGp31Tq20N20D20</i> . Funções de acesso: Tab. B.2.2	35
Figura 2.20 – Função distribuição de probabilidade da perda de pacotes para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA: (a) $G_p=7$, $f=0$; (b) $G_p=31$, $f=0$. Tempo de comunicação de 180 segundos. Configurações: <i>FDDGpxTq20N20D20</i> , onde x assume 7 ou 31. Funções de acesso: Tab. 2.5 e Tab. B.2.2	35
Figura 2.21 – Número de terminais de voz suportados pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do número de slots por quadro: (a) $G_p=7$, $f=0$; (b) $G_p=31$, $f=0$; (c) $G_p=15$, $f=0$; (d) $G_p=15$, $f=0,749$. Configurações: <i>FDDGpxTq20NyDy</i> , onde x assume os valores de 7, 15 ou 31, sendo que y pode valer 1, 5, 10, 16 ou 20 slots	37
Figura 2.22 – Número de terminais suportados pelo protocolos CDMA/PRMA em função do atraso máximo permitido dos pacotes de voz para uma perda de pacotes de 1 %: (a) $G_p=7$, $f=0$; (b) $G_p=31$, $f=0$. Configurações: <i>FDDGpxTq20NyDz</i> , onde x assume os valores de 7 ou 31; y pode valer 10 ou 20 slots; z assume 10, 15, 20, 30 ou 60 slots.....	38

Figura 2.23 – Modelo de terminal de voz para o protocolo CDMA/PRMA com DAV de três estados	40
Figura 2.24 – Número de terminais de voz suportado pelo protocolo CDMA/PRMA ($P_{\text{perda}}=1\%$), como função do atraso máximo permitido e do número de slots por quadro. Sistema unicelulares com DAV de três estados	44
Figura 2.25 – Função distribuição de probabilidade da perda de pacotes para os protocolos CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA: Perda média de pacotes de aproximadamente 1%.....	47
Figura 2.26 – Taxa de erro de bit obtida pela AGP e AGI	50
Figura 2.27 – Número de usuários de voz suportados pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função de E_b/N_0 . Configuração: <i>FDDGp7 Tq20N20D20</i>	50
Figura 2.28 – Capacidade do sistema CDMA/FRMA celular ($f=0,37$) com DAV de dois e três estados. PAC otimizada para perda de pacotes de 1% (conforme Tab. B.2.5). PAA otimizada de acordo com o número instantâneo de usuários presentes no sistema. Configuração: <i>FDD Gp15 Tq20N20D20</i>	53

Capítulo 3

Figura 3.1 – Cálculo da interferência externa no enlace reverso.....	58
Figura 3.2a – Diagrama de radiação idealizado para células com setores de 120°	58
Figura 3.2b – Diagrama de radiação típico para células com setores de 120°	58
Figura 3.3 – Ilustração das regiões S_0 e $\bar{S}_0$ para $N_c=1, 2, 3, 4$ e 9	60
Figura 3.4a – Histograma da interferência externa na célula central: 10 usuários por célula ($N_c=9, \Gamma=4, \sigma_{dB}=8$)	62
Figura 3.4b – Histograma da interferência externa na célula central: 10 usuários por célula ($N_c=4, \Gamma=4, \sigma_{dB}=8$)	62
Figura 3.5 – Taxa de perda de pacotes em função do número de terminais de voz para o protocolo CDMA/ALOHA com detetores de atividade de voz de dois estados. Configuração: <i>FDDGp7Tq20N20D20</i>	65
Figura 3.6 – Taxa de perda de pacotes em função do número de terminais de voz para o protocolo CDMA/PRMA com detetores de atividade de voz de dois estados. Configuração: <i>FDDGp7Tq20N20D20</i>	65
Figura 3.7 - Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do expoente da perda de percurso em um ambiente sem somreamento log-normal. Funções de acesso: Tab. B.3.3a, b ou c	69
Figura 3.8 - Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do desvio padrão do somreamento em um ambiente com $\Gamma=3$. Funções de acesso: Tab. B.3.3a	69
Figura 3.9 - Capacidade dos sistemas CDMA/ PRMA e CDMA/ALOHA em função do desvio padrão do somreamento em um ambiente com $\Gamma=4$. Funções de acesso: Tab. B.3.3b.....	69
Figura 3.10 - Capacidade dos sistemas CDMA/ PRMA e CDMA/ALOHA em função do desvio padrão do somreamento em um ambiente com $\Gamma=5$. Funções de acesso: Tab. B.3.3c.....	69

Capítulo 4

Figura 4.1 – Taxa de perda de pacotes de voz para o sistema CDMA/PRMA unicelular em canais AWGN e com desvanecimento Rayleigh rápido. Configuração: <i>TDDGp16Tq10N10D20</i> . Funções de acesso: Tab. B.4.2a	79
Figura 4.2 - Efeito do EE na capacidade do sistema CDMA/PRMA celular ($\Gamma=4, \sigma_{dB}=8$) com desvanecimento Rayleigh lento. Configuração: <i>TDDGp16Tq10N10D20</i> . Funções de acesso: Tab. B.4.3.....	81
Figura 4.3 – Resposta impulsiva do modelo de canal ATDMA para microcélulas	82
Figura 4.4 – Desempenho dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA unicelulares em um canal com desvanecimento Rayleigh lento com perfil de potência dado pelo modelo de canal ATDMA. Configuração: <i>TDDGp16Tq10N10D20</i> com EE de quadros). Funções de acesso: Tab. B.4.4.....	83
Figura 4.5 – Efeito na capacidade do protocolo CDMA/PRMA do descasamento da número de ramos do receptor RAKE com a diversidade do canal ATDMA com desvanecimento Rayleigh lento.Funções de acesso: Tab. B.4.4b....	83
Figura 4.6 – FDP da VA Nakagami-m para distintos valores de m ($\Omega=1$).....	84

Figura 4.7 - Efeitos do desvanecimento Nakagami-m, para distintos valores da figura de desvanecimento m, na capacidade do sistema CDMA/PRMA unicolor. Canal com seis percursos com mesma potência média. Receptor Rake casado com a diversidade do canal.....	86
Figura 4.8 – Resposta impulsiva do canal ATDMA para pico-células	87
Figura 4.9 – FDP da VA Weibull para distintos valores de s, com $\sigma = r/\sqrt{2}$	89
Figura 4.10 - Taxa média da perda de pacotes para o protocolo CDMA/PRMA. Canal com desvanecimento plano rápido do tipo Weibull. Sistema unicolor. Funções de acesso: Tab. 2.5.....	90
Figura 4.11 - Taxa média da perda de pacotes para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Canal com desvanecimento plano rápido do tipo Weibull. Sistema unicolor. Funções de acesso: Tab. B.4.8	90
Figura 4.12 – Efeitos do CP imperfeito na capacidade de um sistema CDMA/PRMA unicolor	93
Figura 4.13 – Efeito do CP imperfeito na capacidade de um sistema CDMA/ALOHA unicolor	93
Figura 4.14 – Efeitos da correlação na potência recebida na capacidade do protocolo CDMA/PRMA: (a) $\sigma_{pc}=1$ dB; (b) $\sigma_{pc}=2$ dB. Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20. Funções de acesso: Tab. B.4.13	98

Capítulo 5

Figura 5.1 – Máquina de estados e matriz de transição de estados da taxa de transmissão para o modelo MMRP da fonte de vídeo	100
Figura 5.2 – Capacidade do protocolo CDMA/PRMA com tráfego misto voz/vídeo CBR (144 kbps) em um sistema unicolor. Resultados parametrizados pelo desvio padrão do CP. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20 sem EE. Função de permissão de acesso otimizada para perda de pacotes de 1% em um canal com CP perfeito	104
Figura 5.3 – Capacidade do protocolo CDMA/PRMA com tráfego misto voz/vídeo CBR em um sistema celular com $f=0,37$. Configuração: FDDGp7T _q 20 N20D20. Função de acesso: Tab. B.2.1	105
Figura 5.4 – Estrutura de quadro de um sistema TDD simétrico (número de slots do enlace direto é igual ao número de slots do enlace reverso): (a) único ponto de chaveamento; (b) múltiplos pontos de chaveamento [ERC98, p. 81].....	107
Figura 5.5 – Desempenho do protocolo CDMA/PRMA para tráfego misto voz/dados ON/OFF. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20 sem EE, $B_d=200$ pacotes. DAV de dois estados. Função de acesso otimizada para $\sigma_{cp}=0$ dB e perda de pacotes de 1 % (Tab. 2.4). A constante c_p é igual a 0,2	112
Figura 5.6 – Desempenho do protocolo CDMA/PRMA para tráfego misto voz/dados ON/OFF. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20 sem EE, $B_d=200$ pacotes	112
Figura 5.7 – Comparação entre dois métodos para determinação das permissões de acesso para as EM de dados no protocolo CDMA/PRMA. Tráfego misto voz/dados ON/OFF. Configuração: vide Fig. 5.5.....	112
Figura 5.8 – Desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA para tráfego misto voz/WWW em um canal AWGN. Detetores de atividade de voz de dois estados.....	114

ANEXO E

Figura E.1 - BER versus E_b/N_0 para K usuários no canal em um sistema sem codificação. Resultados parametrizados pelo tipo de receptor, modelo de canal (síncrono ou assíncrono), CP (perfeito ou $\sigma_{pc}=2$ dB). Ganho de processamento (G_p) igual a 31.....	191
Figura E.2 – Efeitos das imprecisões do CP no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA equipados com MUD-D. Sistema unicolor com $E_b/N_0=10$ dB. Configuração: $G_p=16$; $T_f=10$ ms; $N_{slots}=10$ slots; $D=20$ slots; BCH(255,115,21)	192
Figura E.3 – Distribuição estacionária de probabilidade da carga do canal para o sistema CDMA/ALOHA com 210 EMs de voz	192
Figura E.4 – Efeitos de E_b/N_0 no desempenho do protocolo CDMA/PRMA. CP imperfeito com $\sigma_{cp}=2,5$ dB. Configuração: MUD-D (vide Fig. 6.2)	192
Figura E.5 – Capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em um canal com desvanecimento plano Nakagami-m. Configuração: MUD-D (vide Fig. 6.2).....	193

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1: Requerimentos de serviços para os sistemas IMT-2000 [Oja98, p. 72]	2
---	---

Capítulo 2

Tabela 2.1 — Parâmetros dos detectores de atividade de voz de dois e de três estados. Valores obtidos a partir de dados estatísticos de conversações telefônicas em língua inglesa.....	8
Tabela 2.2 - Parâmetros de projeto do protocolo CDMA/PRMA [Bra96].....	12
Tabela 2.3 – Probabilidade média de sucesso na transmissão de pacotes ($G_p=7$, $n=511$, $t=38$).....	14
Tabela 2.4 - Número de usuários suportado pelo protocolo CDMA/PRMA como função da perda de pacotes máxima admitida, do número ótimo de usuários por slot (vide Eq. 2.10) e do fator de interferência das células externas (vide Eq. 2.19). Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20	19
Tabela 2.5 - - Parâmetros da função de acesso otimizada para que o sistema CDMA/PRMA apresente uma perda de pacotes média 1 e 0,1 % ($p_n=0,3$). M_{om} é a capacidade do protocolo CDMA/PRMA quando as probabilidades de permissão de acesso são obtida pelo critério a posteriori (Eq. 2.9). Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20	20
Tabela 2.6 - Comparação dos valores de equilíbrio obtidos utilizando-se APE e simulação. Função de permissão de acesso otimizada para perda de pacotes de 1%, mostrada na Tab. 2.5. Entre parênteses são indicados os resultados obtidos ao se postular que os terminais de voz sempre obtém uma reserva em todos os período de atividade de voz. Perda de pacotes obtida via simulação. Perda de pacotes obtida via simulação. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20.....	20
Tabela 2.7 - Comparação dos valores de equilíbrio obtidos utilizando-se APE e simulação. Função de permissão de acesso otimizada para uma perda de pacotes de 0,1%, mostrada na Tab. 2.5. Entre parênteses são indicados os resultados obtidos ao se postular que os terminais de voz sempre obtém uma reserva em todos os período de atividade de voz. Perda de pacotes obtida via simulação Perda de pacotes obtida via simulação. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20.....	21
Tabela 2.8 - Comparação dos valores de equilíbrio obtidos utilizando-se APE e simulação. Função de permissão de acesso otimizada para perda de pacotes de 1,0 %. Configuração: FDDGp15T _q 20N20D20 (vide anexo A).....	21
Tabela 2.9 - Comparação entre os valores de equilíbrio obtidos utilizando-se APE e simulação para o protocolo CDMA/ALOHA. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20.....	29
Tabela 2.10a – Comparação da capacidade obtida pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20. Funções de acesso: Tab. 2.5.....	31
Tabela 2.10b – Comparação da capacidade obtida pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Configuração: FDDGp15T _q 20N20D20. Funções de acesso: Tab. B.2.1	31
Tabela 2.10c – Comparação da capacidade obtida pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Configuração: FDDGp31T _q 20N20D20. Funções de acesso: Tab. B.2.2	32
Tabela 2.11a – Perda de capacidade devido à interferência externa: $f=0,37$. Configurações: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x assume 7, 15 ou 31	32
Tabela 2.11b – Perda de capacidade devido à interferência externa: $f=0,749$. Configurações: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x assume 7, 15 ou 31	32
Tabela 2.12 – Detalhamento das componentes da taxa de pacotes descartados nos protocolos CDMA/PRMA (1ª linha) e CDMA/FRMA (2ª linha). Configurações: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x assume 7 e 31. Funções de acesso: Tab. 2.5 e Tab. B.2.2	34
Tabela 2.13 –Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA como função do número de slots por quadro, ganho de processamento e fator de interferência das células	

vizinhas. Função de acesso otimizada para perda de pacotes de 1%. Configurações: FDDGpxT _q 20NyDy, onde x assume os valores de 7, 15 ou 31, sendo que y pode valer 4, 10, 16 ou 20.....	37
Tabela 2.14 – Efeitos da determinação do número de usuários em reserva na capacidade do protocolo CDMA/PRMA. Análise parametrizada pelo percentual máximo de pacotes perdidos e pelo ganho de processamento. Configuração: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x assume 7 ou 15.....	39
Tabela 2.15 - Valores de equilíbrio obtidos via simulação e pela APE. Função de permissão de acesso otimizada para perda de pacotes de 1% em sistemas CDMA/PRMA com detetor de três estados. Perda de pacotes obtida via simulação.....	40
Tabela 2.15a - Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20	40
Tabela 2.15b - Configuração: FDDGp15T _q 20N20D20	41
Tabela 2.15c - Configuração: FDDGp31T _q 20N20D20	41
Tabela 2.16 – Resultados numéricos e estimados via simulação para a taxa de pacotes corrompidos e descartados. Função de acesso otimizada para uma perda de pacotes de 1% com DAV de três estados. Funções de acesso: Tab. B.2.5.....	42
Tabela 2.16a - Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20	42
Tabela 2.16b - Configuração: FDDGp15T _q 20N20D20	42
Tabela 2.16c - Configuração: FDDGp31T _q 20N20D20	42
Tabela 2.17 – Ganho de capacidade devido ao uso de DAV de três estados no protocolo CDMA/PRMA. Taxa de perda de pacotes de ~1%. Configuração: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x pode assumir 7, 15 ou 31.....	43
Tabela 2.17a - Permissões de acesso obtidas pelo critério a posteriori.....	43
Tabela 2.17b - Permissões de acesso obtidas via função de acesso, Tab. B.2.5.....	43
Tabela 2.18 – Perda de capacidade devido a interferência externa nos sistemas CDMA/PRMA com DAV de três estados.....	43
Tabela 2.19 – Capacidade do sistema CDMA/PRMA unicolor, estimada via simulação (primeira linha) e numericamente calculada (segunda linha), para uma taxa média de perda de pacotes de ~1%. Valores parametrizados pelo ganho de processamento, pelo número de slots por quadro e pelo tipo de detetor de atividade de voz. Configuração: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x pode valer 7 ou 15; y pode assumir 4, 10, 16 ou 20 slots. Funções de acesso: Tab. B.2.6.....	44
Tabela 2.20 – Ganho de capacidade pelo uso de detetor de três estados em sistemas CDMA/ALOHA. Análise parametrizada pelo ganho de processamento e pelo fator de interferência das células vizinhas. Configurações: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x pode assumir 7, 15 ou 31	45
Tabela 2.21 – Perda de capacidade devido a interferência externa em sistemas CDMA/ALOHA com DAV de três estados. Configurações: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x pode assumir 7, 15 ou 31	45
Tabela 2.22 – Ganho de capacidade do sistema CDMA/PRMA em relação ao sistema CDMA/ ALOHA. Sistemas com DAV de três estados. Configurações: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x pode assumir 7, 15 ou 31.....	46
Tabela 2.23 – Ganho de capacidade pelo uso de DAV de três estados no protocolo CDMA/ALOHA. Análise parametrizada pelo número de slots por quadro e pelo ganho de processamento.....	46
Tabela 2.24 – Ganho de capacidade do sistema CDMA/PRMA em relação ao sistema CDMA/ ALOHA. Sistemas unicolors com DAV de três estados. Análise parametrizada pelo ganho de processamento e pelo número de slots por quadro.....	46
Tabela 2.25 – Códigos BCH oriundos do processo de otimização pelo limitante de Gilbert e Varsharmov.....	48
Tabela 2.26 – Resultados estimados via simulação (primeira linha) e numericamente calculados (segunda linha) para a taxa média de pacotes corrompidos e descartados. Função de acesso, Tab. B.2.8, otimizada para uma perda de pacotes de 1%.....	48
Tabela 2.26a – Atraso máximo de um período de quadro. Configuração: FDDGp7T _q xN20D20, onde x assume 4,615, 10 ou 20 ms.....	48
Tabela 2.26b – Atraso máximo de 20 ms. Configuração: FDDGp7T _q xN20Dy, onde x assume 4,615 ou 10 ms; y assume 87 slots para T _q = 4,615ms; 40 slots para T _q = 10 ms	49

Tabela 2.27 – Valor mínimo do ganho de processamento para um único usuário inteterferente.....	50
Tabela 2.28 – Número de usuários suportado pelo protocolo CDMA/PRMA ao utilizar a AGP e a AGI. Função de acesso: Tab. B.2.9	50
Tabela 2.29 – Capacidade do protocolo CDMA/FRMA com PAA. Configuração: FDDGp15T _q 20Nx _{Dy}	53
Tabela 2.29a – Capacidade em função da interferência externa e da perda de pacotes. N=D=20	53
Tabela 2.29b – Capacidade em função do número de slots por quadro e do atraso máximo permitido. Sistema uncelular. P _{loss} =1%	53
Tabela 2.30 – Capacidade do sistema CDMA/FRMA uncelular, otimizado para perda de pacotes de 1% (primeira linha) 0,1 % (segunda linha), para uma taxa média de perda de pacotes de ~1%. Configuração: FDDGpxT _q 20N20D20, onde x pode valer 7 ou 15; y pode assumir 10 ou 20 slots	53

Tabela 2.31- Capacidade dos protocolos CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA para perda de pacotes de 0,1% (1ª linha) e 1% (2ª linha). Sistemas com DAV de dois estados. Para cada configuração de parâmetros, utiliza-se o limitante superior da perda de pacotes fornecido por (2.70) e, entre parêntesis, (2.69). Configuração FDDGpxT _q 10N10D20, onde x assume 12 e 18 ao se utilizar o código convolucional do enlace reverso e direto, respectivamente, da norma IS-95. O valor de k _{or} (eq. 2.60) empregado é: (i) 16 (P _{perda} =0,1%) e 18 (P _{perda} =0,1%) ao se utilizar a Eq. (2.65) no código da IS-95 do enlace direto; (ii) 14 (P _{perda} =0,1%) e 16 (P _{perda} =0,1%) ao se utilizar a Eq. (2.68) no código da IS-95 do enlace direto; (iii) 17 (P _{perda} =0,1%) e 20 (P _{perda} =0,1%) ao se utilizar a Eq. (2.65) no código da IS-95 do enlace reverso; (iv) 15 (P _{perda} =0,1%) e 17 (P _{perda} =0,1%) ao se utilizar a Eq. (2.68) no código da IS-95 do enlace reverso.....	55
---	----

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Valores da média e do desvio padrão da interferência externa normalizados pelo número de usuários por célula. Dados parametrizados pelo número de ERBs e pelo coeficiente da perda de percurso. σ _{dB} =0	59
Tabela 3.1a - Células hexagonais.....	59
Tabela 3.1b – Células circulares com raio $R_c = \sqrt{3}R_h / 2$	59
Tabela 3.1c – Células circulares com raio $R_c = R_h$	60
Tabela 3.2 – Valores da média e do desvio padrão da interferência externa normalizados pelo número de usuários por célula. Valores parametrizados pelo número de estações radio base habilitadas para controlar as estação rádio móveis e pelo desvio padrão do sombreamento. Células hexagonais: Γ=4, N _{ERB} =19	61
Tabela 3.3 – Discriminação das componentes da potência interferente. Células hexagonais: Γ=4, N _{ERB} =19	61
Tabela 3.4 – Média e desvio padrão da interferência externa. Valores normalizados pelo número de usuários por células. Células hexagonais: Γ=4, N _{ERB} =19	62
Tabela 3.5 – Valores da média e do desvio padrão da interferência externa normalizados pelo número de usuários por célula. Células hexagonais	63
Tabela 3.6 - Valores da média e variância da interferência externa. Valores normalizados pelo número de usuários por célula. Resultados parametrizados pelo número de células do sistema e pelo desvio padrão do sombreamento	63
Tabela 3.6a – Expoente da perda de percurso: Γ=3.....	63
Tabela 3.6b – Expoente da perda de percurso: Γ=4	63
Tabela 3.6c – Expoente da perda de percurso: Γ=5.....	63
Tabela 3.7 - Valores da média e variância da interferência externa normalizados pelo número de usuários por célula. Resultados parametrizados pelo fator de atividade de voz e pelo desvio padrão do sombreamento. N _{ERB} =61; Γ=4.....	64
Tabela 3.8 – Terminais de voz por setor (N _{ERB} =19, Γ=4, P _{perda} =1%, DAV de dois estados). Configuração: FDDG _p 7T _q 20N20D20.....	66

Tabela 3.9 – Ganho de setorização. $N_{\text{ERB}}=N_c=19$	66
Tabela 3.10 – Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ ALOHA. Sistema com células setorizadas. $N_{\text{ERB}}=N_c=19$	66
Tabela 3.11 – Usuários suportados pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA ($P_{\text{perda}}=1\%$, $N_{\text{ERB}}=19$, $\Gamma=4$, detetor de dois estados). Parâmetros da função de acesso podem ser encontrados na Tab. B.3.2. Configuração: FDDG _p 15T _q 20N20D20	68
Tabela 3.12 – Usuários por setor suportados pelo protocolo CDMA/ALOHA ($P_{\text{perda}}=1\%$, $N_{\text{ERB}}=N_c=37$, $\Gamma=4$, detetor de dois estados). Configuração: FDDG _p 7T _q 20N20D20	68
Tabela 3.13 – Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Valores parametrizado pelo desvio padrão do sombreamento log-normal, pelo expoente da perda de percurso e pelo do número de setores por célula.....	69
 Capítulo 4	
Tabela 4.1 - Tempo de coerência em função da velocidades da EM, $f_c=2$ GHz	71
Tabela 4.2 - Efeitos do entrelaçamento entre quadros na capacidade do sistema CDMA/PRMA com codificadores de voz de 2 e 3 estados. Sistemas SEEQ utilizam a configuração FDDG _p 7T _q xN20D20 e TDDG _p 7T _q xN20D20, onde x designa o período do quadro (4,615, 10 ou 20 ms). Sistemas com entrelaçamento entre quadros (CEEQ) empregam a configuração FDDG _p 7T _q xN20D40 e TDDG _p 7T _q xN20D40, com a utilização de entrelaçamento entre dois quadros. Os resultados na segunda linha (para cada período de quadro especificado) referenciam a sistemas operando no modo TDD. As funções de acesso empregadas na configuração FDDG _p 7T _q xN20D20 podem ser encontradas na Tab. B.2.8a, e as demais na Tab. B.4.1.....	72
Tabela 4.2a – Detetor de dois estados. $P_{\text{perda}}=1\%$	72
Tabela 4.2b – Detetor de três estados. $P_{\text{perda}}=1\%$	72
Tabela 4.3 – Coeficiente de correlação do envelope de sinais Rayleigh recebidos na ERB e na EM (alta densidade de espalhadores), nesta ordem. A frequência da portadora (f_c) é de 2 GHz	77
Tabela 4.4 – Resultados de simulação referentes a uma taxa de perda de pacotes de ~1% para os casos mostrados na Fig. 4.1. Resultados de simulação e numéricos, nesta ordem, para sistemas FDD sem entrelaçamento	79
Tabela 4.5 – Resultados de simulação referentes a uma perda de pacotes de aproximadamente 1% para o protocolo CDMA/ALOHA em canais com desvanecimento rápido Rayleigh. É também mostrado o ganho do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA Configuração: TDDG _p 16T _q 10N10D20.....	79
Tabela 4.6 - Resultados de simulação referentes a uma taxa de perda de pacotes de aproximadamente 1% para os protocolo CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em canais com desvanecimento lento Rayleigh. Configuração: TDDG _p 16T _q 10N10D20. Funções de acesso: Tab. B.4.2b a B.4.2d	80
Tabela 4.7 – Perda de capacidade devido ao desvanecimento Rayleigh lento. Dados obtidos com as mesmas condições da Fig. 4.2. Interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada	81
Tabela 4.8 – Características do modelo da Fig. 4.4.....	82
Tabela 4.9 – Dados concernentes aos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA para as mesmas condições da Fig. 4.6. Perda de pacotes de aproximadamente 1%	86
Tabela 4.10 – Parâmetros do canal ATDMA para pico-células.....	87
Tabela 4.11 – Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com desvanecimento lento e perfil de potência de acordo com o modelo ATDMA para pico-células. Perda de pacotes de aproximadamente 1%. Configuração: TDDG _p 32T _q 10N10D20, com entrelaçamento entre dois quadros. Funções de acesso: Tab. B.4.6	87
Tabela 4.11a – Receptor RAKE casada com a diversidade do canal	87
Tabela 4.11b – Influência do número de ramos do receptor RAKE na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. ERB com três antenas independentes	87

Tabela 4.12 Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com desvanecimento Rice lento. Perfil de potência de acordo com o modelo ATDMA para pico células, exceto para o primeiro percurso que agora possui o fator K da VA Rice de +3 dB. Taxa de perda de pacotes de aproximadamente 1%. Configuração: TDDGp32T _q 10N10D20, com entrelaçamento entre dois quadros. Funções de acesso: Tab. B.4.7.....	88
Tabela 4.12a – Diversidade do receptor RAKE casada com a diversidade do canal	88
Tabela 4.12b – Influência da diversidade do receptor RAKE na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA para uma ERB com duas antenas	88
Tabela 4.13 – Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com desvanecimento Rice lento. Perfil de potência de acordo com o modelo ATDMA para pico células, exceto para o primeiro percurso que agora possui o fator K da VA Rice de +10 dB. Taxa de perda de pacotes de aproximadamente 1%. Configuração: TDDGp32T _q 10N10D20, com entrelaçamento entre dois quadros. Funções de acesso: Tab. B.4.7.....	88
Tabela 4.13a – Diversidade do receptor RAKE casada com a diversidade do canal	88
Tabela 4.13b – Influência da diversidade do receptor RAKE na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. ERB com duas antenas.....	88
Tabela 4.14 - Perda de capacidade referente a Fig. 4.1. $P_{\text{perda}}=1\%$. Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20, sem EE. Funções de acesso: Tab. B.4.9.....	93
Tabela 4.15 - Perda de capacidade referente à Fig. 4.2. $P_{\text{perda}}=1\%$. Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20, sem entrelaçamento entre quadros	93
Tabela 4.16 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP em sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA unilulares. Funções de acesso: Tab. B.4.9. $P_{\text{perda}}=1\%$. Configuração: TDDGp32T _q 10N10D20 sem EE.....	93
Tabela 4.17 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP em sistemas CDMA/PRMA celulares. Configurações: (i) TDDGp16 T _q 10N10D20 sem EE (ii) TDDGp32T _q 10 N10D20 sem EE. Funções de acesso: Tab. B.4.10. $P_{\text{perda}}=1\%$	93
Tabela 4.18 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP em sistemas CDMA/ALOHA celulares. Configurações: (i) TDDGp16T _q 10N10D20 sem EE; (ii) TDDGp32T _q 10N10D20 sem EE. Funções de acesso: Tab. B.4.10. $P_{\text{perda}}=1\%$	94
Tabela 4.19 – Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA, otimizado em função de σ_{pc} em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. $P_{\text{perda}}=1\%$	94
Tabela 4.20 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP ncia em sistemas CDMA/PRMA unilulares. Funções de acesso: Tab. B.4.11. $P_{\text{perda}}=1\%$	94
Tabela 4.20a - Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20.....	94
Tabela 4.20b - Configuração: TDDGp32T _q 10N10D20.....	94
Tabela 4.21 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP em sistemas CDMA/ALOHA. Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20 com EE. $P_{\text{perda}}=1\%$	94
Tabela 4.21a – Sistema unilular	94
Tabela 4.21b – Sistema celular. A interferência externa é modelada por meio de uma VA chi-quadrada, onde a média e variância normalizada assumem os valores de 0,63 e 0,2, respectivamente.....	94
Tabela 4.22 – Perda de capacidade, devido a imprecisões no CP em sistemas CDMA/PRMA unilulares otimizados para ambientes com controle ideal de potência. São mostrados, em ordem descendente, resultados sem EE e com EE com profundidade de dois quadros. $P_{\text{perda}}=1\%$	95
Tabela 4.23 – Efeitos da não-idealidade do CP no desempenho do protocolo CDMA/FRMA em um ambiente unilular. Funções de acesso: B.4.12	96
Tabela 4.24 – Efeitos da não-idealidade do CP no desempenho do protocolo CDMA/ALOHA em um ambiente unilular. Interferência modelada como uma densidade espectral de potência.....	97

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Taxa de chegada de células e probabilidade estacionária para a fonte de vídeo VBR	100
---	-----

Tabela 5.2 – Comparação entre os valores teóricos e os obtidos por simulação do modelo WWW do ETSI	102
Tabela 5.3 – Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA para a configuração explicitada na Fig. 5.2. Função de acesso otimizada para cada valor de σ_{pc} : Tab. B.5.1. $P_{perda}=1\%$	104
Tabela 5.4 – Número de terminais de voz equivalente para o protocolo CDMA/PRMA em função do número de EMs de vídeo e do nível de imperfeição no CP. $P_{perda}=1\%$	104
Tabela 5.5 – Perda de capacidade nos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA devido a não-idealidade no CP capacidade. A 1ª linha para o protocolo CDMA/PRMA mostra resultados onde a função de acesso foi otimizada para PC perfeito, enquanto na 2ª linha a função de acesso foi otimizada para cada valor de σ_{pc}	105
Tabela 5.6 – Resultados numéricos e de simulação para o protocolo CDMA/PRMA com tráfego misto voz/vídeo CBR. Sistema celular com $f=0,749$ e CP perfeito. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20. Função de acesso: Tab. 2.5	106
Tabela 5.7 – Número de EMs de voz para $P_{perda}=1\%$, e a taxa de pacotes de vídeo descartados em função do atraso máximo permitido para pacotes de vídeo (CBR a 64 kps). CP perfeito com EE de 2 quadros (20 ms). Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20. Utiliza-se (5.8) com $K_{ot}=19$ para determinação da permissão de acesso para as EMs de voz	106
Tabela 5.8 – Capacidade do protocolo CDMA/PRMA em um canal com CP imperfeito correlacionado (vide Subseção 4.63) . Número de EMs de voz, $P_{perda}=1\%$, e a taxa de pacotes de vídeo descartados para um atraso máximo de 60 ms em um sistema com 3 EMs de vídeo (CBR a 64 kps). Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20 com EE de 2 quadros (20 ms)	107
Tabela 5.9 – Desempenho do protocolo CDMA/PRMA, número de EMs de voz para uma taxa de perda de pacotes de 1% (1ª linha) e taxa pacotes de vídeo descartados para um atraso máximo de 60 ms, ao se utilizar o esquema de múltiplos códigos para as EMs de vídeo Configuração: vide Tab. 5.8	108
Tabela 5.10 – Número de EMs de voz, $P_{perda}=1\%$, e taxa de pacotes de vídeo descartados em função do atraso máximo permitido para pacotes de vídeo (VBR a 64 kps). Alocação de recursos por meio de múltiplos slots, onde cada pacote de vídeo pode carregar 80 bits de informação. CP perfeito	109
Tabela 5.11 – Capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em um canal com CP imperfeito. Número de EM de voz, $P_{perda}=1\%$, e a taxa de pacotes de vídeo descartados para um atraso máximo de 60 ms em um sistema com tráfego de vídeo VBR (64 kps). Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20 com EE de 2 quadros (20 ms)	109
Tabela 5.11a – Alocação de recursos pelo esquema “múltiplos slots” (1 código em cada slot=10 códigos por quadro). 1 pacote de vídeo pode carregar 115 bits de informação. $1E_x=10^x$	109
Tabela 5.11b – Alocação de recursos pelo esquema “múltiplos códigos” (cada EM de vídeo aloca 18 códigos em um único slot; distintas EM utilizam distintos slots). Protocolo CDMA/PRMA. 1 pacote de vídeo pode carregar 80 bits de informação. $1E_x=10^x$	109

ANEXO A

Tabela A.1 – Configuração básica FDDGp7T _q 20N20D20	126
Tabela A.2 – Configuração básica FDDGp7T _q 10N20D20	127
Tabela A.3 – Configuração básica FDDGp7T _q 5N20D20	127
Tabela A.4 – Configuração básica FDDGp7T _q 4,6N20D20	127
Tabela A.5 – Configuração básica TDDGp7T _q 20N20D40	128
Tabela A.6 – Configuração básica TDDGp7T _q 10N20D40	128
Tabela A.7 – Configuração básica TDDGp7T _q 4,6N20D40	128
Tabela A.8 – Configuração básica TDDGp16T _q 10N10D20	129

ANEXO B

Tabela B.2.1 - Funções de acesso para o protocolo CDMA/PRMA com detetor de atividade de voz (DAV) de dois estados: parâmetros otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1,0 e 0,1 %. Valores parametrizados pelo fator de interferência das células vizinhas. Configuração: FDDGp15T _q 20N20D20	130
Tabela B.2.2 - Funções de acesso para o protocolo CDMA/PRMA com DAV de dois estados: parâmetros otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1,0 e 0,1 %. Valores discriminados pelo fator de interferência das células vizinhas. Configuração: FDDGp31T _q 20N20D20	130
Tabela B.2.3 - Funções de acesso para o protocolo CDMA/PRMA com DAV de dois estados: parâmetros otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1%. Valores parametrizados pelo ganho de processamento, pelo fator de interferências das células vizinhas e pelo número de slots por quadro	131
Tabela B.2.3a - Configurações: FDDGp _x T _q 20NyD _y , onde x pode assumir de 7 ou 31; y pode assumir 4, 10, 16 ou 20 slots	131
Tabela B.2.3b - Configurações: FDDGp15T _q 20NyD _y , onde y pode assumir 4, 10, 16 ou 20 slots	131
Tabela B.2.4 - Parâmetros da função de acesso para o sistema CDMA/PRMA com DAV de dois estados. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1% e discriminados pelo número de slots por quadro e pelo atraso máximo permissível para os pacotes de voz	131
Tabela B.2.4a - Configurações: FDDGp7T _q 20NyD _z , onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 20, 30 ou 60 slots.	131
Tabela B.2.4b - Configurações: FDDGp15T _q 20NyD _z , onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 20, 30 ou 60 slots	132
Tabela B.2.5 - Parâmetros da função de acesso para o sistema CDMA/PRMA com DAV de três estados. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1% e parametrizados pelo ganho de processamento e pelo fator de interferência das células vizinhas	132
Tabela B.2.5a - Configurações: FDDGp7T _q 20N20D20, onde x pode assumir 7 ou 15 (p _F =0,3)	132
Tabela B.2.5b - Configurações: FDDGp31T _q 20N20D20 (p _F =0,3)	132
Tabela B.2.6 - Parâmetros das funções de acesso otimizadas para uma taxa de perda de pacotes de 1% em um sistema CDMA/PRMA unicelular com DAV de três estados. Valores parametrizados pelo ganho de processamento e pelo número de slots por quadro. Configurações: FDDGp _x T _q 20NyD _y , onde y pode assumir 4, 10, 16 ou 20 slots	133
Tabela B.2.7 - Parâmetros da função de acesso otimizada para uma taxa de perda de pacotes de 1% em um sistema CDMA/PRMA unicelular com DAV de três estados. Valores discriminados pelo número de slots por quando e pelo atraso máximo permissível para os pacotes de voz	133
Tabela B.2.7a - Configurações: FDDGp7T _q 20NyD _z , onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 10, 15 ou 30 slots para y=10 e 20, 30 ou 60 slots para y=20	133
Tabela B.2.7b - Configurações: FDDGp15T _q 20NyD _z , onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 10, 15 ou 30 slots para y=10 slots e 20, 30 ou 60 slots para y=20 slots	133
Tabela B.2.8 - Funções de acesso para o sistema CDMA/PRMA unicelular com DAV de dois estados. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1% e discriminados pelo período do quadro	134
Tabela B.2.8a - Atraso máximo permissível igual ao período de quadro. Configurações: FDDGp7T _q xN20D20, onde x pode assumir 4,615, 10 ou 20 ms	134
Tabela B.2.8b - Atraso máximo permissível de 20 ms. Configurações: FDDGp7T _q xN20D _y , onde x pode assumir 4,615, 10 ou 20 ms; y pode assumir 87 slots para T _q =4,615 ms, 40 slots para T _q =10 ms ou 20 slots para T _q =20 ms	134
Tabela B.2.9 - Parâmetros da função de acesso do sistema CDMA/PRMA unicelular em função de E _b /N ₀ . Valores otimizados para taxa de perda de pacotes de ~1%. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20, com DAV de dois estados	134
Tabela B.3.1 - Valor de K _{ot} , otimizado para taxa de perda de pacotes de 1%, utilizado na determinação das permissões de acesso pelo critério a-posteriori. Configuração: FDDG _p 7T _q 20N20D20	135
Tabela B.3.2 - Parâmetros das funções de acesso para o sistema CDMA/PRMA com DAV de dois estados. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1% em função de N _c e σ _{dB} . Configuração: FDDG _p 15T _q 20N20D20	135

Tabela B.3.2a – Rede com 19 células.....	135
Tabela B.3.2b – Interferência externa modelada por um VA chi-quadrada. São também mostrados a média e a variância da VA chi-quadrada, onde os valores estão normalizados pelo número médio de usuários por célula	135
Tabela B.3.2c – Interferência externa modelada pelo valor médio. É mostrada a média da interferência externa, onde os valores estão normalizados pelo número médio de usuários por célula.....	136
Tabela B.3.3 – Parâmetros da função de acesso para o sistema CDMA/PRMA com DAV de dois estados. Valores otimizado para taxa de perda de pacotes de 1% em função de N_c e σ_{dB} . Interferência externa modelada por um VA chi-quadrada. São também mostrados a média e a variância da VA chi-quadrada, onde os valores estão normalizados pelo número médio de usuários por célula	136
Tabela B.3.3a – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=3$	136
Tabela B.3.3b – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=4$	136
Tabela B.3.3c – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=5$	137
Tabela B.4.1 – Parâmetros das funções de acesso para sistemas uncelulares CDMA/PRMA configurados para estudar os efeitos do entrelaçamento entre quadros na capacidade. Taxa de perda de pacotes alvo de 1%.....	137
Tabela B.4.1a – Configuração TDDGp7T _q xN20D20 sem entrelaçamento entre quadros.....	137
Tabela B.4.1b – Configuração FDDGp7T _q xN20D40 com entrelaçamento entre dois quadros.....	137
Tabela B.4.1c – Configuração TDDGp7T _q xN20D40 com entrelaçamento entre dois quadros.....	138
Tabela B.4.2 – Parâmetros da função de acesso para sistemas CDMA/PRMA uncelular. Valores otimizados para cada valor do nível de diversidade do canal com desvanecimento Rayleigh. Sistema equipado com DAV de 2 estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1%. Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20	138
Tabela B.4.2a - Canal com desvanecimento Rayleigh rápido	138
Tabela B.4.2b - Canal com desvanecimento Rayleigh lento sem entrelaçamento entre quadros	138
Tabela B.4.2c - Canal com desvanecimento Rayleigh lento com entrelaçamento entre dois quadros.....	139
Tabela B.4.2d - Canal com desvanecimento Rayleigh lento com entrelaçamento entre três quadros	139
Tabela B.4.3 – Parâmetros da função de acesso para sistemas CDMA/PRMA celular ($\Gamma=4$, $\sigma_{dB}=8$). Os valores são otimizados para cada valor do entrelaçamento entre quadros empregado. Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal desvanecimento Rayleigh lento com seis percursos independentes. Interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada com média e variância dados por 0,63 e 0,2, respectivamente. Sistema equipado com DAV de 2 estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1%. Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20 ($p_5=0,3$)	139
Tabela B.4.4 – Parâmetros da função de acesso para o protocolo CDMA/PRMA, cujos valores são otimizados para cada número de antenas da ERB. Ambiente uncelular; canal com desvanecimento Rayleigh lento com perfil de potência dado pelo modelo de canal ATDMA. Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20 com EE de dois quadros.....	140
Tabela B.4.4a – Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal	140
Tabela B.4.4b – Número de ramos do receptor RAKE descasado com a diversidade do canal. Sistema com três antenas na ERB	140
Tabela B.4.5 – Parâmetros da função de acesso para o protocolo CDMA/PRMA, cujos valores são otimizados para cada valor da figura de desvanecimento m. Ambiente uncelular; canal com desvanecimento Nakagami-m lento com potência média idêntica em todos os seis caminhos. Receptor RAKE casado com a diversidade do canal. Configuração: TDDGp16T _q 10N10D20 com EE de dois quadros.....	140
Tabela B.4.6 – Parâmetros da função de acesso para o protocolo CDMA/PRMA, cujos valores são otimizados para cada canal Rice com desvanecimento lento (perfil de potência de acordo com o modelo ATDMA para pico-células). Ambiente celular, onde a interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada (média e variância normalizadas de 0,63 e 0,2, respectivamente). Configuração: TDDGp32T _q 10N10D20 com EE dois quadros. É também mostrada a função de acesso para o canal AWGN	141
Tabela B.4.6a – Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal	141

Tabela B.4.6b – Número de ramos do receptor RAKE diferente da diversidade do canal. ERB com três antenas....	141
Tabela B.4.7 – Parâmetros da função de acesso para o protocolo CDMA/PRMA, cujos valores são otimizados para cada canal Rice com desvanecimento lento. O perfil de potência adotado está de acordo com o modelo ATDMA para pico-células, Tab. 4.10. Isto exceto pelo fator K do primeiro caminho, que é modificado com o intuito de se analisar o efeito da potência da linha de visada no desempenho do protocolo. Ambiente celular, onde a interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada (média e variância normalizadas de 0,63 e 0,2, respectivamente). Configuração: TDDGp32T _q 10N10D20 com EE de dois quadros	141
Tabela B.4.7a – Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal. Fator K da VA Rice igual a +3 dB.....	141
Tabela B.4.7b – Número de ramos do receptor RAKE diferente da diversidade do canal. ERB com duas antenas. Fator K da VA Rice igual a +3 dB	142
Tabela B.4.7c – Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal. Fator K da VA Rice igual a +10 dB.....	142
Tabela B.4.7d – Número de ramos do receptor RAKE diferente da diversidade do canal. ERB com duas antenas. Fator K da VA Rice igual a +10 dB.....	142
Tabela B.4.8 – Parâmetros da função de acesso para sistemas CDMA/PRMA unicolor, os quais são otimizados para cada valor do nível de diversidade do canal com desvanecimento plano do tipo Weibull rápido. Sistema equipado com detetores de atividade de voz de 2 estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1%. Configuração: FDDGp7T _q 20N20D20	142
Tabela B.4.9 – Parâmetros das funções de acesso para sistemas unicolor CDMA/PRMA, os quais foram otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não-idealidade no CP. Sistemas equipados com DAV de dois estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1% em sistemas que não empregam entrelaçamento entre quadros	143
Tabela B.4.10 – Parâmetros das funções de acesso para sistemas celulares CDMA/PRMA, os quais foram otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não idealidade no CP. Interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada com média e variância normalizada fornecidas por 0,63 e 0,2, respectivamente. Sistema equipado com DAV de dois estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1% em sistemas que não empregam entrelaçamento entre quadros.....	143
Tab.4.10a – Dez slots por quadro	143
Tab.4.10b – Cinco slots por quadro.....	143
Tabela B.4.11 – Parâmetros das funções de acesso para sistemas unicolor CDMA/PRMA, os quais foram otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não-idealidade no CP. Sistemas equipados com DAV de dois estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1% em sistemas que empregam entrelaçamento entre quadros	144
Tabela B.4.11a – Configuração TDDG _p 16T _q 10N10D20	144
Tabela B.4.11b – Configuração TDDG _p 32T _q 10N10D20	144
Tabela B.4.12 – Parâmetros da função de acesso do sistema unicolor CDMA/PRMA otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não-idealidade no CP. Sistema equipado com DAV de dois estados	144
Tabela B.4.12a - Taxa de perda de pacotes alvo de 1%	144

Tabela B.4.12b - Taxa de perda de pacotes alvo de 0,1%.....	145
Tabela B.4.13 – Parâmetros da função de acesso do sistema unicelular CDMA/PRMA otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal correlacionada que modela a não-idealidade no CP. Sistema equipado com DAV de voz de 2 estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1% em um sistema TDDGp16Tq10N10D20, onde o entrelaçamento têm profundidade de dois quadros. O parâmetro a denota o nível de correlação do modelo de Gudmundson [Gud91].....	145
Tabela B.5.1 – Parâmetros da função de acesso do sistema CDMA/PRMA otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não-idealidade no controle de potência. Sistema equipado com DAV de dois estados. Configuração: FDDGp7Tq20N20D20.....	145

ANEXO C

Tabela C.1 - Lista de códigos Bose-Chadhuri-Hocquenghem (BCH) gerados por elementos primitivos com ordem menor do que 2^9 . Notação: n (tamanho do código); k (número de bits de informação); t (capacidade de correção do código); r (taxa do código)	146
---	-----

ANEXO E

Tabela 6.1 - Efeitos do CP imperfeito na capacidade do protocolo CDMA/PRMA com receptor SUD. Sistema unicelular com modelagem síncrona e assíncrona, onde a IMA é modelada como uma densidade espectral de potência plana. Configuração: $G_p=16$; $T_f=10$ ms; $N_{\text{slots}}=10$ slots; $D=20$ slots; BCH(255,115,21)	191
--	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

Em 1990 em um artigo visionário, “Cellular Packet Communications” [Goo90], David J. Goodman antevia uma profunda mudança de paradigma nas redes de comunicação sem fio: a utilização de sistemas de transmissão e comutação de pacotes no lugar da tradicional técnica de comutação de circuitos. Incluído entre os seus prognósticos estava a predominância, em um futuro próximo, do tráfego de dados na renda das operadoras de redes de telecomunicações.

A ITU (International Telecommunications Union) estima que foram gastos mundialmente US\$ 53 bilhões em telecomunicações em 1992 [Lit96, p.1-2]. Projeções da ITU também indicam que o mundo gastará US\$ 870 bilhões no ano 2000 e US\$ 1,4 trilhão em 2005. Estima-se que 33% deste montante é destinado para equipamentos enquanto os restantes 67% para o setor de serviços. Atualmente, ainda segundo a ITU, o mercado de transmissão de dados está crescendo cerca de 40% ao ano contra 15% do setor de telecomunicações em geral. Estimativas do Banco Mundial [Oja98, p. 6] indicam que em 1998 a penetração de sistemas móveis atingia cerca de 50% na Finlândia, entre 20 a 25% no Japão e Estados Unidos da América (EUA), 15% no Reino Unido e 5% na América Latina. A ITU projeta que até 2010 o número de usuários de sistemas móveis supere o de usuários de sistemas de telecomunicações fixos [Pra00, cap. 1]. Esta tendência parece ser confirmada em nosso país visto que, segundo dados da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), em março de 1999 existiam 8,428 milhões de celulares habilitados no país, enquanto que em março deste ano este número chegou a 16,578 milhões. Isto expressa o impressionante crescimento de 96,65% em apenas um ano. A leitura destes números, além de mostrar a grande quantidade do capital financeiro envolvido, ratificam de maneira cabal as previsões de Goodman.

Subjacente à proposta de Goodman está a extrema necessidade dos sistemas sem fio serem integrados de maneira transparente às redes com fio. Neste contexto, a estratégia de transporte está mudando rapidamente do paradigma de multiplexação no tempo síncrona para a utilização da camada de transporte ATM (Asynchronous Transfer Mode) e/ou TCP-IP (Transmission Control Protocol/ Internet Protocol). O objetivo deste trabalho é o de caracterizar, analisar e apresentar soluções concernentes ao projeto protocolos de acesso ao meio para transmissão de pacotes em sistemas celulares terrestres que empregam interface do ar do tipo TD/DS-CDMA (Time Division/Direct Sequence Code Division Multiple Access)^{1.1}.

1.2 SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS DE TERCEIRA GERAÇÃO

Os sistemas de comunicação celulares digitais de segunda geração, os quais foram otimizados para atender a demanda de capacidade para comunicação de voz, permitem a transmissão de dados à taxamáxima de 100 kbps [Pra00, p. 7]. A estimativa de um crescimento estável da necessidade do mercado para a transmissão dados que maiores taxas e que atenda a atenda classes de serviço abaixo

^{1.1} Neste trabalho será utilizado CDMA como uma notação abreviada de DS-CDMA. Em outras palavras, não será motivo de estudo as técnicas do tipo TH (Time Hoping) [Pra98, p. 264-266], FH (Frequency Hoping) [Mor99], etc.

especificadas [Wes98], é um dos principais fatores que levaram e estão levando ao desenvolvimento e implementação dos sistemas celulares móveis de terceira geração.

- taxa de bit constante (CBR do inglês *Constant Bit Rate*). Exemplo: voz, vídeo.
- taxa de bit variável em tempo real (rt-VBR do inglês *Real Time Variable Bit Rate*). Exemplos: voz e vídeo comprimidos.
- taxa de bit variável em tempo não-real (nrt-VBR do inglês *Non Real Time Variable Bit Rate*). Exemplo: navegação WWW.
- taxa de bit disponível (ABR do inglês *Available Bit Rate*): Exemplo: transferência de arquivos, tráfego WWW de baixa prioridade.
- taxa de bit não-especificada (UBR do inglês *Unspecified Bit Rate*) Exemplo: transferência de lotes de arquivos, correio eletrônico.

A Tab. 1.1 apresenta um exemplo de requisitos de qualidade de serviço para os serviços a serem fornecidos pela federação de sistemas que respondem pelo genérico nome de IMT-2000. Pode ser encontrado em [Oja98, p.1-31] e [Pra00, p. 1-24] excelentes material introdutório sobre o tópico abordado nesta Seção.

Tabela 1.1: Requerimentos de serviços para os sistemas IMT-2000 [Oja98, p. 72].

<i>Ambiente operacional</i>	<i>Tráfego em tempo real</i>		<i>Tráfego em tempo não-real</i>	
	<i>Taxa de pico (granularidade)</i>	<i>Taxa de erro de bit (atraso máximo)</i>	<i>Taxa de pico</i>	<i>Taxa de erro de bit (atraso máximo)</i>
<i>Urbano (vel. até 150 km/h)</i>	384 kbps (4 kbps)	10^{-3} a 10^{-7} (20 – 300 ms)	384 kbps	10^{-5} a 10^{-8} (150 ms)
<i>Interior/Pedestre (vel. até 10 km/h)</i>	2 Mbps (200 kbps)	10^{-3} a 10^{-7} (20 – 300 ms)	2 Mbps	10^{-5} a 10^{-8} (150 ms)

Finalmente, ressalta-se que os aspectos conceituais do presente estudo podem ser aplicado em sistemas de terceira geração que empregam interface do ar do tipo TD/CDMA no modo de TDD (do inglês *Time Division Duplex*). Por conceituais, entenda-se que os parâmetros de projeto empregados (banda de passagem, período de quadro, etc.) ao longo desta Tese não tem como objetivo a satisfação dos requisitos expostos na tabela acima e sim investigar importantes aspectos concernentes a transmissão de pacotes em uma interface do ar do tipo TD/CDMA.

1.3 METODOLOGIA

Os aspectos inerentes à transmissão de pacotes em sistemas TD-CDMA serão particularizados no estudo dos protocolos TD/DS-CDMA/PRMA^{1.2} (Time Division Direct Sequence Code Division Multiple Access/ Packet Reservation Multiple Access) e Slotted DS-CDMA/ALOHA^{1.3}. A escolha destes dois métodos de múltiplo se fez em função de permitir a comparação entre as técnicas de múltiplo acesso controlado e múltiplo acesso livre, conforme descrito no Cap. 2. Utilizar-se-á simulação de maneira intensiva para a obtenção de resultados. Também se fará uso de métodos analíticos para a validação dos resultados obtidos via simulação.

O protocolo PRMA foi proposto por Goodman et. al em 1989 [Goo89]. Basicamente, o tempo é dividido em

^{1.2} Neste trabalho será utilizado CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA como uma notação abreviada de TD/DS-CDMA/PRMA e Slotted DS-CDMA/ALOHA, respectivamente.

quadros e estes em slots de tempo. Os pacotes de voz são transmitidos à taxa quadros (ou seja, somente é necessário transmitir um pacote de voz a cada quadro). São utilizados detectores de atividade de voz, que indicam se o terminal está no estado de silêncio, ou no estado de fala. Quando um terminal passa do estado de silêncio para o estado de fala é disparado um mecanismo de busca da reserva. Esta é obtida quando o pacote é recebido com sucesso na ERB (estação rádio base). Desconsiderando o efeito de captura e assumindo um canal sem erros, o sucesso na recepção ocorre quando somente uma EM (estação móvel) acessa o canal em um dado slot. Com este intuito, é realizado um experimento de Bernoulli na EM com probabilidade de sucesso determinada pela ERB, de maneira fixa ou dinâmica. Nota-se que esta probabilidade de sucesso é transmitida pela ERBs para as EMs no canal de controle do enlace direto. Após a reserva ser obtida, o recurso (1 slot) é utilizado até o momento em que o detector de atividade de voz passa para o estado de silêncio. Durante a chamada, o terminal repete este processo em todos os seus surtos de atividade de voz. Os pacotes de voz que não puderem ser transmitidos em um período de tempo pré-estabelecido (tipicamente 20 ms) são descartados devido à conhecida suscetibilidade do tráfego de voz em relação ao atraso. A multiplexação estatística do protocolo PRMA permite obter ganhos de capacidade de até 2,7 vezes em relação a sistemas TDMA (Time Division Multiple Access) comutados por circuito. Nestes, o slot é permanentemente reservado para o terminal de voz enquanto durar a chamada. Um interessante resumo de trabalhos subsequentes sobre o protocolo PRMA pode ser encontrado em [San97].

O protocolo CDMA/PRMA, cuja descrição é efetuada no início do Cap. 2, adapta para a técnica DS-CDMA os princípios fundamentais que norteiam o protocolo TDMA/PRMA.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos e quatro anexos, cuja descrição é, sucintamente, apresentada a seguir.

No Cap. 2 são desenvolvidas expressões numéricas para a avaliação do desempenho do protocolo conjunto CDMA/PRMA. Baseado na análise do ponto de equilíbrio é proposto um modelo de terminal de voz para o protocolo CDMA/ALOHA. Estes resultados numéricos são utilizados para validar o simulador dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Realiza-se uma investigação comparativa do desempenho de ambos protocolos para tráfego de voz. São consideradas distintas condições operacionais e de configurações do sistema.

No Cap. 3 é apresentado um simulador de rede celular terrestre de pacotes para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Este simulador é empregado para investigar os efeitos da interferência externa no desempenho destes protocolos.

No Cap. 4 é quantificado os efeitos do desvanecimento rápido, do desvanecimento lento e do controle de potência imperfeito no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA.

No Cap. 5 é investigado o desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com tráfego misto voz/vídeo CBR (Continuous Bit Rate), voz/vídeo VBR (Variable Bit Rate), voz/dados ON/OFF e voz/dados WWW (World Wide Web).

No Cap. 6 são apresentadas as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros.

O anexo A é constituído de um conjunto de tabelas de parâmetros de projeto dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA analisados ao longo deste trabalho. No anexo B são encontrados os parâmetros das funções de acesso para o protocolo conjunto CDMA/PRMA. O anexo C contém uma lista de códigos Bose-Chadhuri-Hocquenghem (BCH) gerados por elementos primitivos com ordem menor do que 2^9 . O anexo D contém cópias de alguns dos trabalhos publicados.

1.5 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Aponta-se a seguir as principais contribuições desta tese.

- Modelo do ponto de equilíbrio para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA [Hoe99e].
- Modelos analíticos para análise de desempenho do protocolo CDMA/PRMA [Hoe99e].
- Desenvolvimento de um simulador de rede de pacotes para sistemas celulares terrestre DS-CDMA [Hoe99b]. Análise dos efeitos da interferência externa na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA [Hoe99b] [Hoe99c].
- Análise comparativa de desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com detector de atividade de voz de três estados [Hoe00a].
- Efeitos dos parâmetros de projeto no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA [Hoe00a].
- Estudo de desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com tráfego de vídeo VBR e tráfego de dados WWW [Hoe00a].
- Investigação dos efeitos do controle de potência (CP) no desempenho do protocolo CDMA/PRMA com tráfego de voz [Hoe98a].
- Estudo dos efeitos do CP no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com tráfego multimídia [Hoe98c].
- Utilização de funções otimizadas para minimizar os efeitos do CP imperfeito e do desvanecimento Rayleigh rápido na capacidade do sistema CDMA/PRMA com tráfego de voz, vídeo CBR e dados ON/OFF [Hoe98d].
- Investigação do desempenho do protocolo CDMA/PRMA em canais com desvanecimento Nakagami-m rápido. Modelagem da interferência de múltiplo acesso (IMA) por meio de uma soma de variáveis aleatórias. Comparação desta abordagem com o modelo da IMA como uma densidade espectral de potência plana [Hoe99a].
- Investigação do desempenho dos protocolos CDMA/PRMA em canais com desvanecimento Weibull rápido [Hoe98d].
- Estudo dos efeitos do entrelaçamento entre quadros (EE) na capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em canais com desvanecimento lento [Hoe00a].
- Aspectos a serem considerados no projeto integrado do protocolo CDMA/PRMA com receptor de detecção conjunta descorrelacionadora. Utilização destes receptores na análise comparativa do desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em canais Nakagami-m [Hoe00b].

Capítulo 2

ANÁLISE NUMÉRICA DO PROTOCOLO CONJUNTO CDMA/PRMA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é proposto um modelo de terminal de voz que, além de possibilitar a descrição qualitativa do protocolo CDMA/PRMA, também permite obter expressões analíticas para quantificar seu desempenho na região de operação nominal (ou seja, região na qual os parâmetros da função de acesso foram otimizados) do sistema. CDMA/PRMA é um protocolo de múltiplo acesso híbrido (aplicam-se os conceitos de multiplexação no tempo [Rom90, p.12-33], por código e de alocação de recursos por meio de reserva) com o propósito de transmitir pacotes de voz, dados e vídeo no enlace reverso de sistemas celulares [Bra96]. Neste momento, o estudo será restrito à tráfego de voz. A extensão às características básicas do protocolo CDMA/PRMA necessárias para comportar tráfego multimídia é apresentada no Capítulo 5.

Sistemas de transmissão de voz por meio de pacotes utilizam o fato da atividade de voz não ser contínua para implementar a multiplexação estatística dos usuários no canal. Nesta perspectiva, a Seção 2.2 apresenta os modelos de detetores da atividade de voz (DAV) empregados neste trabalho. Na Seção 2.3 é descrito qualitativamente o protocolo CDMA/PRMA, enquanto os parâmetros de projeto inicialmente empregados são definidos na Seção 2.4. Antes da descrição semi-analítica do protocolo conjunto CDMA/PRMA ser apresentada na Seção 2.6, faz-se necessário introduzir na Seção 2.5 a modelagem do canal reverso utilizada para a avaliação dos protocolos analisados neste Capítulo. Na Seção 2.7 é descrito um protocolo com acesso puramente aleatório (CDMA/ALOHA). Este é utilizado ao longo deste trabalho com o intuito de se estabelecer comparações com o protocolo de acesso controlado CDMA/PRMA. Na Seção 2.8, com o objetivo de validar o simulador do protocolo CDMA/PRMA, são confrontados resultados obtidos por métodos numéricos com os obtidos via simulação em distintas condições de operação. Aspectos fundamentais dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA são comparados na Seção 2.9. O protocolo CDMA/FRMA (Frame Reservation Multiple Access), onde as informações de controle são transmitidas antes do final de cada quadro, ao invés de cada slot como no protocolo CDMA/PRMA, é estudado na Seção 2.10. A dispersão da taxa de perda de pacotes em torno do seu valor médio nos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA é investigada na Seção 2.11. Os efeitos na capacidade do número de slots por quadro e do atraso máximo permitido para os pacotes de voz são analisados nas Seções 2.12 e 2.13, respectivamente. Na Seção 2.14 é proposto um algoritmo para a determinação do número de usuários em reserva, o qual é utilizado no cálculo das permissões de acesso do protocolo CDMA/PRMA. As Seções anteriores lidavam com sistemas equipados com detetores de atividade de voz de dois estados. O desempenho dos protocolos CDMA/PRMA, CDMA/ALOHA e CDMA/FRMA com detetores de três estados é investigado nas Seções 2.15 a 2.17, respectivamente. As Seções seguintes apresentam resultados para ambos detetores de atividade de voz. Aspectos referentes à variação do período do quadro no projeto e desempenho de protocolos híbridos TD-CDMA são considerados na Seção 2.18. A Seção 2.19 apresenta o desempenho dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA ao se utilizar a aproximação Gaussiana incrementada para a modelagem do canal reverso DS-CDMA. É apresentado na Seção 2.20 um novo esquema de cálculo das permissões de acesso para o protocolo conjunto CDMA/FRMA. Finalmente, é efetuado na Seção 2.21 a investigação do desempenho do

protocolo CDMA/PRMA com códigos convolucionais. Ressalta-se que além da contribuição primordial deste capítulo, a análise do ponto de equilíbrio (APE) do protocolo CDMA/PRMA (Seção 2.6), também são aspectos originais os estudos efetuados nas Seções 2.10 a 2.21.

2.2 MODELAGEM DA ATIVIDADE DE VOZ

As figuras 2.1a e 2.1b mostram a máquina de Markov empregada para a modelagem de detetores de atividade de voz (DAVs) de dois e de três estados, respectivamente [Good91] [Amit94].

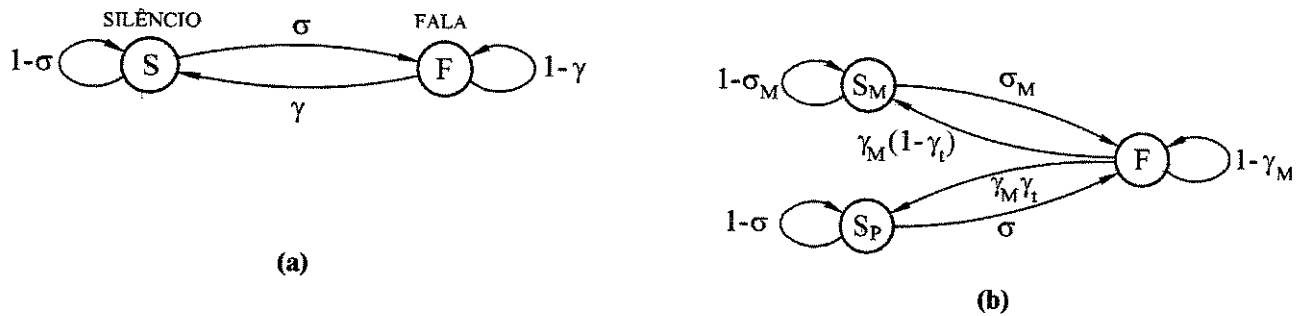


Figura 2.1 – Máquina de estados para a modelagem do detetor de atividade de voz:
(a) detetor de dois estados, (b) detetor de três estados.

Detetores de voz de dois estados modelam os estados de fala (F) e de silêncio (S). Em sistemas puramente Markovianos, o tempo de permanência em cada estado do sistema é modelado por uma variável aleatória do tipo exponencial negativa. Assim, a probabilidade de transição do estado de fala para o estado de silêncio em um intervalo de tempo de τ s é fornecida por

$$\gamma = 1 - \exp(-\tau/t_1) \approx \frac{\tau}{t_1} \quad (2.1)$$

onde t_1 é a duração média do surto de fala. Nota-se que a aproximação efetuada é obtida pela expansão em série de Taylor, onde a restrição pragmática $\tau \ll t_1$ foi levada em conta. Analogamente, a probabilidade de transição do estado de silêncio para o estado de fala é dada por

$$\sigma = 1 - \exp(-\tau/t_2) \approx \frac{\tau}{t_2} \quad (2.2)$$

onde t_2 é o tempo médio de permanência no estado de silêncio.

Sejam v_f e v_s as probabilidades do detetor de voz estar no estado de fala e de silêncio, respectivamente. Assim, analisando-se a Fig. 2.1a, verifica-se que:

$$\begin{cases} v_s + v_f = 1 \\ v_s\sigma + v_f(1-\gamma) = v_f \end{cases} \quad (2.3a)$$

de tal forma que:

$$v_f = \frac{\sigma}{\sigma + \gamma} \approx \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (2.3b)$$

$$v_s = \frac{\gamma}{\sigma + \gamma} \approx \frac{t_2}{t_1 + t_2} \quad (2.3c)$$

Em outras palavras, pode-se afirmar que o fator de atividade de voz, v_f , é aproximadamente dado por $t_1/(t_1+t_2)$.

Detetores de atividade de voz de três estados são capazes de captar as pequenas pausas na fala contínua. Neste caso, portanto, há os estados de fala (F), mini-silêncio (S_M) e de silêncio principal (S_p). A probabilidade de transição do estado de mini-silêncio para o estado de fala em τ s é dada por

$$\sigma_M = 1 - \exp(-\tau/t_4) \approx \frac{\tau}{t_4} \quad (2.4)$$

onde t_4 é a duração média do período de mini-surto de atividade de voz. Analogamente, a probabilidade de que um mini-surto de fala termine em um slot de tempo é dada por:

$$\gamma_M = 1 - \exp(-\tau/t_3) \approx \frac{\tau}{t_3} \quad (2.5)$$

onde t_3 é tempo de permanência médio no estado de mini-silêncio.

A probabilidade de transição do estado F para o estado S_p é dada por $\gamma_M \gamma_t$ e, por conseguinte, a probabilidade de transição do estado F para o estado S_M é $\gamma_M (1 - \gamma_t)$, onde γ_t é a probabilidade de que um dado mini-surto de fala seja o último no surto de fala corrente, ou seja,

$$\gamma_t = \frac{t_3 + t_4}{t_1 + t_4} \approx \frac{t_3 + t_4}{t_1} \quad (2.6)$$

A relação acima é obtida ao se constatar que um surto de fala consiste de m mini-surto de atividade de voz e $m-1$ intervalos de mini-silêncio. Portanto, o número médio de mini-surto de voz deve satisfazer a seguinte relação

$$\bar{m} t_3 + (\bar{m} - 1) t_4 = t_1 \quad (2.7a)$$

ou

$$\bar{m} = \frac{1}{\gamma_t} = \frac{t_1 + t_4}{t_3 + t_4} \cong \frac{t_1}{t_3 + t_4} \quad (2.7b)$$

Utilizando-se um procedimento análogo ao aplicado no DAV de dois estados, pode-se verificar que o fator de atividade de voz para detetores de três estados é dado por

$$v_f = \frac{t_3}{t_3 + \gamma_t t_2 + (1 - \gamma_t) t_4} \quad (2.8)$$

Neste trabalho são empregados os mesmos parâmetros que foram utilizados nos estudos sobre o protocolo PRMA [Good91], Tab. 2.1. O ganho de multiplexação de voz máximo indica quantos usuários de voz podem teoricamente compartilhar de um mesmo canal sem descarte de pacotes ("speech clipping"), ou seja, na média N canais de voz podem ser compartilhados por $N \times 1/v_f$ terminais.

Tabela 2.1 – Parâmetros dos detetores de atividade de voz de dois e de três estados. Valores obtidos a partir de dados estatísticos de conversações telefônicas em língua inglesa

<i>Parâmetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor Médio</i>
Duração média do surto de voz	t_1	1,0 s
Duração média do silêncio	t_2	1,35 s
Duração média do mini-surto de voz	t_3	0,275 s
Duração média do silêncio inter-silábico	t_4	0,05 s
<i>Detetor de atividade de voz de 2-estados</i>		
Probabilidade de fala (atividade vocal)	v_f	0,426
Ganho de multiplexação máximo	$1/v_f$	2,35
<i>Detetor de atividade de voz de 3-estados</i>		
Número médio de mini-surtos por fala	$1/\gamma_t$	3,08
Probabilidade de fala (atividade vocal)	v_f	0,368
Ganho de multiplexação máximo	$1/v_f$	2,72

2.3 DESCRIÇÃO QUALITATIVA DO PROTOCOLO CDMA/PRMA PARA TRÁFEGO DE VOZ

A fim de implementar a multiplexação do tempo no canal reverso, o eixo temporal no protocolo CDMA/PRMA é dividido em quadros com período T_q e estes em N intervalos de tempo com duração de $\tau = \frac{T_q}{N}$ s. A partir deste momento, utilizar-se-á o anglicismo slot ou time slot para definir um pequeno intervalo de tempo. A taxa de quadros é idêntica à taxa de transmissão dos pacotes de voz, de maneira que estes necessitam ser transmitidos apenas uma vez por quadro. Distintos pacotes podem ser multiplexados em um mesmo slot através da técnica de múltiplo acesso por divisão de código (CDMA, do inglês *Code Division Multiple Access*), implementada por meio da técnica de espalhamento espectral por sequência direta (SS-DS, do inglês *Spread-Spectrum DS*). A transmissão dos pacotes de voz (classificados como periódicos) se dá através de um mecanismo de obtenção de reserva, ou seja, uma vez obtido com sucesso o acesso ao canal de transmissão, esta permissão é mantida até o final do corrente surto da atividade de voz. Entenda-se por sucesso no acesso ao canal os seguintes eventos independentes: (i) sucesso na realização de um experimento de Bernoulli a fim de obter permissão para transmitir o pacote em um dado slot; (ii) sucesso na recepção do pacote na estação rádio base (ERB). Portanto, o primeiro pacote transmitido com sucesso de um dado surto de fala, além de transmitir informação de voz, obtém a reserva para a transmissão de todos os pacotes do surto no mesmo slot dos subsequentes quadros. Após a transmissão do conjunto de pacotes do surto de fala, o terminal libera os recursos empregados para transmissão e entra no estado de silêncio (vide Fig. 2.1). Para a transmissão de novos surtos de fala, executa-se novamente o mecanismo de obtenção de reserva.

Pode-se entender claramente o mecanismo de geração de probabilidade de acesso empregado no protocolo CDMA/PRMA ao se analisar a Fig. 2.2. Esta indica que a probabilidade de acesso ao terceiro slot no quadro $I+1$ é função da carga periódica (ou seja, número de terminais de voz que já estão com reserva garantida para transmitir os pacotes constituintes do corrente surto de fala) neste mesmo slot do quadro anterior. Entende-se

por carga aleatória aquela que necessita a obtenção de uma permissão de acesso para transmissão de cada pacote (vide Cap. 5). Logo, a carga aleatória é inexistente ao se considerar somente tráfego de voz.

Pragmaticamente, é introduzida a função de acesso ao canal, Fig. 2.3, com os seguintes parâmetros: (i) probabilidade inicial p_E ; (ii) a inclinação do primeiro segmento de reta Δ_1 ; (iii) o primeiro ponto de quebra δ_1 ; (iv) a inclinação do segundo segmento de reta Δ_2 ; (v) segundo ponto de quebra δ_2 . Nota-se, novamente, que esta permissão de acesso é utilizada por cada EM que tenha pacotes para transmitir e que ainda não tenham uma reserva para a realização de um experimento de Bernoulli que dita o acesso ao canal para a disputa de uma reserva. Caso este experimento seja positivo, o móvel acessa o canal para disputar uma reserva. Contudo, a reserva somente é obtida caso o pacote seja recebido com sucesso na ERB. Caso o experimento seja negativo, a EM tentará o acesso no slot subsequente e assim sucessivamente. É assumido que no protocolo CDMA/PRMA as EMs recebem antes do $n+1$ slot as informações de controle transmitidas pela ERB concernentes ao sucesso dos pacotes transmitidos no n -ésimo slot.

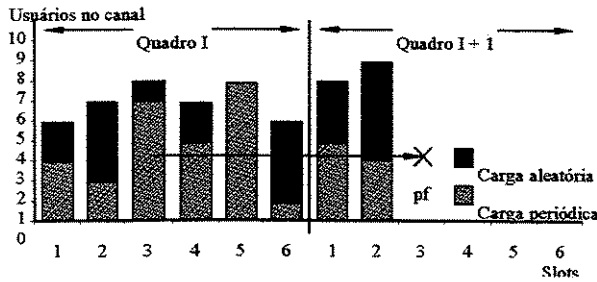


Figura 2.2 – Mecanismo de acesso do protocolo CDMA/PRMA [Bra96].

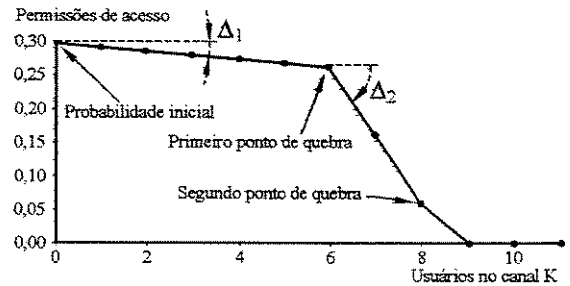


Figura 2.3 – Função de permissão de acesso [Bra96].

Utiliza-se um método heurístico de otimização a-posteriori pela média a fim de determinar os parâmetros da função de acesso para uma dada perda de pacotes máxima admitida (tipicamente assume-se que uma boa qualidade de voz é obtida com uma perda de pacotes de 1%). Neste método, primeiramente determina-se o número de usuários suportado pelo protocolo CDMA/PRMA quando a probabilidade de permissão de acesso é obtida de tal maneira que o valor esperado do número de usuários por slot seja K_{ot} , i.e

$$Pf_n = \frac{K_{ot} - K_{res,n}}{K_{acs,n}} \quad (2.9)$$

onde $K_{acs,n}$ e $K_{res,n}$ é o número de usuários em acesso (número de terminais de voz que estão no estado de fala, mas que não possuem recursos reservados para transmitir os pacotes do corrente surto de fala) e em reserva (número de terminais de voz que estão no estado de fala e que já garantiram recursos para transmitir os pacotes do corrente surto de fala), respectivamente, no n -ésimo da slot. Este esquema é factível na medida que se pode projetar um simulador do protocolo CDMA/PRMA em que se observa no início de cada slot o número de usuários que estão em contenção e em reserva. Em seguida, determina-se heurísticamente os

parâmetros da função de permissão de acesso, de tal forma que a capacidade obtida seja semelhante àquela com a permissão de acesso determinada pelo critério a-posteriori.

Sistemas CDMA são limitados por interferência. Portanto, ao considerar uma perda máxima de pacotes devida à interferência de múltiplo acesso (IMA, ou MAI do inglês *Multiple Access Interference*), o canal pode ser carregado com um número máximo de usuários dado por

$$(K_{\max})_{\text{cpd}} = \max_{K=1,2,\dots} \{K | (1 - Q_E[K]) \leq P_{\text{cpd}}\} \quad (2.10)$$

onde $Q_E[K]$ é probabilidade de sucesso na transmissão de pacotes quando K usuários simultâneos estão transmitindo em um dado slot. Para transmissão de voz, a taxa máxima de perda de pacotes admissível (tipicamente entre 0,1 e 2%) é a soma da taxa de pacotes corrompidos, P_{cpd} , devido a IMA, e de pacotes descartados, P_{desc} , por não obterem a reserva no período de tempo pré-estabelecido (tipicamente 20 ms). Nota-se que: (i) na taxa de perda de pacotes corrompidos são apenas computados os pacotes transmitidos e recebidos com insucesso após a obtenção da reserva; (ii) na taxa de perda de pacotes descartados são computados todos os pacotes descartados devido ao atraso na obtenção da reserva (ou seja, todos os pacotes que não foram transmitidos antes da obtenção da reserva). Portanto, apesar do número de usuários que satisfaz (2.10) não necessariamente otimizar a capacidade do sistema para tráfego de voz, esta equação permite obter uma estimativa inicial para o valor de K_{at} ao considerar P_{cpd} igual a taxa de perda de pacotes admissível. Em suma, o valor de K_{at} que maximiza a capacidade do sistema é obtido por meio de simulação ao se utilizar (2.10) como estimativa inicial no processo de tentativa e erro.

2.4 PARÂMETROS DE PROJETO DO PROTOCOLO CDMA/PRMA

Inicialmente, utiliza-se os parâmetros de projeto definidos por Brand e Aghvami na descrição do protocolo CDMA/PRMA [Bra96]. No decorrer deste trabalho é avaliado o desempenho deste protocolo para distintas configurações.

A taxa de fonte dos usuários de voz é de R_v bps. Considerando que pacotes de voz são transmitidos à taxa de quadro, então $R_v T_q$ bits de informação devem ser transmitidos por slot. Além de transmitir bits de informação, os pacotes contém campos para transmissão de bits de controle (endereço, por exemplo), de sincronismo, entre outros. Englobando-se esses bits adicionais (*overhead bits*) em um cabeçalho de H bits, então cada pacote passa a ser constituído de $R_v T_q + H$ bits. Assim, verifica-se imediatamente que o número de slots por quadro é dado por

$$N = \left\lceil \frac{R_p T_q}{R_v T_q + H} \right\rceil \quad (2.11)$$

onde $\lceil x \rceil$ denota o maior inteiro menor ou igual a x e R_p é a taxa de transmissão do canal (em bits por segundo - bps) antes da codificação e do espalhamento.

Fundamentalmente, o objetivo do protocolo CDMA/PRMA é carregar o canal com o número máximo de usuários que satisfaça a qualidade de serviço desejada (QoS do inglês *Quality of Service*). Trabalhos

anteriores sugerem que a utilização de códigos corretores de erro permitem que uma maior capacidade seja obtida em sistemas CDMA por pacotes [Gan94]. Considerando o emprego de códigos de bloco lineares, apresenta-se a seguir um método de otimização para a determinação dos parâmetros do código corretor de erros:

- (1) determinar as restrições a serem obedecidas pelo processo de otimização: perda de pacotes máxima requerida, banda passante (W), taxa de fonte, período do quadro, número de slots por quadro e o número de bits de cabeçalho;
- (2) determinar o tamanho da mensagem a ser codificada, i.e., $k = R_v T_q + H$;
- (3) utilizar o limitante de Gilbert e Varsharmov [Pro95, p. 463] para determinar as características do código.

O limitante inferior de Gilbert e Varsharmov indica que existem códigos de bloco binários nos quais a distância mínima de Hamming, $d_{\min}$, normalizada satisfaz assintoticamente a seguinte desigualdade:

$$\frac{d_{\min}}{n} \geq \alpha \quad (2.12)$$

onde n é o tamanho da palavra código. A taxa do código, $r_c = k/n$, e α são relacionados pela seguinte expressão

$$r_c = 1 + \alpha \log_2(\alpha) + (1 - \alpha) \log_2(1 - \alpha), \quad \text{para } 0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2} \quad (2.13)$$

Isto posto, emprega-se o seguinte algoritmo para determinar a taxa e a capacidade de correção do código:

- (1) estipular um valor para r_c ;
- (2) determinar o tamanho da palavra código, i.e., $n = k/r_c$;
- (3) determinar α que satisfaz (2.13);
- (4) determinar $d_{\min}$ que satisfaz (2.12);
- (5) determinar a capacidade de correção do código, i.e., $t = \lfloor (d_{\min} - 1)/2 \rfloor$;
- (6) determinar o número máximo de usuários por slot que satisfaz a perda de pacotes requerida ^{2.2};
- (7) voltar ao passo (1) caso haja outros valores de r_c a serem considerados, senão ir para o próximo passo;
- (8) determinar o intervalo dos valores de r_c e t que levam a um melhor desempenho e que obedecem às condições de contorno consideradas;
- (9) determinar o código levando em conta considerações de implementação, tais como, ganhos de processamento e códigos exeqüíveis, etc.

A Tab. 2.2 apresenta os parâmetros de projeto inicialmente empregados na investigação do desempenho do protocolo CDMA/PRMA. Esta configuração empregada é denominada de FDDGp7Tq20N20D20, ou seja, o sistema tem as seguintes características: opera no modo FDD (Frequency Duplex Mode), ganho de processamento (G_p) de 7, período de quadro (T_q) de 20 ms; número de slots por quadro (N) igual a 20 e atraso máximo dos pacotes de voz (D) de 20 slots. Todas as configurações utilizadas ao longo deste trabalho

^{2.2} Nota-se que a expressão para estimar a taxa de perda de pacotes depende da modelagem do canal empregada. Para canais AWGN o leitor é referido à Seção 2.5.

são detalhadas no Anexo A. Ressalta-se que ao utilizar os valores da Tab. 2.1 e especificando-se uma perda de pacotes máxima de 1%, o processo de otimização conduz ao código BCH(511,229,38). A determinação do código de bloco linear com outros parâmetros de projeto é efetuada na Seção 2.18.

Tabela 2.2 - Parâmetros de projeto do protocolo CDMA/PRMA [Bra96].

<i>Definição</i>	<i>Notação</i>	<i>Valores</i>
Taxa de chip	R_c	3,577 Mcps
Taxa do canal antes da codificação	R_p	229 kbps
Taxa do canal após a codificação	R_{ec}	511 kbps
Taxa da fonte (terminais de voz)	R_v	8 kbps
Duração do Quadro	T_q	20 ms
Bits de informação por pacote	$R_v T_q$	160 bits
Bits de “overhead” por pacote	H	69 bits
Número de slots por quadro	N	20
Duração do slot	τ	1 ms
Atraso máximo em slots dos pacotes de voz	D_{max}	20

2.5 MODELAGEM DO CANAL REVERSO: APROXIMAÇÃO GAUSSIANA PADRÃO

Assumindo-se que erros em sucessivos bits são independentes e que ocorrem com a mesma probabilidade (BSC, do inglês *Bynary Symmetric Channel*), então a probabilidade de receber um pacote com sucesso ao se utilizar decodificação abrupta é dada por [Pro95, p. 465]

$$Q_E = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} \left(\overline{P_e} \right)^i \left(1 - \overline{P_e} \right)^{n-i} \quad (2.14)$$

onde $\overline{P_e}$ é a probabilidade que um bit seja erroneamente recebido em um canal BSC, n e t denotam o tamanho e a capacidade de correção, respectivamente, do código de bloco linear.

Empregando-se a aproximação Gaussiana padrão, pode-se exprimir a probabilidade de erro de bit média, que corresponde a probabilidade de transição em um canal BSC, para a modulação *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) coerente por [Pur77]:

$$\overline{P_e} \approx Q(\overline{RSI}) \quad (2.15)$$

onde $Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-y^2/2} dy$ é a função Gaussiana Q [Rap96, p. 593-597]. A relação sinal-interferência

(RSI) para o i -ésimo usuário, em um sistema unicelular em que K_0 usuários distintos estão instantaneamente acessando o canal, é fornecida por:

$$RSI_i = \sqrt{\frac{P_i}{(3G_p)^{-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{K_0} P_k + \frac{N_0}{2T_b}}} \quad (2.16)$$

onde se denota P_k como a potência recebida na ERB devida ao k-ésimo usuário, G_p o ganho do processamento, T_b o período de bit e N_0 a densidade espectral de potência unilateral do ruído térmico. A Eq. (2.16) fornece a RSI para o i-ésimo usuário em um ambiente unicelular. Ao se levar em conta a interferência externa esta modificar-se-á para

$$RSI_i = \sqrt{\frac{P_{i,0}}{(3G_p)^{-1} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{K_0} P_{k,0} + \sum_{n=1}^{N_{ERB}-1} \sum_{k=1}^{K_n} P_{k,n} \right) + \frac{N_0}{2T_b}}} \quad (2.17)$$

N_{ERB} indica o número de células do sistema, K_n e $P_{k,n}$ denotam o número de usuários ativos na n-ésima célula e a potência recebida na ERB devida ao k-ésimo usuário localizado na n-ésima célula, respectivamente.

Postulando controle ideal de potência, carga uniforme de M usuários em todas as células do sistema, e negligenciando o ruído térmico, então a RSI média para K_0 usuários acessando um dado slot na célula central é fornecida por

$$\overline{RSI} = \sqrt{\frac{3G_p}{(K_0 - 1) + \frac{I_{ext}}{P_0}}} \quad (2.18)$$

onde P_0 é a potência nominal recebida na ERB devido a qualquer um dos K_0 distintos usuários e I_{ext} é a interferência devido as células vizinhas. Modelando a interferência externa pelo seu valor médio, então a razão da potência interferente externa pela potência nominal recebida na ERB é fornecida por^{2,3}:

$$\frac{I_{ext}}{P_0} = v_f \frac{M}{N} f = \overline{K} f \quad (2.19)$$

onde v_f denota o fator de atividade de voz, M o número de usuários presentes no sistema, f o fator de interferência das células vizinhas e $\overline{K}$ o número médio de terminais de voz que acessa o canal em um dado slot. Sem levar em conta o sombreadimento log-normal na rede de células circulares com carga constante, o fator f é igual a 0,37 ou 0,749 para um expoente de perda de percurso de 4 e 3, respectivamente [Wil93].

^{2,3} Em um sistema com M usuários, o número médio de usuários acessando o canal em um dado slot é $v_f(M/N)$, quando se considera um fator de atividade de voz v_f e N slots por quadro.

Empregando a configuração do sistema da Tab. 2.2, a Tab. 2.3 mostra a taxa média de sucesso na transmissão de pacotes em função do número de usuários por slot. Assim, ao se desejar, por exemplo, uma perda máxima de pacotes de 1% em um sistema unicolor AWGN deve-se utilizar $K_{or}=8$ em (2.9) como uma primeira estimativa no processo de determinação da capacidade do sistema CDMA/PRMA segundo o critério a-posteriori.

Tabela 2.3 – Probabilidade média de sucesso na transmissão de pacotes ($G_p=7$, $n=511$, $t=38$).

K	$P_{sucs}, \%$		
	$f=0,0$	$f=0,37$	$f=0,749$
4	100,0	100,0	100,0
5	100,0	100,0	99,38
6	100,0	99,92	73,57
7	100,0	93,79	19,96
8	99,97	58,13	2,05
9	98,60	18,18	0,11
10	86,68	3,16	0,0048

É indispensável o sincronismo de quadro para que sistemas do tipo CDMA/TDMA operem adequadamente. Além disso, são necessários *chips* de guarda de tal forma que a ortogonalidade temporal entre os sinais recebidos em distintos slots seja obtida. A independência em chip é obtida ao se considerar que os sinais, além de serem espalhados por seqüências de assinatura aleatórias, possuem atrasos e fases aleatórias em cada slot. Contudo, os atrasos e as fases podem permanecer constantes devido à pequena duração dos slots. Nesta perspectiva, tomando como referência o trabalho de Morrow e Lehnert [Mor89], propõe-se tecer alguns comentários a respeito da dependência dos erros de bit no desempenho de sistemas TD/DS-CDMA com códigos corretores de erro de bloco lineares.

Primeiramente, descreve-se um teorema (Teorema do espaço de momentos) que versa sobre as propriedades de um espaço Euclidiano N -dimensional, cujas coordenadas são momentos de funções de uma variável aleatória (VA) X [Mor89].

Teorema: *Seja X uma VA com função distribuição de probabilidade $F_X(x)$ definida em um intervalo finito fechado $I=[a,b]$. Sejam $g_1(x), g_2(x), \dots, g_N(x)$ um conjunto de N funções contínuas definidas em no intervalo finito fechado I . O primeiro momento de uma VA X induzida pela função $g_i(x)$ é dado por*

$$m_i = E[g_i(x)] = \int_I g_i(x) dF_X(x) \quad (2.20)$$

O espaço dos primeiros momentos M definido por (2.20) é um conjunto fechado, limitado e convexo, i.e..

$$M = \{\bar{m} = (m_1, \dots, m_N)\} \in \mathcal{R}^N, \text{ onde } m_i = \int_I g_i(x) dF_X(x) \quad (2.21)$$

onde $\mathcal{R}^N$ denota um espaço Euclidiano N -dimensional. Seja C uma curva $\{\bar{r} = (r_1, \dots, r_N)\}$ em $\mathcal{R}^N$ definida por $r_i = g_i(x)$ para $x \in I$. Seja H o casco convexo de C . Então $H=M$. Em suma, o casco convexo de todas funções momento traçadas no espaço Euclidiano N -dimensional contém todos os momentos definidos por (2.20) para qualquer função distribuição de probabilidade $F_X(x)$.

Seja Q_e a probabilidade de sucesso da transmissão de um bit, condicionada sobre $K-1$ usuários, uma função dos atrasos relativos S_k e fases ϕ_k , onde $k \in \{2, 3, \dots, K\}$. Então Q_e é uma VA expressa por

$$Q_e(\bar{S}, \bar{\Phi}) = Q_e(S_2, \dots, S_K, \Phi_2, \dots, \Phi_K) \quad (2.22)$$

com função distribuição de probabilidade denotada por $F_{Q_e}(x)$. Seja $\mathcal{R}^N = \mathcal{R}^2$, $g_1(x) = x$, e

$$g_2(x, n, t) = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (1-x)^i x^{n-i} \quad (2.23)$$

Portanto, (2.23) corresponde ao mapeamento $x = Q_e$, probabilidade de sucesso na transmissão de um bit, utilizando-se $g_2(x)$, a probabilidade de sucesso na transmissão de pacote, dado que t erros possam ser corrigidos ao se postular que os erros são eventos independentes bit-a-bit. Uma vez determinados os extremos do intervalo I , pode-se, finalmente, utilizar o teorema dos espaços de momentos anteriormente descrito para limitar a probabilidade de sucesso na transmissão de pacote, Q_E . Note que os extremos inferior e superior de I correspondem ao limitante inferior e superior, respectivamente, da probabilidade de sucesso na transmissão de bit $Q_e(\bar{S}, \bar{\Phi})$, calculada sobre todos os valores possíveis de $\bar{S}$ e $\bar{\Phi}$.

A Fig. 2.4 ilustra o procedimento para se determinar o limitante inferior, $Q_E^{(i)}$, e superior, $Q_E^{(s)}$, nas regiões convexas e côncavas de $g(x, 511, 38)$ [Mor89]. Considere a Fig. 2.4 em que a região de operação nominal do sistema é uma região côncava de $g(x, n, t)$. Primeiramente, determina-se o intervalo $I = [c, d]$ nesta região. Então se constrói a casca côncava entre esses dois pontos. Como nessa região $g(x, n, t)$ é côncavo, então a casca côncava é limitada superiormente pela própria função e inferiormente pelo segmento de reta que conecta os pontos $(c, g(c, n, t))$ e $(d, g(d, n, t))$. Finalmente, é traçada uma linha reta vertical que corta a casca côncava a partir do valor da probabilidade média de sucesso da transmissão de bit, $\bar{Q}_e$. Os valores das ordenadas dos limites da casca convexa representam $Q_E^{(i)}$ e $Q_E^{(s)}$ visto que a casca côncava da curva $(x, g_2(x))$ no espaço Euclidiano bidimensional contém todos os momentos para qualquer função de distribuição de probabilidade $Q_e(x)$.

Isto indica que na região nominal do sistema é melhor que os erros ocorram de maneira aleatória, de tal forma que possam ser corrigidos pelo código corretor de bloco. Nota-se que os sistemas em questão são projetados para fornecer uma QoS, na qual a taxa média de sucesso na transmissão de pacotes é de 98%, no mínimo. Correspondentemente, ao assumir que os erros são independentes na região convexa da Fig. 2.4, então verifica-se imediatamente que $g(x, n, t)$ é o limitante inferior do desempenho do sistema. Isto porque, neste caso, a correção de surtos de erros é plenamente factível, visto que o sistema está trabalhando com baixa carga de usuários no canal e, por conseguinte, a maioria dos surtos causa menos do que t erros.

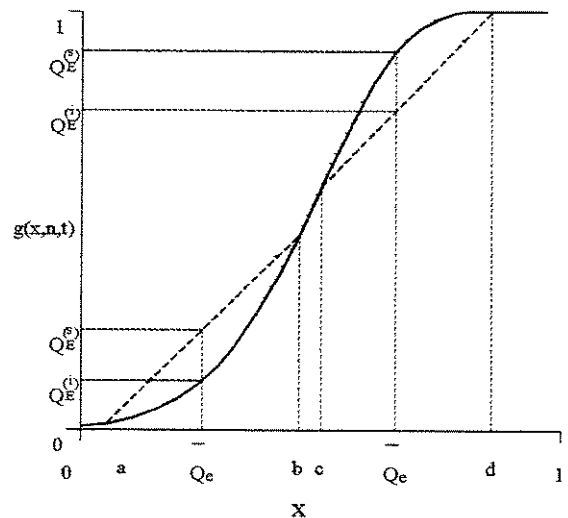


Figura 2.4 – Procedimento para determinar $Q_E^{(i)}$ e $Q_E^{(s)}$ nas regiões convexa e côncava de $g(x, n, t)$.

Em suma, pode-se concluir que a utilização do modelo de canal BSC produz um limitante inferior na região de baixo tráfego e um limitante superior na região de alto tráfego do sistema. Contudo, verifica-se que na região de operação nominal, o limitante é bastante apertado devido à pequena espessura da casca convexa ao se trabalhar com pequenas taxas de perda de pacotes.

2.6 ANÁLISE DO PONTO DE EQUILÍBRIO DO PROTOCOLO CDMA/PRMA

A análise do ponto de equilíbrio (APE) é uma técnica de análise de regime permanente que assume que o sistema está sempre em um ponto de equilíbrio [Tas83]. Este é definido como sendo o ponto em que o valor esperado do fluxo de entrada é idêntico ao valor esperado do fluxo de saída em cada estado do sistema, ou seja, em uma unidade de tempo o valor esperado do incremento de usuários em cada estado é nulo [Tas86 p.27].

A Fig. 2.5 apresenta o modelo proposto de terminal de voz aplicado à APE do protocolo CDMA/PRMA com detetor de atividade de voz de dois estados. Um terminal vai do estado de silêncio (SIL) para o estado de acesso (ACS) com probabilidade σ em um slot de tempo. Caso seu surto de atividade de voz não tenha terminado até o corrente slot de tempo, que ocorre com probabilidade $1-\gamma$, então o terminal vai para o estado de contenção (CON) ao receber permissão para acessar o canal. A permissão de acesso é obtida pela realização de um experimento de Bernoulli com probabilidade de sucesso $p_A(r)$. A ERB calcula a permissão de acesso para o n -ésimo slot do quadro atual, a partir do número de usuários em reserva no n -ésimo slot do quadro anterior. Estas probabilidades são transmitidas para as estações móveis (EMs) à frequência dos quadros. Assume-se que a realimentação da ERB para as EMs é disponível antes do próximo slot. Portanto, um terminal que tem seu pacote recebido com sucesso vai para o estado de reserva (RES) no próximo slot, caso contrário ele retorna ao estado ACS. Neste estado, terminais que não obtêm reserva em um período de tempo pré-estabelecido têm seus pacotes descartados.

Um usuário no estado RES_{N-1} vai para o estado RES_{N-2} com probabilidade 1 no próximo slot e assim sucessivamente. Nota-se que como uma EM transmite um pacote por quadro, então este encadeamento de estados RES modela um período de quadro. O usuário no estado RES_0 vai para o estado SIL, caso seu surto de voz tenha terminado no quadro anterior. Isto ocorre com probabilidade

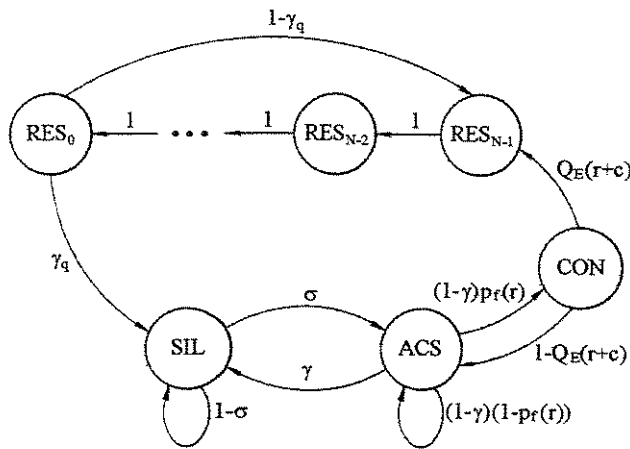
$$\gamma_q = 1 - (1 - \gamma)^N \quad (2.24)$$

A probabilidade de receber um pacote com sucesso, Q_E , é dada por (2.14). A taxa média de bits errados para a modulação BPSK, negligenciando o ruído térmico em um canal AWGN com controle ideal de potência, é dada por

$$\overline{P_e} = Q \left(\sqrt{\frac{3 G_p}{(r + c - 1) + f(r + c)}} \right) \quad (2.25)$$

onde os números reais s , a , c e r denotam os valores de equilíbrio das variáveis de estado SIL, ACS, CON, RES, respectivamente. Nota-se que (2.25) é imediatamente obtida de (2.18) ao se verificar que o número

médio de usuários acessando o canal em um dado slot de tempo é $(r+c)$. Finalmente, aplicando a APE na Fig. 2.5, obtém-se o seguinte sistema de equações não-lineares:



$$r \gamma_q + a \gamma = s \sigma \quad (2.26)$$

$$a (1 - \gamma) p_f(r) = c \quad (2.27)$$

$$c Q_E(r+c) = r \gamma_q \quad (2.28)$$

$$s + a + c + r N = M \quad (2.29)$$

$$r_0 = r_1 = \dots = r_{N-1} = r \quad (2.30)$$

Figura 2.5 – Modelo de terminal de voz para o protocolo CDMA/PRMA com DAV de dois estados.

onde M é o número de terminais de voz.

Nota-se que ao se postular que um terminal de voz sempre obtém uma reserva em cada surto de atividade de voz (desconsidera-se o fluxo de entrada no estado SIL oriundo do estado ACS), então basta igualar γ a zero em (2.26) e (2.27) para se obter as equações de equilíbrio do sistema. Finalmente, ressalta-se que a obediência fidedigna desta suposição é o que se espera de um sistema adequadamente projetado.

2.7 DESCRIÇÃO DO PROTOCOLO CDMA/ALOHA PARA TRÁFEGO DE VOZ

A Fig. 2.6 mostra o modelo de terminal de voz proposto para a obtenção das equações de equilíbrio do protocolo CDMA/ALOHA. Neste protocolo também é efetuada a multiplexação temporal e por código dos usuários no canal. Contudo, diferentemente do protocolo CDMA/PRMA, os terminais acessam o canal tão logo tenham pacotes a serem transmitidos (observe que isto conduz a supressão dos estados de acesso e de contenção empregados na modelagem do protocolo CDMA/PRMA). Todos os pacotes constituintes de um surto de voz são transmitidos em um mesmo slot de subsequentes quadros, sem necessidade de obtenção de reserva. Nota-se que neste protocolo os pacotes somente são perdidos pelo excesso de interferência. Observe ainda que se pode considerar o protocolo CDMA/ALOHA como um caso particular do protocolo CDMA/PRMA (função de permissão de acesso é uma constante unitária independente da carga no canal).

Mantendo as definições empregados no protocolo CDMA/PRMA, explicita-se abaixo as equações de equilíbrio do sistema.

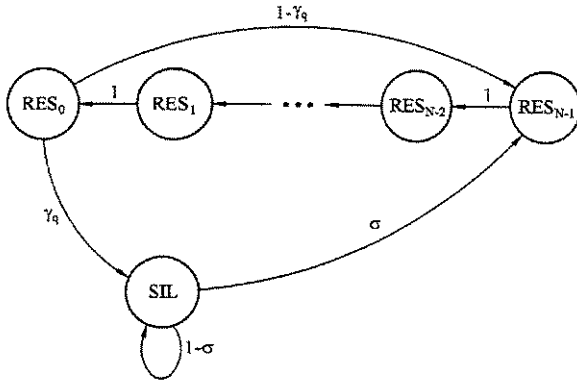


Figura 2.6 – Modelo de terminal de voz para o protocolo CDMA/ALOHA com DAV de dois estados.

$$r \gamma_q = s \sigma \quad (2.31)$$

$$s + r N = M \quad (2.32)$$

$$r_0 = r_1 = \dots = r_{N-1} = r \quad (2.33)$$

2.8 VALIDAÇÃO DO SIMULADOR CDMA/PRMA

Quando se emprega o modelo de terminal de voz descrito na Seção 2.6, o protocolo conjunto CDMA/PRMA apresenta $N + 3$ estados:

$$\Omega = \{S, A, C, R_0, R_1, \dots, R_{N-1}\} \quad (2.34)$$

onde S , A e C denotam o número de terminais nos estados de silêncio, de acesso e de contenção, respectivamente, e R_n é o número de usuários em reserva no n -ésimo slot. Assumindo-se que o número máximo de usuários em reserva é $\delta_2 + 1$, então o número de estados possíveis é da ordem $M^3(\delta_2 + 1)^N$, onde M e N são o número de terminais de voz por célula e o número de slots por quadro, respectivamente. Por exemplo, para $M=360$, $N=20$ e $\delta_2=8$, o número de estados é da exorbitante ordem de 10^{26} . Portanto, a análise em regime permanente desse processo de Markov de $M^3(\delta_2 + 1)^N$ dimensões é extremamente complexa. Primeiramente, deve-se determinar as probabilidades de transição entre todos os possíveis estados do sistema para então obter $\Phi(\Omega)$, a probabilidade de distribuição assintótica de Ω . Em seguida, deve-se obter as estatísticas de desempenho do protocolo (taxa de perda de pacotes descartados e corrompidos, por exemplo) como função dos estados do sistema e de suas probabilidades de transição. Finalmente, os valores médios destas figuras de mérito (funções complexas dependentes dos estados do sistema) são obtidos por meio de médias sobre $\Phi(\Omega)$. Em decorrência de tais complexidades, faz-se uso de técnicas de simulação para a análise do protocolo conjunto CDMA/PRMA.

O uso extensivo de simulação para a análise de sistemas complexos requer estudos sobre a confiabilidade do “software” desenvolvido, ou seja, como responder de forma convincente a fundamental questão: pode-se confiar na qualidade do simulador desenvolvido supondo adequada a modelagem empregada? Isto porque, reconhecidamente, simulação computacional pode gerar resultados errôneos por erros conceituais na modelagem, dados insuficientes para estimar a grandeza de interesse, erros de programação, etc. [Tra94]. Observando-se que a validação não consiste somente na revisão do código fonte (não revela erros

A dinâmica dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA, ao empregar o controle de acesso ao meio de transmissão como referência, se processa em uma base tempo em que o slot é a unidade básica. Isto, é reforçado pelo fato que a simulação chip a chip (ou mesmo bit a bit) de redes de comunicação que empregam a modulação DS/SS demanda um elevadíssimo custo computacional. Os pacotes são considerados corrompidos quando o número de erros é maior que a capacidade de correção do código empregado, visto que, desconsiderando os chips de guarda, de sincronismo, etc., o pacote é formado por uma palavra código. Consistente com o modelo desenvolvido na Seção 2.5, o número estimado de erros é uma VA binomial, onde o tamanho do código dita o número de experimentos independentes de Bernoulli e a probabilidade de erro de bit é a probabilidade de sucesso em cada tentativa. O tempo de transmissão simulado é de, no mínimo, 50 mil quadros. Os parâmetros da função de acesso do protocolo CDMA/PRMA foram otimizados, a menos que seja explícito em contrário, para uma perda de pacotes de 1%. As figuras de mérito empregadas para a análise de desempenho referenciam os valores médios obtidos em regime permanente.

2.8.1 VALORES DE EQUILIBRIO DO SISTEMA

A Tab. 2.4 mostra o número de usuários suportado pelo protocolo CDMA/PRMA ao serem empregadas as probabilidades de permissão de acesso obtidas pelo critério de otimização a-posteriori (vide Seção 2.3). Valores pequenos de K_{ot} favorecem o aumento na perda de pacotes devido ao atraso. À medida que se aumenta K_{ot} , a perda pelo excesso de interferência vai se tornando dominante, de tal forma que o número ótimo de usuários no canal é aquele que otimiza a soma destas duas componentes que constituem a perda de pacotes. Tomando como exemplo o caso unicolor com $(P_{perda})_{req}=1\%$, verifica-se que o número máximo de usuários ocorre para K_{ot} igual a 8 ou 9; para $K_{ot}=8$ o efeito predominante é o descarte de pacotes por excesso de atraso, enquanto que para $K_{ot}=9$ a maioria dos pacotes são perdidos devido à IMA (vide Tab. 2.3). Nota-se que para $K_{ot}=8$ e um fator de atividade e voz de 0.425, o número de usuários suportado por um sistema com multiplexação perfeita (sem descarte de pacotes, porém com pacotes corrompidos dentro do limite preestabelecido de $\sim 1\%$) seria de 376 usuários ($K_{ot}N/v_d$); enquanto que 423 terminais de voz seriam suportados para $K_{ot}=9$. Como o tráfego agregado a ser manipulado pelo protocolo é do tipo Poisson, então surtos de alta intensidade de tráfego intercalados com períodos de menor intensidade fazem com que os ganhos de multiplexação obtidos sejam menores.

Tabela 2.4 - Número de usuários suportado pelo protocolo CDMA/PRMA como função da perda de pacotes máxima admitida, do número ótimo de usuários por slot (vide Eq. 2.10) e do fator de interferência das células externas (vide Eq. 2.19). Configuração: FDDGp7T_g20N20D20.

$(P_{perda})_{req}$	0,1 %			1,0 %		
	$f=0$	$f=0,37$	$f=0,749$	$f=0$	$f=0,37$	$f=0,749$
4	162	163	163	180	182	180
5	208	208	194	230	228	217
6	252	244	162	276	268	199
7	297	203	132	321	262	170
8	329	152	115	362	214	151
9	218	132	108	362	185	148
10	165	127	108	255	180	147

Comparando a Tab. 2.5 com a Tab. 2.4, verifica-se que o formato da função de acesso empregado permite obter resultados bastante adequados quando otimizada para uma perda de pacotes máxima de 1%. A maior

discrepância observada para perda de pacotes máxima de 0,1% se deve à maior dificuldade no casamento dos parâmetros da função de acesso com o tráfego aleatório do tipo Poisson ao se trabalhar com pequenos percentuais de perda de pacotes. Entretanto, isto não causa maiores entraves, pois se tem assumido que uma perda de pacotes de 1% é adequada para tráfego de voz [Goo91].

As Tab. 2.6 e 2.7 mostram concordância, em diferentes condições operacionais e de exigência de desempenho, entre os resultados obtidos numericamente pela APE e os estimados via simulação. Apesar da técnica da APE não permitir uma avaliação teórica de sua precisão [Tas83], estes resultados indicam fortemente a validação mútua do simulador e do modelo de terminal de voz proposto para a análise do protocolo CDMA/PRMA. Entre parênteses são indicados os resultados obtidos ao se postular que os terminais de voz sempre obtêm uma reserva em todos os período de atividade de voz. A semelhança dos resultados obtidos pelos dois modelos distintos mostra que, em condições nominais, os terminais de voz obtêm uma reserva antes do final de seu surto de atividade de voz.

Tabela 2.5 - Parâmetros da função de acesso otimizada para que o sistema CDMA/PRMA apresente uma perda de pacotes média 1 e 0,1 % ($p_{\bar{r}}=0,3$). M_{otm} é a capacidade do protocolo CDMA/PRMA quando as probabilidades de permissão de acesso são obtida pelo critério a posteriori (Eq. 2.9). Configuração: FDDGp7T_q20N20D20.

	1,0 %			0,1 %		
	$f=0$	$f=0,37$	$f=0,749$	$f=0$	$f=0,37$	$f=0,749$
Δ_1	0,007	0,008	0,009	0,03/5	0,01	0,01
δ_1	6	4	3	5	4	3
Δ_2	0,1	0,1	0,12	0,05	0,11	0,12
δ_2	8	6	5	7,0	6	5
M	358	264	209	303	216	173
M_{otm}	362	268	217	329	244	194
$\Delta = M_{otm} - M$	4	4	8	26	28	26
Δ / M_{otm}	1,11 %	1,49 %	3,69 %	7,90 %	11,47 %	13,40 %

Tabela 2.6 - Comparação dos valores de equilíbrio obtidos utilizando-se APE e simulação. Função de permissão de acesso otimizada para perda de pacotes de 1%, mostrada na Tab. 2.5. Entre parênteses são indicados os resultados obtidos ao se postular que os terminais de voz sempre obtêm uma reserva em todos os período de atividade de voz. Perda de pacotes obtida via simulação. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20.

f	P_{perda} %	M	APE				Simulação			
			r	c	a	s	r	c	a	s
0	0,1	275	5,86 (5,87)	0,12 (0,12)	0,43 (0,43)	157,27 (157,02)	5,78	0,12	0,45	158,81
0	1,0	358	7,58 (7,62)	0,15 (0,15)	1,50 (1,58)	204,74 (203,83)	7,52	0,15	1,64	205,72
0	2,0	379	7,97 (8,04)	0,16 (0,16)	2,61 (2,96)	216,76 (215,05)	7,88	0,17	2,76	218,33
0,37	0,1	215	4,57 (4,59)	0,091 (0,091)	0,43 (0,43)	122,96 (122,70)	4,53	0,092	0,42	123,94
0,37	1,0	264	5,59 (5,62)	0,11 (0,11)	1,02 (1,05)	150,99 (150,37)	5,58	0,11	1,08	151,25
0,749	0,1	173	3,68 (3,69)	0,073 (0,073)	0,39 (0,40)	98,94 (98,71)	3,68	0,073	0,40	98,90
0,749	1,0	209	4,42 (4,45)	0,087 (0,088)	0,86 (0,89)	119,53 (119,01)	4,36	0,089	1,04	119,70

Tabela 2.7 - Comparação dos valores de equilíbrio obtidos utilizando-se APE e simulação. Função de permissão de acesso otimizada para uma perda de pacotes de 0,1%, mostrada na Tab. 2.5. Entre parênteses são indicados os resultados obtidos ao se postular que os terminais de voz sempre obtêm uma reserva em todos os período de atividade de voz. Perda de pacotes obtida via simulação. Perda de pacotes obtida via simulação. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20.

<i>f</i>	<i>P_{perda}</i> %	<i>M</i>	<i>APE</i>				<i>Simulação</i>			
			<i>r</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>s</i>	<i>r</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>s</i>
0	0,05	283	6,02 (6,04)	0,12 (0,12)	0,55 (0,55)	161,84 (161,53)	5,96	0,12	0,48	163,10
0	0,1	303	6,44 (6,47)	0,13 (0,13)	0,65 (0,65)	173,28 (172,91)	6,38	0,13	0,63	174,69
0	0,2	318	6,76 (6,79)	0,13 (0,13)	0,74 (0,74)	181,86 (181,43)	6,71	0,14	0,82	182,91
0,37	0,05	200	4,26 (4,27)	0,084 (0,084)	0,36 (0,37)	114,38 (114,16)	4,21	0,085	0,37	115,24
0,37	0,1	216	4,60 (4,61)	0,091 (0,091)	0,45 (0,47)	123,53 (123,25)	4,57	0,092	0,47	124,11
0,37	0,2	230	4,89 (4,90)	0,097 (0,097)	0,57 (0,61)	131,53 (131,18)	4,84	0,098	0,59	132,40
0,749	0,05	160	3,41 (3,41)	0,067 (0,068)	0,30 (0,31)	91,50 (91,32)	3,44	0,068	0,30	92,10
0,749	0,1	173	3,68 (3,69)	0,073 (0,073)	0,39 (0,39)	98,94 (98,71)	3,64	0,074	0,37	99,76
0,749	0,2	184	3,91 (3,92)	0,077 (0,078)	0,48 (0,49)	105,23 (104,94)	3,94	0,078	0,47	106,23

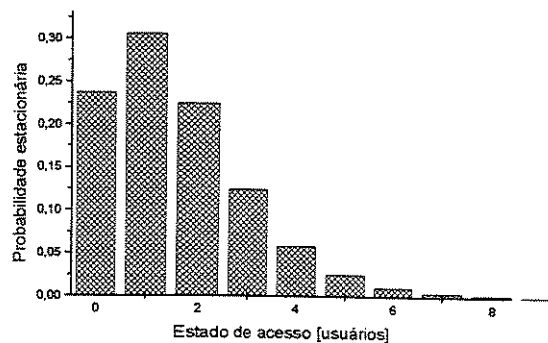
A Tab. 2.8 é análoga às duas últimas, exceto pelo uso de um ganho de processamento de 15 ao invés de 7 como anteriormente empregado. Nota-se que o aumento do ganho de processamento do sistema requer somente a alteração da taxa de chips (R_c) na Tab. 2.2. Estes resultados mostram que os valores de equilíbrio obtidos numericamente conferem, novamente, com os obtidos via simulação. As funções de acesso empregadas podem ser encontradas no anexo B, Tab. B.1.

Tabela 2.8 - Comparação dos valores de equilíbrio obtidos utilizando-se APE e simulação. Função de permissão de acesso otimizada para perda de pacotes de 1,0 %. Configuração: FDDGp15T_q20N20D20 (vide anexo A).

<i>f</i>	<i>P_{perda}</i> %	<i>M</i>	<i>APE</i>				<i>Simulação</i>			
			<i>r</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>s</i>	<i>r</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>s</i>
0	1,0	775	16,43	0,33	3,63	443,21	16,30	0,33	3,63	445,05
0,37	1,0	572	12,13	0,24	1,94	327,12	11,99	0,25	2,37	329,48
0,749	1,0	450	9,54	0,19	1,57	257,35	9,46	0,19	1,78	258,83

2.8.2 TAXA DE PERDA DE PACOTES

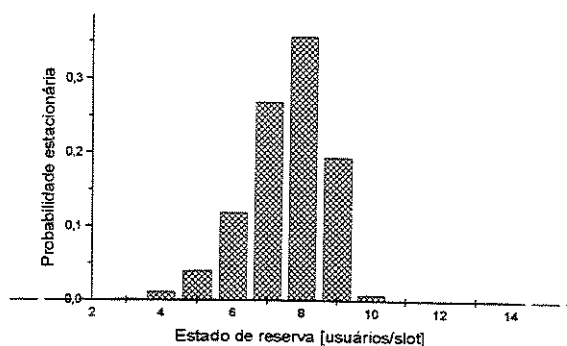
As figuras 2.7 e 2.8 mostram a distribuição de estacionária de probabilidade, obtidas via simulação do protocolo CDMA/PRMA, da ocupação de estados para o caso uncelular com 258 e 775 terminais de voz ao se utilizar ganhos de processamento de 7 e 15, respectivamente.



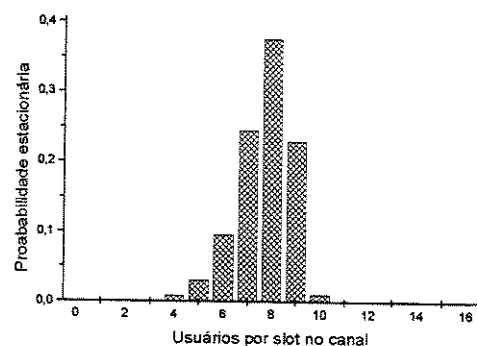
(7a)



(7b)

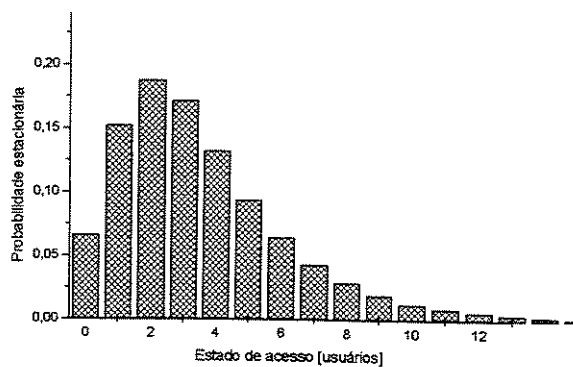


(7c)

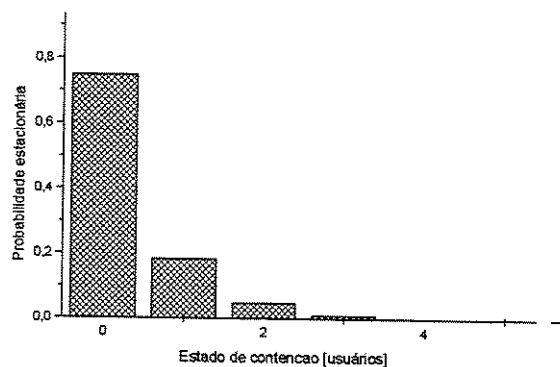


(7d)

Figura 2.7 – Distribuição estacionária da ocupação de estados: (a) acesso; (b) contencão; (c) reserva; (d) carga no canal. Sistema unicelular com 358 terminais de voz. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20.



(8a)



(8b)

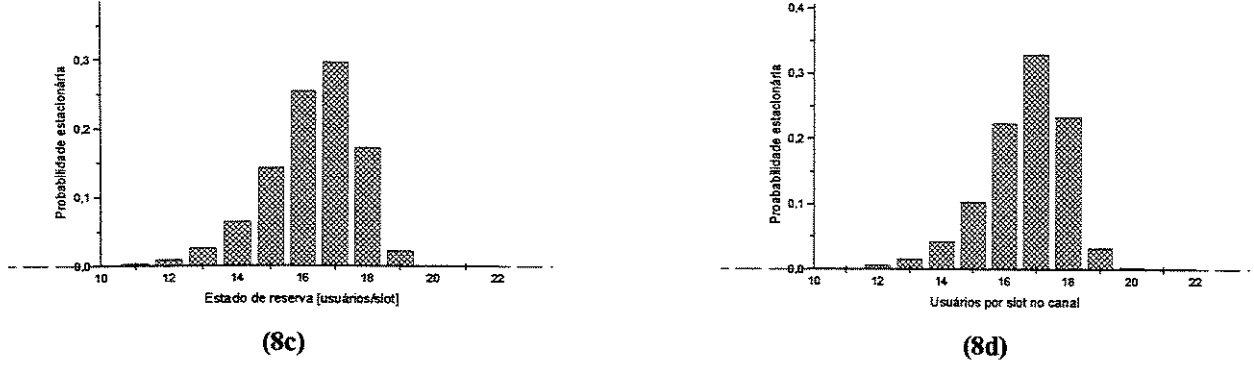


Figura 2.8 - Distribuição estacionária da ocupação de estados: (a) acesso; (b) contenção; (c) reserva; (d) carga no canal. Sistema unicelular com 775 terminais de voz. Configuração: FDDGp15Tq20N20D20.

Conforme ilustrado pelas figuras anteriores, a probabilidade estacionária de ocupação dos estados é espalhada e assimétrica em torno do ponto de equilíbrio. Isto, reforçado pelas não-linearidades associadas ao cálculo da probabilidade de sucesso na transmissão de pacotes (Eq. 2.14), faz com que a utilização dos valores de equilíbrio para a avaliação de desempenho não conduza a resultados precisos. Portanto, torna-se premente tecer suposições e aproximações em relação à dinâmica do sistema, de forma a obter expressões analíticas que possibilitem a avaliação de desempenho de primeira ordem fundamentada na APE [Hoe99e].

Como visto na Seção 2.3, a função de acesso não permite a entrada de usuários no canal quando o número de usuários em reserva é maior que δ_2 (observe que na Fig. 2.3 $\delta_2=8$ e a permissão de acesso é nula quando $\delta_2>8$). Então é procede a suposição de que o número máximo de usuários em reserva com relevância estatística (R_{sup}) seja dado por δ_2+1 ou δ_2+2 , dependendo da intensidade do tráfego e dos valores assumidos pela função de acesso na região em torno de δ_2-1 . Os terminais de voz acessam o canal de maneira independente. Assim, aproxima-se a função densidade de probabilidade (FDP) do número de usuários por slot no estado RES por

$$\Theta_R(R) = \sum_{m=0}^{R_{sup}} \binom{R_{sup}}{R} \left(\frac{r}{R_{sup}} \right)^m \left(1 - \frac{r}{R_{sup}} \right)^{R_{sup}-m} \delta(R-m) \quad (2.35)$$

para $R = 0, 1, \dots, R_{sup}$

ou seja, por uma variável aleatória (VA) binomial com média dada pelo valor de equilíbrio r . $\delta(x)$ denota a função impulso unitário.

Supondo que a FDP dos usuários em reserva não muda significativamente nos diferentes slots do quadro, então a taxa média de pacotes perdidos por excesso de interferência pode ser obtida ao se descondicionar a probabilidade de pacotes corrompidos sobre $\Theta_R(R)$, isto é,

$$\overline{P_{cpd}} \approx \sum_{R=1}^{R_{sup}} \Theta_R(R) [1 - Q_E(R+c)] \quad (2.36)$$

onde o número de usuários em contenção foi modelado pelo seu valor de equilíbrio.

A perda de pacotes descartados condicionada, empregando-se o mesmo procedimento descrito em [Nan91, eq. 67-76] aplicado ao detetor de voz de dois estados, é dada por

$$P_{desc}(v) = \gamma_q E[n_{desc}] \quad (2.37)$$

onde $E[n_{\text{desc}}]$ é o número médio de pacotes descartados em cada surto de fala e $1/\gamma_q$ é o número médio de pacotes gerados em cada surto de fala. A probabilidade média de pacotes descartados condicionada sobre a VA v é dada por

$$P_{\text{desc}}(v) = \frac{v^D (1 - \gamma_q)^{B-1}}{1 - v^N} \left\{ 1 - \frac{\gamma_q [1 - (1 - \gamma_q) v^{2N}]}{[1 - (1 - \gamma_q) v^N]^2} \right\} + \frac{\gamma_q v^N}{[1 - (1 - \gamma_q) v^N]^2} + \gamma_q (1 - \gamma_q)^{B-1} (v^D - v^{BN}) \quad (2.38)$$

onde B é o tamanho do “buffer” utilizado para armazenar pacotes de voz não transmitidos que não excederam o atraso máximo especificado. Nesta dedução foi considerado que o terminal descarta os pacotes que não obtiveram reserva após um atraso de D slots de tempo. Caso $D=B \times N$, então o último termo da Eq. 2.38 desaparece.

A expressão (2.38) é idêntica à obtida na análise do protocolo PRMA. Entretanto, aplica-se também ao protocolo CDMA/PRMA uma vez que, neste caso, a diferença se restringe às condições necessárias para o êxito na obtenção da reserva. A obtenção de reserva no protocolo PRMA depende do atendimento dos seguintes eventos independentes [Nan91]: (i) que o usuário permaneça em atividade de voz; (ii) que o slot não esteja reservado; (iii) que o usuário em questão tenha permissão de acessar o canal; (iv) que os demais usuários não tenham permissão de acessar o canal (desconsiderando o efeito de captura). Já no protocolo conjunto CDMA/PRMA, a obtenção de reserva implica as seguintes condições: (i) que o usuário permaneça em atividade de voz; (ii) que o usuário tenha permissão para acessar o canal; (iii) que o pacote seja recebido com sucesso. Portanto, de acordo com a Fig. 2.5, a probabilidade de que o terminal permaneça no estado de acesso é dada por

$$v(R) = 1 - p_f(R)(1 - \gamma)Q_E(R + c) \quad \text{para } 0 \leq R \leq R_{\text{sup}} \quad (2.39)$$

Na prática, a permissão de acesso é negada quando o número de usuários em reserva for maior que δ_2 . É extremamente raro que todos os slots do quadro estejam carregados acima do número desejável de usuários por slot. Portanto, modelar a permissão de acesso como nula acima de δ_2 consiste uma inadequação, levando, por conseguinte, a resultados bastante pessimistas sobre a taxa média de pacotes descartados. Por outro lado, é razoável supor que a permissão de acesso observada esteja em torno de seu valor médio quando o sistema opera em torno de seu ponto nominal. Assim, (2.39) modifica-se para

$$v(R) = 1 - \frac{c}{a}(1 - \gamma)Q_E(R + c) \quad \text{para } 0 \leq R \leq R_{\text{sup}} \quad (2.40)$$

onde foi utilizado que $p_f(R) = \frac{c}{a(1 - \gamma)} \approx \frac{c}{a}$.

Isto posto, tem-se que a perda média de pacotes descartados é obtida ao descondicinar $P_{\text{desc}}(v)$ pela FDP estimada $\Theta_R(R)$, isto é,

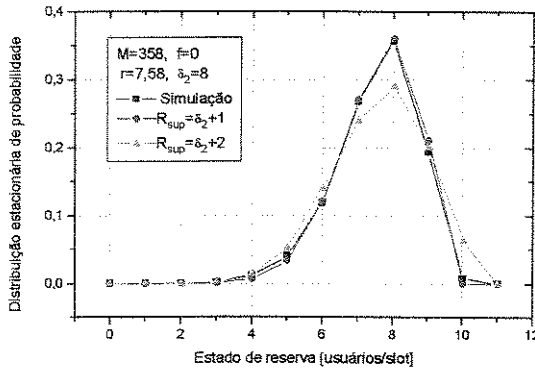
$$\overline{P_{\text{desc}}} \approx \sum_{R=0}^{R_{\text{sup}}} P_{\text{desc}}(v) \Theta_R(R) \quad (2.41)$$

Ao se postular novamente que os terminais de voz sempre obtêm reserva antes do fim do surto da atividade de voz, verifica-se (empregando o mesmo procedimento descrito em [Nan91, eq. 59-66]) que a perda de pacotes descartados condicionada pode ser expressa por

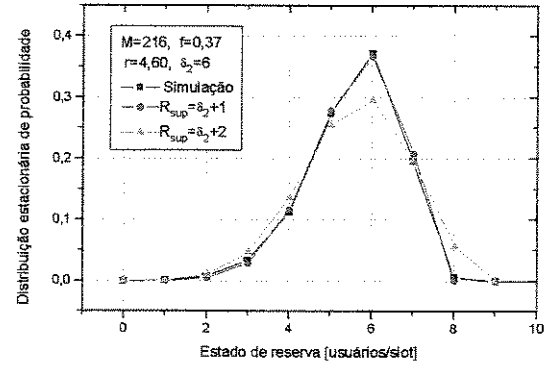
$$P_{\text{desc}}(v) = \gamma_q \frac{v^D}{1 - (1 - \gamma_q)v^N} \quad (2.42)$$

onde foi suposto D como um múltiplo de N slots de tempo. Neste caso, a probabilidade de que o terminal permaneça no estado de acesso é ainda dada por (2.39), porém com $\gamma=0$.

A Fig. 2.9 mostra a distribuição estacionária dos usuários no estado de reserva obtida via simulação e pela aproximação binomial com dois distintos limitantes superiores. A Fig. 2.10 é semelhante a Fig. 2.9, exceto pelo uso de um ganho de processamento de 15 ao invés de 7. Ao se analisar as figuras 2.7 a 2.10, verifica-se imediatamente que a suposição de que o número de usuários no estado de reserva segue uma distribuição binomial é bastante razoável. Nos casos mostrados, verifica-se ainda que uma melhor concordância ocorre ao se utilizar $R_{\text{sup}} = \delta_2 + 1$, embora em condições de alto tráfego se possa considerar como $\delta_2 + 2$ o número de usuários com relevância estatística no estado de reserva.

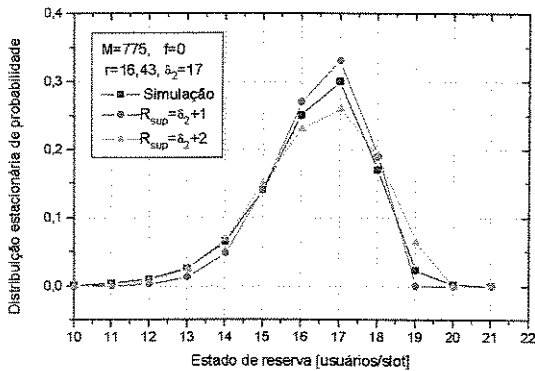


(a)

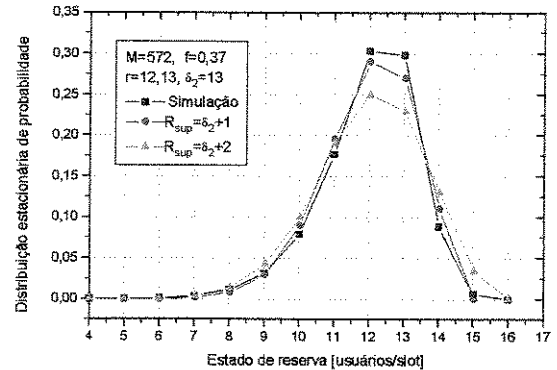


(b)

Figura 2.9 - Distribuição estacionária dos usuários por slot no estado de reserva: (a) $f=0$, $M=360$; (b) $f=0,37$, $M=216$. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20.



(a)



(b)

Figura 2.10 – Distribuição estacionária dos usuários por slot no estado de reserva: (a) $f=0$, $M=775$; (b) $f=0,37$, $M=572$. Configuração: FDDGp15T_q20N20D20.

Os resultados numéricos mostrados a seguir utilizam o modelo que admite a possibilidade da ocorrência de surtos de atividade de voz nos quais a reserva não é obtida. A Fig. 2.11a apresenta a perda de pacotes, obtida numericamente e por meio de simulação, como função do número de terminais de voz. As figuras 2.11b e 2.12c discriminam as componentes constituintes da perda de pacotes para $f=0$ e $f=0,37$, respectivamente. A Fig. 2.12 é análoga à Fig. 2.11 exceto pela utilização de um ganho de processamento de 15.

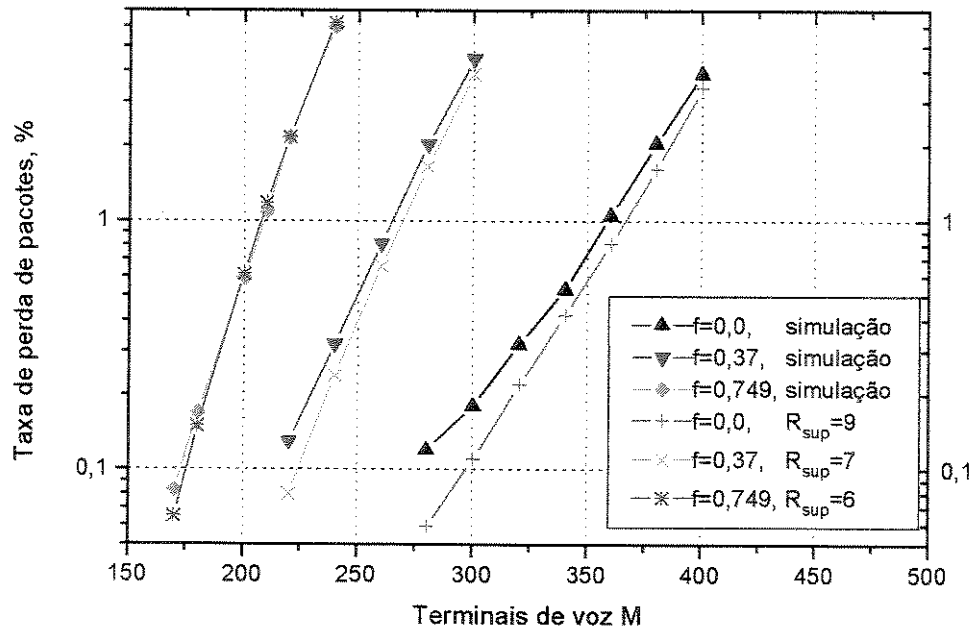
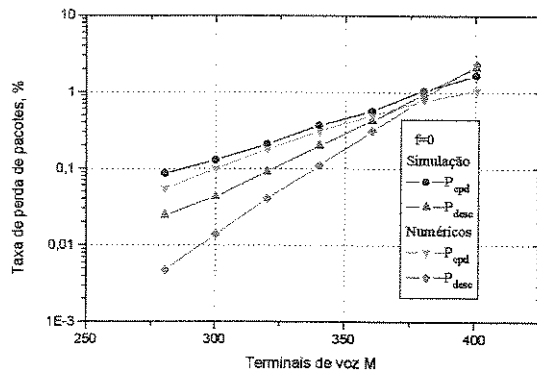
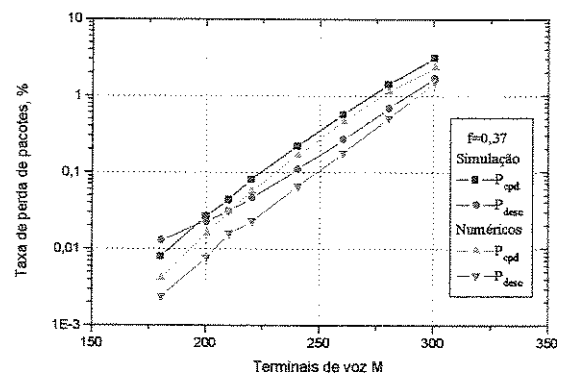


Figura 2.11a - Perda de pacotes versus terminais de voz. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20.



(2.11b)



(2.11c)

Figura 2.11- Detalhamento das componente de perda da Fig. 2.11a: (b) $f=0$; (c) $f=0,37$.

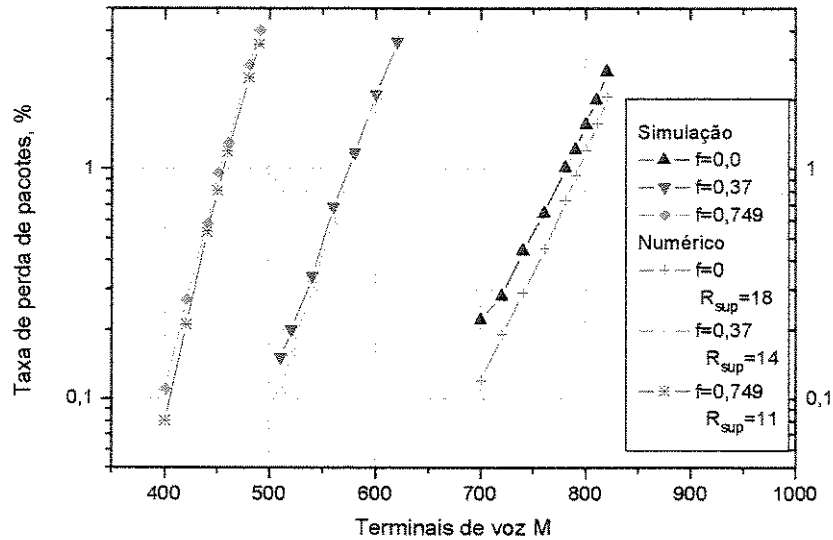
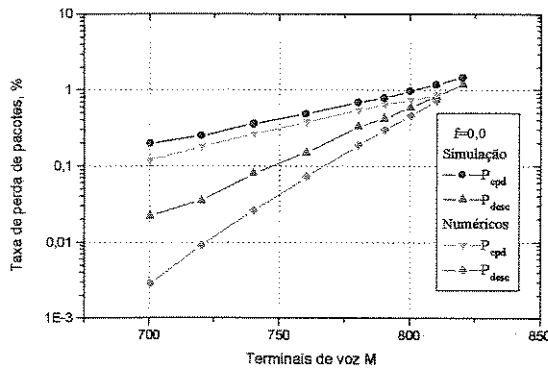
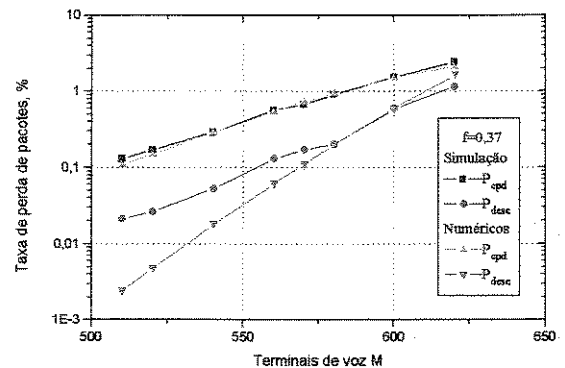


Figura 2.12a - Perda de pacotes versus terminais de voz. Configuração: FDDGp15Tq20N20D20.



(2.12b)



(2.12c)

Figura 2.12 - Detalhamento das componente de perda da Fig. 2.12a: (b) $f=0$; (c) $f=0,37$.

As figuras acima mostram que um bom nível de concordância entre os resultados numérico e os obtidos via simulação é obtido na região nominal de operação, ou seja, para uma taxa de perda de pacotes em torno de 1%. Verifica-se que em condições de baixo tráfego, a modelagem da permissão de acesso pelo seu valor médio produz resultados numéricos otimistas para o descarte de pacotes. Basicamente, isto se deve a uma maior variação em torno da média do número de usuários em reserva no canal, acarretando, como consequência direta, uma maior dispersão dos valores da permissão de acesso em relação ao seu valor médio. Entretanto, como a perda de pacotes por excesso de interferência se constitui a componente predominante na região de baixo tráfego, isto configura uma situação que não causa efeitos catastróficos nos resultados numéricos obtidos para a taxa de perda de pacotes (vide figuras 2.11a e 2.12a).

O estudo semi-analítico do protocolo CDMA/PRMA apresentado fundamenta-se em um conjunto de suposições e aproximações que são dependentes de uma ampla gama de fatores, como por exemplo, ganho de processamento, código, intensidade de tráfego, parâmetros da função de acesso, etc. Os eventos que levam à perda de pacotes, além de serem complexos, são inúmeros e dependentes do estado do sistema. Verifica-se que no mundo real o número de usuários em reserva é distinto em cada slot do quadro; que o número de usuários em acesso depende do tráfego agregado de Poisson que modela o detetor de atividade de voz; que a negativa do acesso ao canal gera um realimentação do tráfego entre distintos slots; que o efeito dos usuários em contenção na perda de pacotes é dependente do número de usuários em reserva; e assim por diante. Isto permite concluir, enfatizando-se o anteriormente dito, que o modelo numérico proposto é altamente simplificador da realidade. Por outro lado, a semelhança encontrada entre os resultados numéricos e os obtidos via simulação indicam a confiabilidade do simulador do protocolo CDMA/PRMA desenvolvido. Portanto, pode-se afirmar com extrema convicção que o objetivo do modelo numérico proposto foi alcançado. Isto posto, passa-se a fazer uso intensivo de simulação para a análise do protocolo CDMA/PRMA ao longo do trabalho. Em momentos oportunos são também mostrados resultados numéricos com vistas a ratificação da confiabilidade dos resultados obtidos via simulação.

2.9 CDMA/PRMA VERSUS CDMA/ALOHA

A Fig. 2.13 apresenta resultados obtidos via simulação para a taxa de perda de pacotes versus o número de terminais de voz para o protocolo CDMA/ALOHA (vide Seção 2.6). A Tab. 2.9 mostra a semelhança entre os valores de equilíbrio calculados analiticamente e os obtidos via simulação. Nota-se que o número médio de usuários por slot no canal é aproximadamente o valor esperado do número de usuários por slot cuja saída do DAV está no estado de fala, ou seja, $r \cong v_f \frac{M}{N}$.

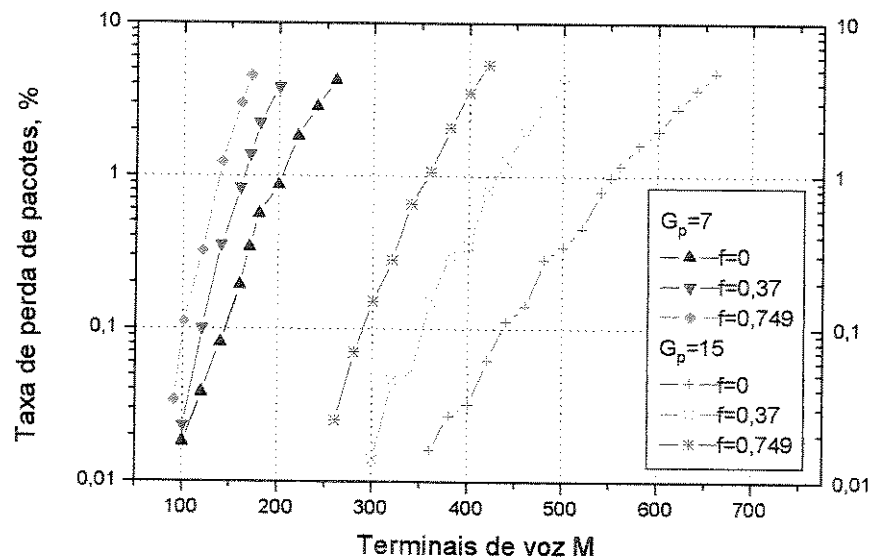
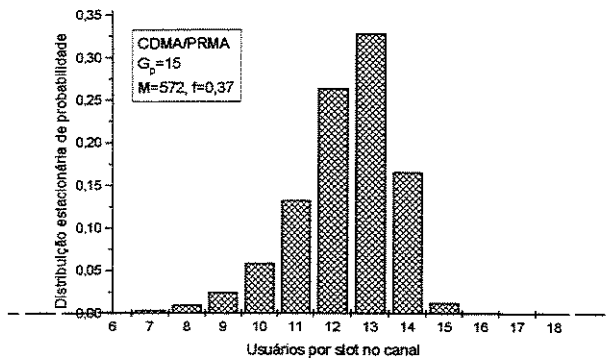


Figura 2.13 – Taxa de perda de pacotes versus o número de terminais de voz para o protocolo CDMA/ALOHA. Figura parametrizada pelo ganho de processamento e pelo fator de interferência das células externas. Configurações: FDDGpxT_q20N20D20, onde x assume 7 ou 15.

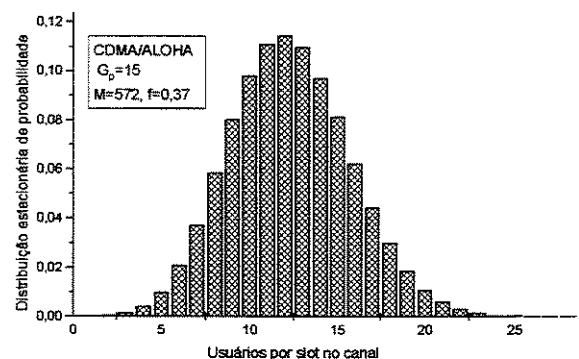
Tabela 2.9 - Comparação entre os valores de equilíbrio obtidos utilizando-se APE e simulação para o protocolo CDMA/ALOHA. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20.

f	P_{perda} %	M	APE		Simulação	
			r	s	r	s
0	0,1	145	3,10	82,96	3,13	83,50
0	1,0	200	4,30	115,62	4,28	114,42
0,37	0,1	116	2,48	66,37	2,51	66,72
0,37	1,0	161	3,44	92,11	3,46	93,02
0,749	0,1	100	2,14	57,21	2,17	57,41
0,749	1,0	137	2,93	78,38	2,94	78,27

A comparação entre as figuras 2.14a e 2.14b mostra que o controle de acesso ao meio de transmissão do protocolo CDMA/PRMA faz com que a variância do número usuários no canal seja menor do que a observada no protocolo CDMA/ALOHA. No protocolo CDMA/PRMA o valor esperado do número de usuários no canal (soma do número médio dos usuários em reserva e em contenção) é de 12,25, enquanto que o desvio padrão é de 1,29 usuários. Já no protocolo CDMA/ALOHA, o número médio de usuários no canal é de 12,31 e o desvio padrão de 3,36 usuários. O maior controle da interferência faz com que a perda média de pacotes em um sistema celular ($f=0,37$) com 572 terminais de voz seja de $\sim 1\%$ no protocolo CDMA/PRMA e de $\sim 11\%$ no protocolo CDMA/ALOHA.



(a)

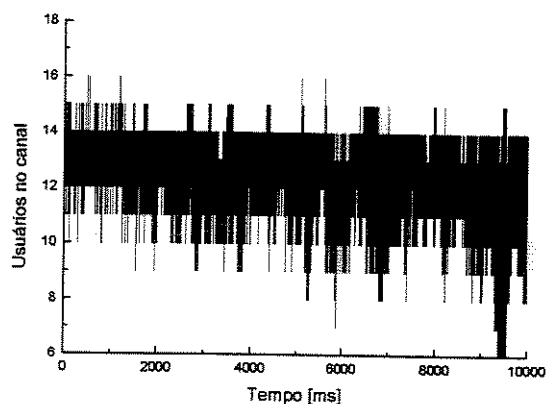


(b)

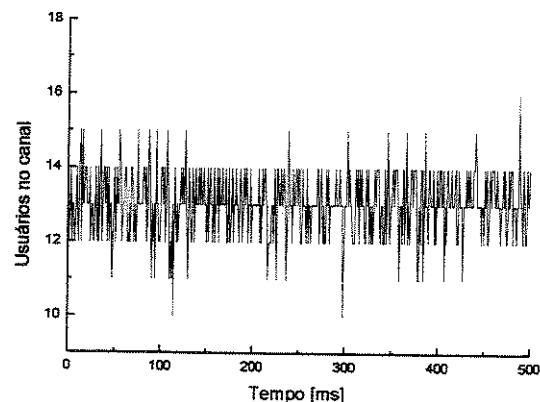
Figura 2.14 – Distribuição estacionária da probabilidade do número de usuários por slot no canal em um sistema celular ($f=0,37$) com 572 terminais de voz: (a) CDMA/PRMA; (b) CDMA/ALOHA. Configuração: FDDGp15T_q20N20D20. Função de acesso do protocolo CDMA/PRMA: Tab. B.2.1.

A figuras 2.15 e 2.16 são amostras de 10 segundos de comunicação, para um ambiente celular ($f=0,37$) com 572 usuários, em sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA, respectivamente. Ao lado de cada gráfico é detalhado os 0,5 primeiros segundos da respectiva figura. Estes resultados ilustram os efeitos da redução da variância do sinal interferente no desempenho de sistemas DS-CDMA. Tráfego do tipo Poisson possui uma

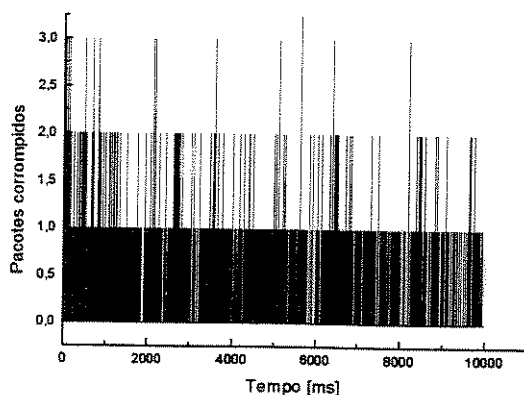
distribuição uniforme quando observado em um janela de tempo suficientemente longa. Contudo, ao diminuir-se o intervalo de observação, verifica-se surtos de alta intensidade intercalados com períodos de menor atividade [Kle75, p.64-65]. A Fig. 2.16a1 ilustra bem este fenômeno ao mostrar o efeito modulante do processo de Poisson, que modela a tráfego agregado do sistema, na carga instantânea do canal.



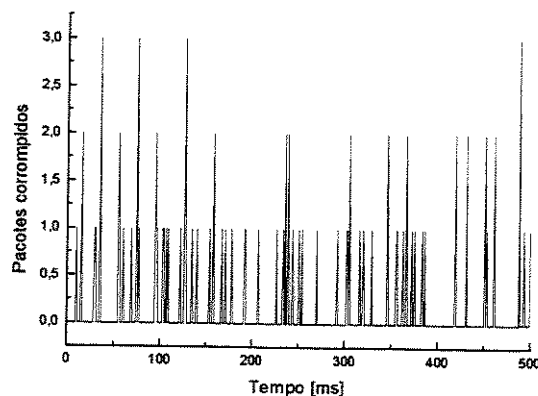
(a1)



(a2)

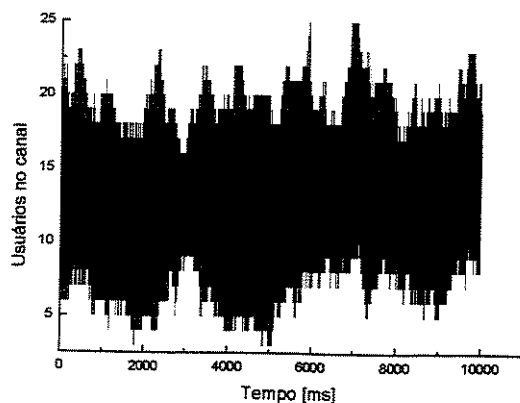


(b1)

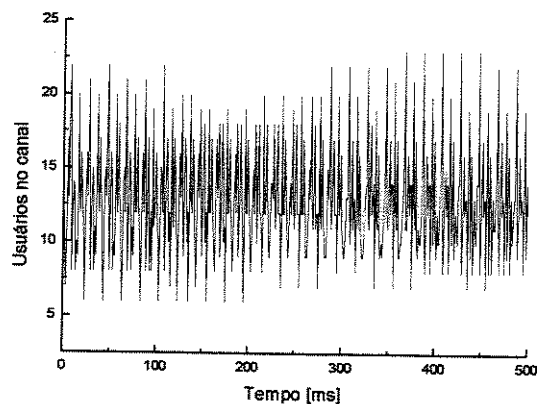


(b2)

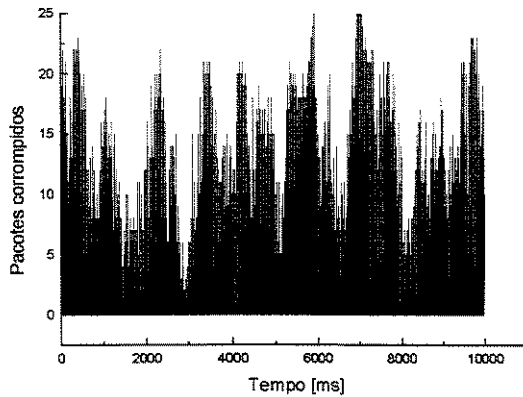
Figura 2.15 – Protocolo CDMA/PRMA carregado com 572 usuários em um sistema celular ($f=0,37$): (a) número de usuários no canal; (b) número de pacotes corrompidos. Configuração: FDDGp15T_q20N20D20.



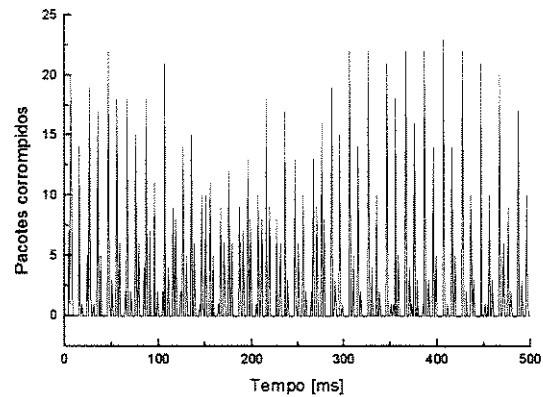
(a1)



(a2)



(b1)



(b2)

Figura 2.16 – Protocolo CDMA/ALOHA carregado com 572 usuários em um sistema celular ($f=0,37$): (a) número de usuários no canal; (b) número de pacotes corrompidos. Configuração: FDDGp15Tq20N20D20.

O teorema central do limite (TCL) afirma que quanto maior o número de eventos independentes constituintes de um processo aleatório, menor será a dispersão do processo conjunto em torno de seu valor médio [Pap91, p.227-233]. Aumentando-se o ganho de processamento de um sistema DS-CDMA, aumentar-se-á o número de usuários no canal que atendem uma dada perda de pacotes requerida. Portanto, como consequência direta do TCL, há uma menor variância da carga do canal com o aumento do ganho de processamento. Isto explica a diminuição do ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA, conforme mostra a Tab. 2.10, ao se aumentar o ganho de processamento do sistema. Por outro lado, quanto mais restritiva for a exigência de desempenho do sistema ($P_{\text{perda}}=0,1\%$), menor será o número de usuários acessando simultaneamente o canal e, por conseguinte, maior o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA.

Tabela 2.10a – Comparação da capacidade obtida pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Configuração: FDDGp7Tq20N20D20. Funções de acesso: Tab. 2.5.

	<i>Unicelular</i>			<i>Celular: $f=0,37$</i>			<i>Celular: $f=0,749$</i>		
P_{perda} %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %
0,1	303	145	108,96	216	116	86,21	173	100	73,00
1,0	358	200	79,00	264	161	63,97	209	137	52,55

Tabela 2.10b – Comparação da capacidade obtida pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Configuração: FDDGp15Tq20N20D20. Funções de acesso: Tab. B.2.1.

	<i>Unicelular</i>			<i>Celular: $f=0,37$</i>			<i>Celular: $f=0,749$</i>		
P_{perda} %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %
0,1	681	438	55,48	493	352	40,06	390	290	34,48
1,0	775	550	40,90	572	430	33,02	450	353	27,48

Tabela 2.10c – Comparação da capacidade obtida pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA.
Configuração: FDDGp31T_q20N20D20. Funções de acesso: Tab. B.2.2.

	<i>Unicelular</i>			<i>Celular: f=0,37</i>			<i>Celular: f=0,749</i>		
P_{perda} %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	Ganho %
0,1	1430	1115	28,25	1053	874	20,48	831	705	17,87
1,0	1607	1325	21,28	1180	1010	16,83	932	810	15,06

A potência interferente observada por um dado terminal em sistemas DS-CDMA é composta pela superposição das interferências interna e externa à célula a qual o usuário está conectado. A interferência externa em sistemas DS-CDMA é formada pelo somatório de um grande número de eventos independentes. Invocando-se novamente o TCL, verifica-se que a potência interferente externa em ambos protocolos, para um dado número de usuários no sistema (Eq. 2.19), é praticamente a mesma. Logo, quanto maior a parcela da interferência externa, tanto menor é a capacidade de controle da interferência do protocolo CDMA/PRMA. Conforme indica a Tab. 2.11, isto resulta na diminuição do ganho de capacidade dos sistemas CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA com o aumento do fator de interferência das células vizinhas. Em ambos protocolos, verifica-se também que a perda de capacidade devido à interferência externa apresenta uma fraca dependência com o ganho de processamento e com o nível de exigência de desempenho requerido.

Tabela 2.11a – Perda de capacidade devido à interferência externa: $f=0,37$.
Configurações: FDDGp x T_q20N20D20, onde x assume 7, 15 ou 31.

P_{perda} %	CDMA/PRMA			CDMA/ALOHA		
	$G_p=7$	$G_p=15$	$G_p=31$	$G_p=7$	$G_p=15$	$G_p=31$
0,1	% 26,03	% 27,60	% 26,36	% 20,00	% 19,63	% 21,61
1,0	26,25	26,19	26,57	19,5	21,18	23,77

Tabela 2.11b – Perda de capacidade devido à interferência externa: $f=0,749$.
Configurações: FDDGp x T_q20N20D20, onde x assume 7, 15 ou 31.

P_{perda} %	CDMA/PRMA			CDMA/ALOHA		
	$G_p=7$	$G_p=15$	$G_p=31$	$G_p=7$	$G_p=15$	$G_p=31$
0,1	% 40,75	% 42,73	% 41,88	% 31,03	% 33,79	% 36,77
1,0	41,62	41,93	42,00	31,50	35,82	38,87

A Fig. 2.17 mostra o número de terminais suportados por ambos os protocolos em função do ganho de processamento. Nos ambientes simulados, verifica-se que o número de usuários suportados pelo protocolo CDMA/PRMA para uma perda de pacotes de 0,1 % é superior ao número de usuários admissíveis no protocolo CDMA/ALOHA com uma década maior de pacotes de perdidos.

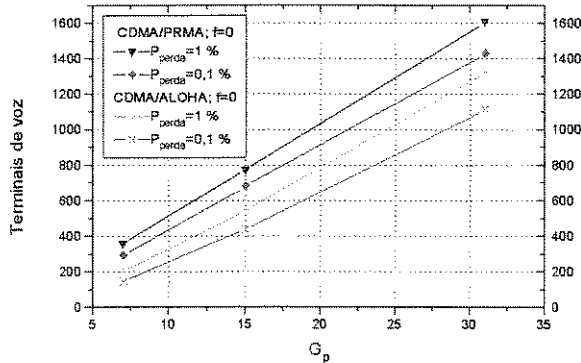


Figura 2.17a – Sistema unicelular.

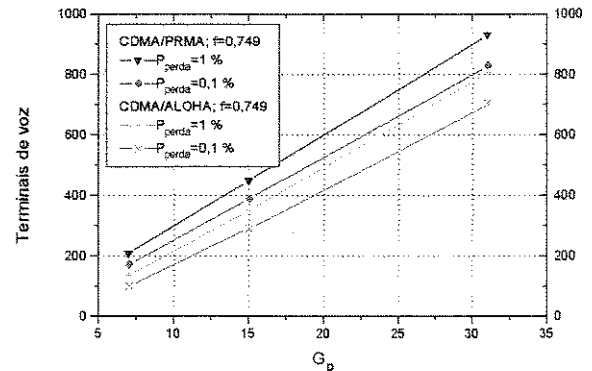
Figura 2.17b – Sistema celular com $f=0,749$.

Figura 2.17 - Número de terminais de voz suportado pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do ganho de processamento. Configurações: FDDGp $\times$ T $_q$ 20N20D20, onde x assume 7, 15 ou 31.

2.10 PROTOCOLO CDMA/FRMA

Até o presente momento foi assumido que o status à respeito da recepção dos pacotes transmitidos no canal reverso^{2.4} é recebido pelas estações móveis (EMs) antes do início do próximo slot. Assim caso a EM móvel não receba um reconhecimento positivo (ACK, do inglês *Acknowledgment*) concernente ao pacote transmitido para a obtenção de reserva, então este mesmo terminal tentará transmitir no slot subsequente^{2.5}. A fim de obter uma menor carga de sinalização no canal de controle direto, apresentar-se-á nesta seção resultados de uma variante do protocolo CDMA/PRMA, rotulada como CDMA/FRMA (Frame Reservation Multiple Access). Neste protocolo, as informações de controle são transmitidas antes do final de cada quadro. Nota-se que neste caso, um dado terminal pode acessar o canal para a obtenção de reserva somente uma vez a cada quadro.

A taxa de pacotes descartados por excesso de atraso pode ser composta pela soma de duas componentes: (i) pacotes que não conseguiram acessar o canal (P_{no-acs}); (ii) pacotes que conseguiram acessar o canal pelo menos uma vez, mas não foram recebidos com sucesso (P_{acs}). Para as configurações de projeto considerados até o momento, a Tab. 2.12 mostra que a falha na obtenção da reserva nos protocolos CDMA/PRMA (CDMA/FRMA) se dá principalmente pelo insucesso na obtenção da permissão de acesso ao canal e não pelo evento conjunto acesso ao canal e pacote corrompido devido à IMA. Isto explica o desempenho semelhante de ambos os protocolos, na medida em que a sinalização “instantânea” encontrada no protocolo CDMA/PRMA não se traduz em uma menor taxa de perda de pacotes descartados. Relembra-se que a perda total de pacotes (P_{perda}) obedece à seguinte igualdade: $P_{perda} = P_{cpd} + P_{desc} = P_{cpd} + P_{no-acs} + P_{acs}$, onde P_{cpd} é a taxa de pacotes perdidos devido ao excesso de interferência. Finalmente, relembra-se que, para evitar variações temporais no recebimento dos pacotes pela ERB (*jitter do atraso*), os pacotes corrompidos após a

^{2.4} Esta informação de controle é transmitida pela ERB em um canal de controle direto, onde os possíveis erros desta transmissão são ignorados.

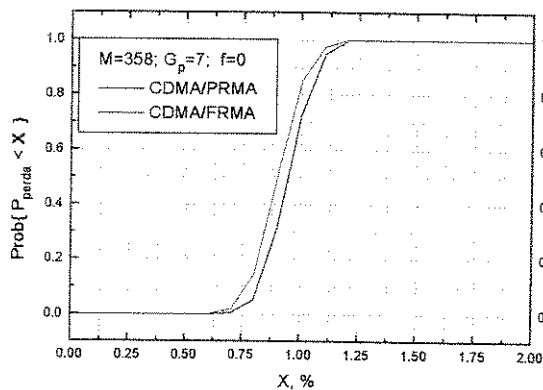
^{2.5} Nota-se que foi assumido que a atividade de voz não tenha expirado, ou seja, que ainda existem pacotes a serem transmitidos no corrente surto de fala. Caso contrário, a EM retorna para o estado de silêncio.

obtenção da reserva não são retransmitidos.

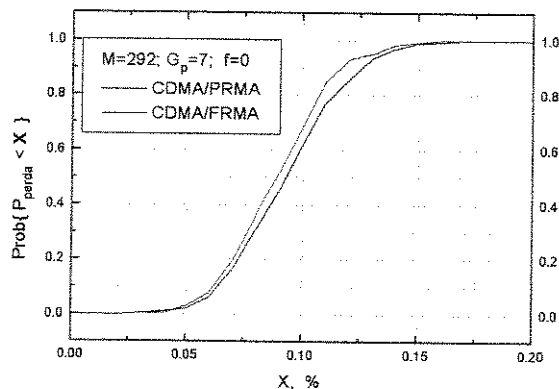
Tabela 2.12 – Detalhamento das componentes da taxa de pacotes descartados nos protocolos CDMA/PRMA (1ª linha) e CDMA/FRMA (2ª linha). Configurações: FDDGp $\times$ T_q20N20D20, onde x assume 7 e 31. Funções de acesso: Tab. 2.5 e Tab. B.2.2.

Unicelular					Celular: $f=0,749$				
G_p	M	P_{perda}	P_{no-acs}	P_{acs}	G_p	M	P_{perda}	P_{no-acs}	P_{acs}
7	292	%	%	%	7	173	%	%	%
		0,093	0,052	0,00038			0,092	0,030	0,000055
		0,086	0,048	0,000051			0,086	0,030	0,000028
7	358	0,93	0,38	0,0085	7	209	1,0	0,31	0,01
		0,88	0,36	0,046			0,94	0,30	0,0025
31	1430	0,085	0,045	0,0001	31	831	0,088	0,044	0,000097
		0,083	0,044	0,000058			0,088	0,045	0,000029
31	1607	1,0	0,37	0,01	31	932	0,98	0,23	0,0052
		0,92	0,34	0,003			0,94	0,22	0,0020

As Fig. 2.18a e 2.18b mostram um alto grau de semelhança entre as distribuições de probabilidade da perda de pacotes para ambos protocolos em distintas exigências de desempenho. Nestas figuras, o tempo de comunicação simulado é de 1000 segundos. O maior nível de exigência de desempenho, como era de se esperar, produz uma maior dispersão relativa da taxa de perda de pacotes em relação ao valor médio.



(a)



(b)

Figura 2.18 – Função distribuição de probabilidade da perda de pacotes para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/FRMA: (a) $M=358$, $G_p=7$, $f=0$; (b) $M=292$, $G_p=7$, $f=0$. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20. Funções de acesso: Tab. 2.5.

A Fig. 2.19 mostra a variação, em função do tempo de comunicação, da dispersão da taxa de perda de pacotes em torno de seu valor médio para o protocolo CDMA/FRMA. Na Fig.2.19a, verifica-se que 99% dos terminais tem uma perda de pacotes abaixo de 1,5% e de 1,2% ao se considerar tempos de comunicação de 180 s e 1000 s, respectivamente. Para uma perda média de pacotes de 0,1% (Fig. 2.19b), observa-se que 99%

dos terminais tem uma perda de pacotes abaixo de 0,26% e de 0,22% para tempos de comunicação de 240 s e 1000 s, respectivamente.

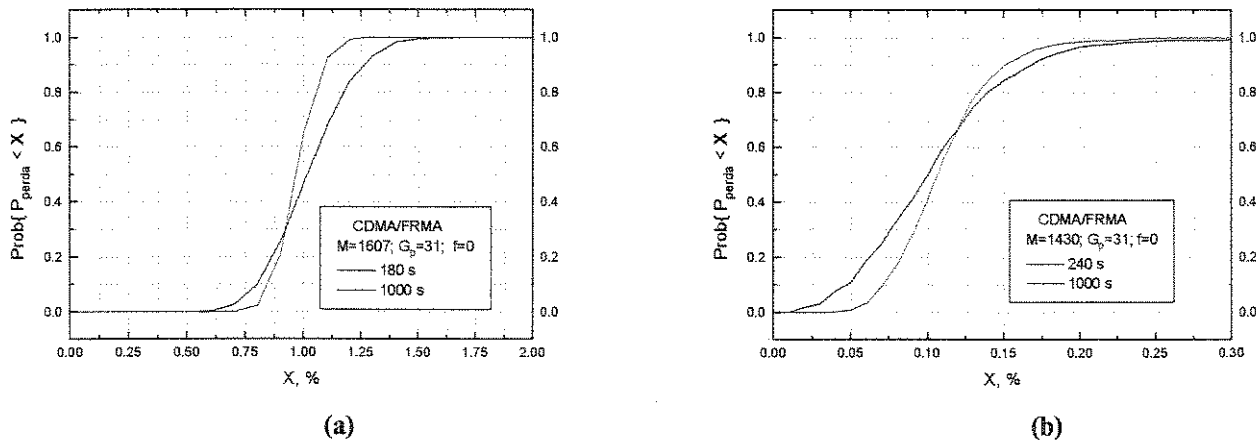


Figura 2.19 – Função distribuição de probabilidade da perda de pacotes, parametrizada pelo tempo de comunicação, para o protocolo CDMA/FRMA: (a) $M=1607, G_p=31, f=0$; (b) $M=1430, G_p=31, f=0$. Configuração: FDDGp31Tq20N20D20. Funções de acesso: Tab. B.2.2.

2.11 CDMA/PRMA VERSUS CDMA/ALOHA: DISPERSÃO DA TAXA DE PERDA DE PACOTES EM TORNO DE SEU VALOR MÉDIO

O acesso controlado encontrado no protocolo CDMA/PRMA faz com que este sistema apresente uma menor dispersão da taxa da perda de pacotes em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Na Fig. 2.20a (2.20b) observa-se que 99% dos terminais de voz tem uma perda de pacotes abaixo de 1,4% (1,5%) para o protocolo CDMA/PRMA e abaixo de 2,4% (2,2%) para protocolo CDMA/ALOHA. Para ambos os protocolos, a perda média de pacotes é de aproximadamente 1% nos casos considerados. Finalmente, observa-se que a capacidade do protocolo CDMA/ALOHA com ganho de processamento de 31 diminui de 1325 para 1321 devido a redução do tempo de simulação de 1000s para 180s.

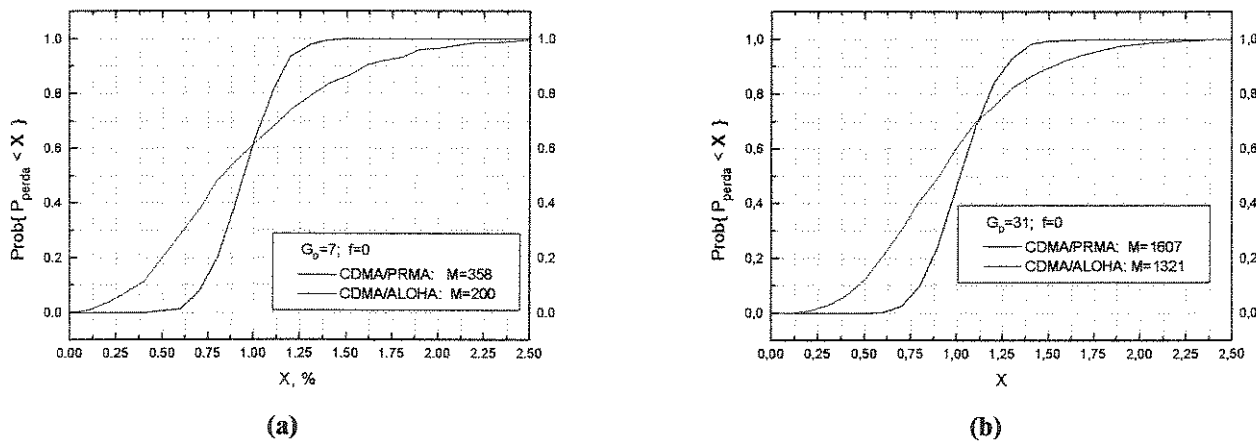
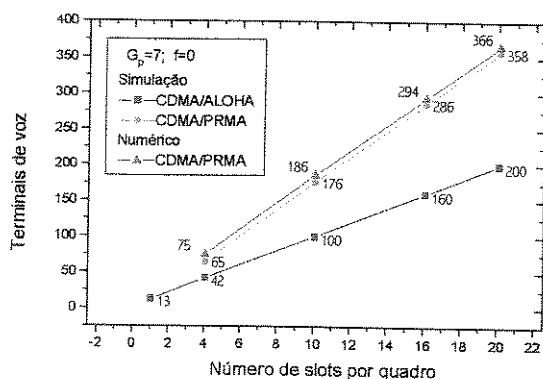


Figura 2.20 – Função distribuição de probabilidade da perda de pacotes para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA: (a) $G_p=7, f=0$; (b) $G_p=31, f=0$. Tempo de comunicação de 180 segundos. Configurações: FDDGpxTq20N20D20, onde x assume 7 ou 31. Funções de acesso: Tab. 2.5 e Tab. B.2.2.

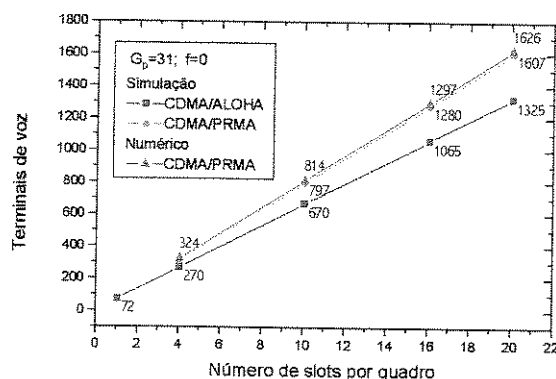
2.12 EFEITOS DA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE SLOTS NA CAPACIDADE DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA

Investiga-se agora os efeitos da variação do número de slots por quadro na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Nesta análise são mantidos os parâmetros básicos da configuração definida na Seção 2.4. Portanto, ao se manter o período do quadro em 20 ms, o número de slots por quadro afeta a largura de faixa necessária para a obtenção de um dado ganho de processamento. Para 20 slots por quadro, por exemplo, o código de bloco linear empregado, BCH(511,229,38) demanda uma taxa de chips de 3,577 Mcps e de 15,841 Mcps para ganhos de processamento de 7 e de 31, respectivamente. Reduzindo-se o número de slots por quadro de 20 para 10, então ganhos de processamento de 7 e 15 demandam agora taxas de 1,7885 Mcps e de 7,9205 Mcps ($R_c = \frac{G_p n N}{T_q} = \frac{31 \times 511 \text{ bits} \times 10}{20 \text{ ms}} =$), respectivamente.

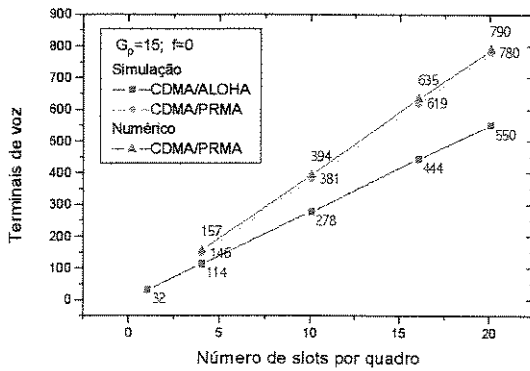
As Fig. 2.21a a 2.21d mostram o número de usuários suportados pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA como função do número de slots por quadro para uma taxa média de perda de pacotes de 1%. A Tab. B.2.3, localizados no anexo B, explicita os parâmetros das funções de acesso empregadas. Observa-se que para um único slot por quadro e com o atraso máximo equivalente ao período de quadro, o protocolo CDMA/PRMA se reduz ao protocolo CDMA/ALOHA. Os resultados numéricos mostrados utilizam δ_2+1 como limitante superior dos usuários no estado de reserva, onde os valores de equilíbrio são imediatamente obtidos pela resolução das equações (2.26) a (2.30). Novamente, observa-se um razoável nível de concordância com os dados obtidos via simulação. Em ambos protocolos, a capacidade, o número de usuários de voz suportado para uma dada perda de pacotes, apresentam um comportamento diretamente proporcional e linear por partes com o número de slots por quadro.



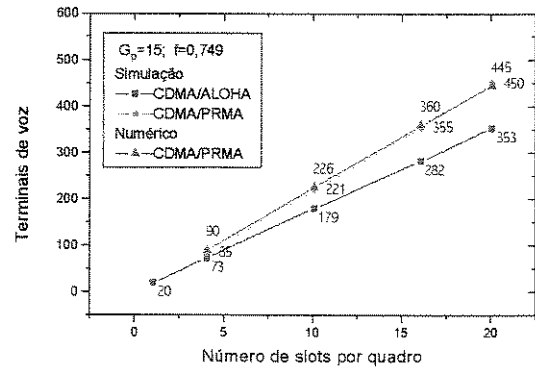
(2.21a)



(2.21b)



(2.21c)



(2.21d)

Figura 2.21 – Número de terminais de voz suportados pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do número de slots por quadro: (a) $G_p=7$, $f=0$; (b) $G_p=31$, $f=0$; (c) $G_p=15$, $f=0$; (d) $G_p=15$, $f=0,749$. Configurações: FDDGpxT_q20NyDy, onde x assume os valores de 7, 15 ou 31, sendo que y pode valer 1, 5, 10, 16 ou 20 slots.

A Tab. 2.13 mostra que o ganho de capacidade do protocolos CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA decresce com a diminuição do número de slots por quadro. Isto porque a diminuição do número de slots por quadro no protocolo CDMA/PRMA leva à redução da capacidade de absorção dos surtos de atividade de voz do tráfego agregado do tipo Poisson. Nota-se que tal fenômeno supera a perda de capacidade que também ocorre no protocolo CDMA/ALOHA. Neste caso, devido à maior variação relativa da carga do canal com a diminuição do número de usuários no sistema.

Tabela 2.13 – Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA como função do número de slots por quadro, ganho de processamento e fator de interferência das células vizinhas. Função de acesso otimizada para perda de pacotes de 1%. Configurações: FDDGpxT_q20NyDy, onde x assume os valores de 7, 15 ou 31, sendo que y pode valer 4, 10, 16 ou 20.

N	$G_p=7; f=0$	$G_p=31; f=0$	$G_p=15; f=0$	$G_p=15; f=0,749$
	%	%	%	%
20	79,00	21,28	41,82	27,48
16	78,75	20,19	39,41	25,88
10	76,00	18,95	37,05	23,46
4	54,76	14,07	28,07	16,44

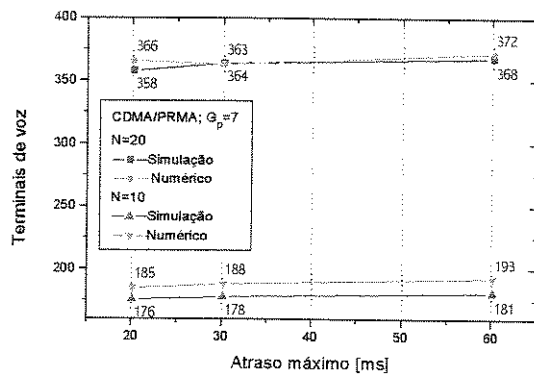
2.13 EFEITOS DO ATRASO MÁXIMO PERMISSÍVEL DOS PACOTES DE VOZ NA CAPACIDADE DO PROTOCOLO CDMA/PRMA

No protocolo CDMA/PRMA, a especificação do atraso máximo permitido influi diretamente no número de slots disponíveis para a obtenção de reserva antes do pacote de voz ser descartado, ou seja,

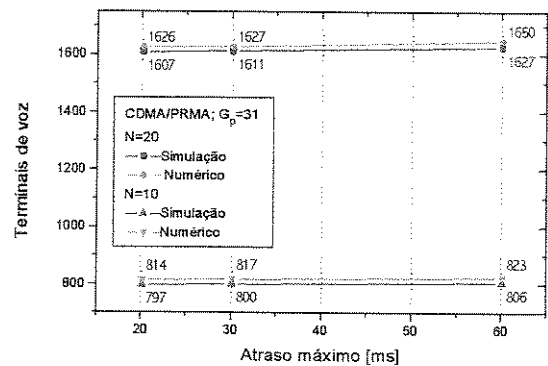
$$D = \left\lceil \frac{T_d}{T_q/N} \right\rceil \quad (2.43)$$

onde $\lceil x \rceil$ é o maior inteiro menor ou igual a x e T_d é o atraso máximo permitido.

Extensivas simulações, exemplificadas pela Fig. 2.22 (parâmetros da função de acesso especificados na Tab. B.4), mostram uma mínima influência do atraso na capacidade do sistema CDMA/PRMA, perda de perda de pacotes máxima de 1%, para diferentes níveis de tráfego. Isto indica que a diminuição do percentual de pacotes descartados com o aumento do atraso é contrabalançado pelo aumento do percentual de pacotes corrompidos mesmo quando se considera um leve aumento da carga no sistema. Em outras palavras, pode-se afirmar que a taxa de pacotes descartados não constitui o fenômeno principal da perda de pacotes. Estas figuras novamente evidenciam a razoável semelhança entre os resultados numéricos e os obtidos via simulação.



(a)



(b)

Figura 2.22 – Número de terminais suportados pelo protocolos CDMA/PRMA em função do atraso máximo permitido dos pacotes de voz para uma taxa de perda de pacotes de 1%: (a) $G_p=7$, $f=0$; (b) $G_p=31$, $f=0$. Configurações: $FDDG_p x T_q 20 N y D z$, onde x assume os valores de 7 ou 31; y pode valer 10 ou 20 slots; z assume 10, 15, 20, 30 ou 60 slots.

2.14 EFEITOS DA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE USUÁRIOS EM RESERVA NA CAPACIDADE DO PROTOCOLO CDMA/PRMA

Até o presente momento, foi idealizado que a ERB determinava de maneira exata o número de usuários em reserva com a finalidade de calcular as permissões de acesso para cada slot. Neste processo, dois aspectos podem ser ressaltados: (i) um primeiro diz respeito a que tal suposição leva a um aumento da capacidade pela desconsideração dos efeitos da IMA no cômputo das permissões de acesso; (ii) um segundo se refere ao fato de se levar em conta o último pacote do surto de voz no cálculo das probabilidades de acesso, quando na verdade esta EM não transmitirá no próximo quadro. Nesta Seção é proposto e simulado um algoritmo factível para a determinação do número dos usuários em reserva.

No cabeçalho de cada pacote é utilizado um campo de dois bits para indicar o tipo de pacote de voz: (i) 00 (pacote utilizado para obter a reserva); (ii) 01 (pacote transmitido não é o primeiro nem o último do corrente surto de atividade de voz); (iii) 10 (último pacote do surto de atividade de voz); (iv) 11 (pacote sem informação de voz utilizado para liberar os recursos reservados). A ERB contém um contador do

número de usuários para cada slot. Este contador é incrementado no caso da recepção com sucesso de um pacote do tipo 00 e decrementado na recepção com sucesso de um pacote do tipo 10 ou 11. A transmissão deste último pacote é necessária no caso do pacote 10 não ser decodificado com sucesso pela ERB. A EM transmitirá o pacote 11, caso não receba um reconhecimento da transmissão do pacote 10.

A Tab. 2.14 mostra que o algoritmo descrito nessa Seção permite obter resultados semelhantes aos obtidos anteriormente (mostrados entre parênteses). As funções de acesso empregadas são as mesmas definidas anteriormente. Basicamente, o pequeno incremento na capacidade se deve a liberação dos recursos pela transmissão do pacote 10 e a pequena frequência da transmissão dos pacotes 11 devido ao baixo percentual de pacotes corrompidos.

Tabela 2.14 – Efeitos da determinação do número de usuários em reserva na capacidade do protocolo CDMA/PRMA. Análise parametrizada pelo percentual máximo de pacotes perdidos e pelo ganho de processamento. Configuração: $FDDG_{pxT_q20N20D20}$, onde x assume 7 ou 15.

G_p	$P_{loss}=0,1 \%$	$P_{loss}=1,0 \%$
7	299 (303)	362 (358)
15	682 (681)	783 (775)

A partir desse momento será empregado o algoritmo descrito nesta Seção nas simulações dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/FRMA.

2.15 PROTOCOLO CDMA/PRMA COM DETETOR DE ATIVIDADE DE VOZ DE TRÊS ESTADOS

A Eq. (2.27) mostra que o valor de equilíbrio do número de usuários em contenção pode ser obtido em função do valor de equilíbrio do número de usuários no estado de acesso, da função de acesso e dos parâmetros do detetor de atividade de voz. Portanto, com o intuito de simplificar a modelagem, a máquina de estados proposta para o terminal de voz CDMA/PRMA com detetor de três estados, mostrada na Fig. 2.23, considera somente os estados de silêncio, mini-silêncio, acesso e reserva, mas não o de contenção. A dinâmica desta máquina de estados é semelhante à introduzida na Seção 2.6 para terminais de voz com detetores de dois estados. Contudo, no caso aqui analisado, um terminal no estado de reserva ou de acesso pode ir para o estado de silêncio principal (SIL_P), ou mini-silêncio (SIL_M), e não somente para o estado de silêncio como na Fig. 2.5. Por exemplo, um usuário no estado RES_0 vai para o estado SIL_P , caso o último mini-surto da corrente atividade de voz tenha terminado no quadro anterior. Isto ocorre com probabilidade dada por (vide Seção 2.2)

$$\gamma_{Pq} = \gamma_t \gamma_q = \gamma_t \left(1 - (1 - \gamma_M)^N\right) \quad (2.44)$$

Correspondentemente, a probabilidade de que uma EM no estado RES_0 mude para o estado SIL_M é dada por

$$\gamma_{Mq} = (1 - \gamma_t) \gamma_q \quad (2.45)$$

Os valores de equilíbrio do sistema podem ser obtidos através da resolução numérica do seguinte sistema de equações não-lineares:

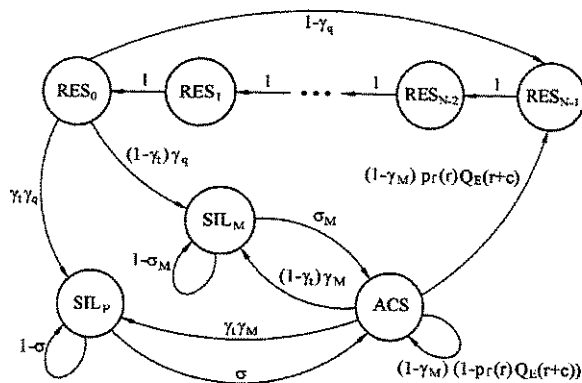


Figura 2.23 – Modelo de terminal de voz para o protocolo CDMA/PRMA com detetor de atividade de voz de três estados.

$$r \gamma_t \gamma_q + a \gamma_t \gamma_M = s_P \sigma \quad (2.46)$$

$$r (1 - \gamma_t) \gamma_q + a (1 - \gamma_t) \gamma_M = s_M \sigma_M \quad (2.47)$$

$$a (1 - \gamma_M) p_f(r) Q_E(r + c) = r \gamma_q \quad (2.48)$$

$$r_0 = r_1 = \dots = r_{N-1} = r \quad (2.59)$$

$$s_P + s_M + a + r N = M \quad (2.50)$$

onde os números reais s_P e s_M denotam os valores de equilíbrio das variáveis de estado SIL_P e SIL_M , respectivamente. As demais variáveis seguem notação definida na Seção 2.6.

As mesmas equações desenvolvidas na subseção 2.8.2, análise de sistemas com detetores de dois estados, podem ser imediatamente aplicadas no caso aqui analisado. O número médio de usuários em contenção, c , pode ser obtido pela seguinte relação

$$c = a (1 - \gamma_M) p_s(r) \approx a p_s(r) \quad (2.51)$$

Utilizando os parâmetros de projeto definidos na Seção 2.4, a Tab. 2.15 confronta os valores de equilíbrio obtidos numericamente com os estimados via simulação. A análise cuidadosa destes dados ratifica a modelagem empregada sob as mais variadas condições operacionais. A atividade de voz obtida por ambas as metodologias está por volta de ~37,5%, ou seja, um pouco maior que o valor médio teórico de 36,8 % (veja Tab. 2.1). O número médio de usuários em reserva por quadro é o produto do número médio de usuários em reserva por slot pelo número de slots por quadro. Logo, uma pequena discrepância entre os valores numéricos e os estimados via simulação pode conduzir a um erro maior para os demais estados do sistema.

Tabela 2.15 - Valores de equilíbrio obtidos via simulação e pela APE. Função de permissão de acesso otimizada para perda de pacotes de 1% em sistemas CDMA/PRMA com detetor de três estados. Perda de pacotes obtida via simulação.

Tabela 2.15a - Configuração: FDDGp7Tq20N20D20.

f	P_{perda} %	M	Simulação				APE			
			r	a	s_P	s_M	r	a	s_P	s_M
0	0,1	272	4,98	1,17	159,06	12,22	5,06	1,04	157,49	12,23
0	1,0	385	7,0	2,80	224,16	17,98	7,08	3,10	222,97	17,31
0,37	0,1	222	4,07	1,04	129,59	9,98	4,12	1,13	128,55	9,98
0,37	1,0	289	5,24	2,13	168,28	13,60	5,30	2,48	167,37	13,00
0,749	0,1	182	3,34	0,89	106,04	8,23	3,37	1,01	105,39	8,18
0,749	1,0	229	4,16	1,64	133,30	10,84	4,21	1,94	132,62	10,30

Tabela 2.15b - Configuração: FDDGp15T_q20N20D20.

<i>f</i>	<i>P_{perda}</i> %	<i>M</i>	<i>Simulação</i>				<i>APE</i>			
			<i>r</i>	<i>a</i>	<i>s_P</i>	<i>s_M</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>s_P</i>	<i>s_M</i>
0	0,93	863	15,70	5,36	502,97	40,58	15,89	6,55	499,76	38,81
0,37	0,94	635	11,55	5,49	369,0	29,45	11,56	7,43	367,78	28,56
0,749	0,93	504	9,17	3,53	293,28	23,68	9,26	4,17	291,87	22,67

Tabela 2.15c - Configuração: FDDGp31T_q20N20D20.

<i>f</i>	<i>P_{perda}</i> %	<i>M</i>	<i>Simulação</i>				<i>APE</i>			
			<i>r</i>	<i>a</i>	<i>s_P</i>	<i>s_M</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>s_P</i>	<i>s_M</i>
0	0,9	1798	32,79	10,04	1046,61	85,52	33,28	10,26	1041,15	80,86
0,37	0,98	1336	24,36	8,50	776,58	63,56	24,64	9,46	773,66	60,09
0,749	0,9	1050	19,12	7,01	611,13	49,54	19,26	9,30	608,08	47,22

Os parâmetros da função de acesso empregados podem ser obtidos no anexo B, Tab. B.2.5. Esta evidência que a maior dinâmica do sistema (maior frequência no processo de obtenção/liberação de recursos devido ao menor tempo médio de atividade de voz) torna mais difícil a determinação heurística dos parâmetros da função de acesso. Como consequência, há uma maior discrepância, em relação a sistemas com detetores de dois estados, entre a capacidade obtida com as permissões de acesso determinadas pelo critério a posteriori pela média e a capacidade obtida por meio da função de acesso.

Empregando as expressões numéricas desenvolvidas na subseção 2.8.2 para $R_{\text{sup}} = \delta_2 + 1$, a Tab. 2.16 mostra resultados concementes ao desempenho do protocolo CDMA/PRMA. A fim de fornecer subsídios para um adequado julgamento do modelo numérico proposto, enfatiza-se que um sistema CDMA/PRMA com detetor de três estados é caracterizado pela configuração de $N + 3$ variáveis de estado

$$\Omega = \{S_P, S_M, A, R_0, R_1, \dots, R_{N-1}\} \quad (2.52)$$

onde S_P e S_M é o número de terminais nos estados de silêncio principal e de mini-silêncio, respectivamente. Assumindo que o número máximo de usuários em reserva é $\delta_2 + 1$, então o número de estados possíveis é da ordem $M^3(\delta_2 + 1)^N$. Isto posto, pode-se concluir que os resultados obtidos por meio de uma máquina de apenas quatro estados ratificam as conclusões anteriores, ou seja, a modelagem empregada cumpre fidedignamente, no mínimo, o propósito de ser um instrumento de análise qualitativa e de validação dos resultados obtidos via simulação (vide Seção 2.8).

Tabela 2.16 – Resultados numéricos e estimados via simulação para a taxa de pacotes corrompidos e descartados. Função de acesso otimizada para uma perda de pacotes de 1% com DAVde três estados. Funções de acesso: Tab. B.2.5.

Tabela 2.16a - Configuração: FDDGp7T_q20N20D20.

<i>f</i>	<i>Simulação</i>				<i>Numéricos</i>			
	<i>M</i>	<i>P_{perda} %</i>	<i>P_{cpd} %</i>	<i>P_{desc} %</i>	<i>M</i>	<i>P_{perda} %</i>	<i>P_{cpd} %</i>	<i>P_{desc} %</i>
0	385	0,95	0,68	0,27	388	0,96	0,71	0,25
0,37	289	0,96	0,67	0,29	287	0,98	0,71	0,28
0,749	229	0,98	0,72	0,26	224	0,98	0,76	0,22

Tabela 2.16b - Configuração: FDDGp15T_q20N20D20.

<i>f</i>	<i>Simulação</i>				<i>Numéricos</i>			
	<i>M</i>	<i>P_{perda} %</i>	<i>P_{cpd} %</i>	<i>P_{desc} %</i>	<i>M</i>	<i>P_{perda} %</i>	<i>P_{cpd} %</i>	<i>P_{desc} %</i>
0	863	0,93	0,76	0,17	854	0,93	0,81	0,12
0,37	635	0,94	0,48	0,46	622	0,92	0,45	0,50
0,749	504	0,93	0,68	0,24	492	0,96	0,77	0,16

Tabela 2.16c - Configuração: FDDGp31T_q20N20D20.

<i>f</i>	<i>Simulação</i>				<i>Numéricos</i>			
	<i>M</i>	<i>P_{perda} %</i>	<i>P_{cpd} %</i>	<i>P_{desc} %</i>	<i>M</i>	<i>P_{perda} %</i>	<i>P_{cpd} %</i>	<i>P_{desc} %</i>
0	1798	0,90	0,79	0,11	1762	0,90	0,89	0,01
0,37	1336	0,98	0,80	0,18	0,98	0,98	0,96	0,02
0,749	1050	0,90	0,69	0,21	1020	0,91	0,81	0,1

2.15.1 Efeitos do ganho de processamento na capacidade do sistema

As tabelas 2.17a (permissões de acesso obtidas pelo critério a posteriori) e 2.17b (funções de acesso heurísticamente otimizadas) mostram o ganho de capacidade devido à menor atividade de voz. Verifica-se que o incremento na capacidade apresenta pouca sensibilidade com o ganho de processamento e com a interferência externa, quando as permissões de acesso são fornecidas pelo critério a-posteriori. Entretanto, com o uso da função de acesso, observa-se que o ganho de capacidade torna-se inferior com um ganho de processamento de sete. A influência do aumento da carga nominal do sistema na obtenção de um maior sucesso no processo de otimização dos parâmetros da função de acesso se deve aos efeitos da lei dos grande números no tráfego agregado do sistema. Em outras palavras, uma maior carga no sistema faz com que o número de terminais em cada um dos estados do detetor de atividade de voz (silêncio, mini-silêncio e fala) apresente uma menor dispersão em relação aos seus valores de equilíbrio. Como consequência, o tráfego de entrada agregado é mais estável, permitindo assim que uma maior capacidade seja alcançada ao se utilizar as permissões de acesso heurísticamente otimizadas. Note que as permissões de acesso obtidas pelo critério a-posteriori se adaptam instantaneamente à carga instantânea do sistema. Finalmente, é importante ressaltar a

influência do gradiente da taxa de perda de pacotes corrompidos na região de operação nominal do sistema (vide Tab. 2.3), na menor ou maior restrição das probabilidades de acesso.

Tabela 2.17 – Ganho de capacidade devido ao uso de DAV de três estados no protocolo CDMA/PRMA. Taxa de perda de pacotes de ~1%. Configuração: $FDDG_{px}T_q20N20D20$, onde x pode assumir 7, 15 ou 31.

Tabela 2.17a - Permissões de acesso obtidas pelo critério a posteriori.

<i>Ambiente</i>	<i>Unicelular; $f=0$</i>			<i>Celular; $f=0,37$</i>			<i>Celular; $f=0,749$</i>		
<i>Detetor de voz</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>
G_p									
7	362	414	14,36	268	309	15,30	217	248	14,29
15	786	894	13,74	580	665	14,65	452	521	15,26
31	1620	1885	16,35	1195	1368	14,47	936	1077	15,06

Tabela 2.17b - Permissões de acesso obtidas via função de acesso, Tab. B.2.5.

<i>Ambiente</i>	<i>Unicelular; $f=0$</i>			<i>Celular; $f=0,37$</i>			<i>Celular; $f=0,749$</i>		
<i>Detetor de voz</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>
G_p									
7	358	385	7,54	264	289	8,65	209	229	9,56
15	775	863	11,35	572	635	11,01	450	504	12,0
31	1607	1798	11,88	1180	1336	13,22	932	1050	12,66

Comparando as tabelas 2.11 e 2.18, verifica-se que a perda de capacidade devido a interferência externa independe do tipo de detetor de atividade de voz empregado no protocolo conjunto CDMA/PRMA, assim como do ganho de processamento.

Tabela 2.18 – Perda de capacidade devido a interferência externa nos sistemas CDMA/PRMA com DAV de três estados.

G_p	$f=0,37$	$f=0,749$
7	% 24,93	% 40,51
15	26,42	41,55
31	25,69	41,60

2.15.2 Efeitos do número de slots por quadro na capacidade do sistema

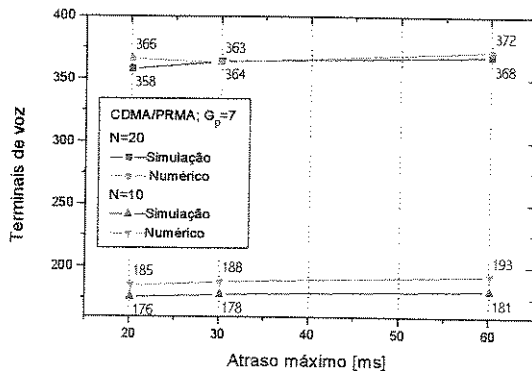
Analogamente à Seção 2.12, as configurações aqui estudadas mantêm o atraso máximo permissível em um quadro. Logo, ocorre uma diminuição do número de slots, nos quais um terminal de voz no estado de acesso pode obter sua reserva antes de haver descarte de pacotes. A Tab. 2.19 mostra que projetando o sistema com um número de slots por quadro que possibilite a absorção dos surtos do tráfego agregado de entrada do sistema, haverá apenas uma pequena diminuição da capacidade relativa devido à diminuição do número de slots por quadro.

Tabela 2.19 – Capacidade do sistema CDMA/PRMA unicelular, estimada via simulação (primeira linha) e numericamente calculada (segunda linha), para uma taxa média de perda de pacotes de ~1%. Valores parametrizados pelo ganho de processamento, pelo número de slots por quadro e pelo tipo de detetor de atividade de voz. Configuração: $FDDGp7Tq20N20D20$, onde x pode valer 7 ou 15; y pode assumir 4, 10, 16 ou 20 slots. Funções de acesso: Tab. B.2.6.

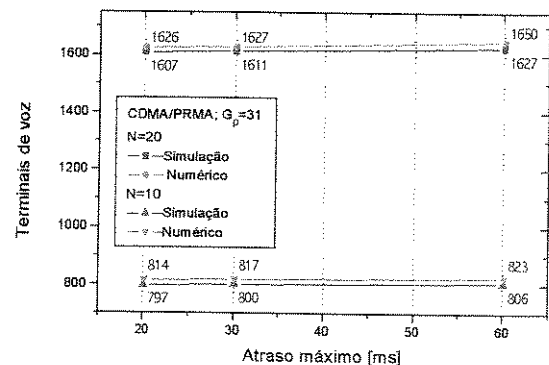
$f=0$	$G_p=7$			$G_p=15$		
Detetor de voz	Dois estados	Três estados	Ganho %	Dois estados	Três estados	Ganho %
$N=20$	358	385	7,54	775	863	11,35
	365	388	6,30	790	854	8,10
$N=16$	286	310	8,39	619	687	10,98
	293	313	6,82	635	686	8,03
$N=10$	176	185	5,11	381	422	10,76
	185	197	6,48	394	428	8,63
$N=4$	65	69	6,15	146	158	8,22
	75	79	5,33	157	170	8,28

2.15.3 Efeitos do atraso máximo dos pacotes de voz na capacidade do sistema

A Fig. 2.24 mostra que o aumento do atraso máximo permissível para os pacotes de voz conduz a um pequeno incremento na capacidade do protocolo CDMA/PRMA com detetor de três estados. Com efeito, isto se deve ao maior sucesso no processo de otimização dos parâmetros da função de acesso (Tab. B.2.7) devido à facilitação da absorção dos surtos de tráfego pelo aumento do atraso admissível. Nota-se que este aumento de atraso permite que se trabalhe com funções de acesso mais restritivas. Em decorrência, por um lado, ocorre uma diminuição da taxa de perda de pacotes devido à IMA; por outro lado, o aumento do atraso não acarreta que essa maior restrição se traduza em um aumento na taxa de pacotes descartados.



(a) Configurações: $FDDGp7Tq20NyDz$, onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 10, 15 ou 30 slots para $y=10$ e 20, 30 ou 60 para $y=20$ slots.



(b) Configurações: $FDDGp15Tq20NyDz$, onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 10, 15 ou 30 slots para $y=10$ e 20, 30 ou 60 slots para $y=20$.

Figura 2.24 – Número de terminais de voz suportado pelo protocolo CDMA/PRMA ($P_{\text{perda}}=1\%$), como função do atraso máximo permitido e do número de slots por quadro. Sistema unicelulares com DAV de três estados

2.16 PROTOCOLO CDMA/ALOHA COM DETETOR DE ATIVIDADE DE VOZ DE TRÊS ESTADOS

2.16.1 Efeitos do ganho de processamento na capacidade do sistema

A Tab. 2.20 mostra, para diferentes níveis de interferência externa, que o aumento na capacidade oriundo da menor atividade de voz apresenta uma fraca dependência com o ganho de processamento nos sistemas CDMA/ALOHA.

Tabela 2.20 – Ganho de capacidade pelo uso de detetor de três estados em sistemas CDMA/ALOHA. Análise parametrizada pelo ganho de processamento e pelo fator de interferência das células vizinhas. Configurações: $FDDGpxT_q20N20D20$, onde x pode assumir 7, 15 ou 31.

<i>Ambiente</i>	<i>Unicelular, $f=0$</i>			<i>Celular, $f=0,37$</i>			<i>Celular, $f=0,749$</i>		
<i>Detetor de voz</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>
G_p									
7	200	227	13,50	161	183	13,7	137	154	12,40
15	550	625	13,63	430	490	13,95	353	399	13,03
31	1325	1499	13,13	1010	1148	13,66	810	923	13,95

Como verificado no protocolo CDMA/PRMA, a comparação das tabelas 2.11 e 2.21 evidência que também no protocolo CDMA/ALOHA a perda de capacidade devido à interferência externa independe do tipo de DAV empregado. Nota-se que para um dado fator de interferência externa, a perda de capacidade aumenta com o ganho de processamento. Isto se deve, como uma consequência da lei dos grandes números, à maior variação da carga do canal em relação ao seu valor médio com a diminuição do número de usuários ativos na célula.

Tabela 2.21 – Perda de capacidade devido a interferência externa em sistemas CDMA/ALOHA com DAV de três estados. Configurações: $FDDGpxT_q20N20D20$, onde x pode assumir 7, 15 ou 31.

<i>Ambiente</i>	<i>$f=0,37$</i>	<i>$f=0,749$</i>
	%	%
$G_p=7$	19,38	32,15
$G_p=15$	21,60	36,16
$G_p=31$	23,41	38,42

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Utilizando as tabelas 2.16 e 2.20, a Tab. 2.22 mostra que o ganho de capacidade do sistema CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA diminui com o aumento da interferência externa, bem como com o aumento do ganho de processamento. Este fenômeno, análogo ao ocorrido com detetores de dois estados, é explicado na Seção 2.9. Comparando a Tab. 2.22 com a Tab. 2.10 e utilizando como referência o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA, verifica-se que o uso de

DAV de três estados propicia um menor ganho de capacidade em relação à sistemas com detetores de dois estados.

Entretanto, esta diferença diminui com o aumento do ganho de processamento. Isto se deve à maior ou menor dificuldade na determinação dos parâmetros da função de acesso. Nota-se que a inserção destes detetores de atividade de voz em sistemas CDMA/ALOHA é imediata.

Tabela 2.22 – Ganho de capacidade do sistema CDMA/PRMA em relação ao sistema CDMA/ALOHA. Sistemas com DAV de três estados. Configurações: $FDDGp \times T_q 20N20D20$, onde x pode assumir 7, 15 ou 31.

<i>Ambiente</i>	$f=0$	$f=0,37$	$f=0,749$
	%	%	%
$G_p=7$	69,60	57,92	48,70
$G_p=15$	38,08	29,59	26,31
$G_p=31$	19,95	16,37	13,75

2.16.2 Efeitos do número de slots por quadro na capacidade do sistema

A Tab. 2.23 mostra que a característica de acesso aleatório do protocolo CDMA/ALOHA faz com que o número de slots por quadro não influencie no ganho de capacidade devido à menor atividade de voz.

Tabela 2.23 – Ganho de capacidade pelo uso de DAV de três estados no protocolo CDMA/ALOHA. Análise parametrizada pelo número de slots por quadro e pelo ganho de processamento.

<i>Ambiente</i>	$G_p=7; f=0$			$G_p=15; f=0$		
<i>Detetor de voz</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>	<i>Dois estados</i>	<i>Três estados</i>	<i>Ganho %</i>
N						
20	200	227	13,5	550	625	13,63
16	160	180	12,5	444	505	13,74
10	100	116	16,0	278	317	14,03
4	42	48	14,3	114	130	14,03

Comparando as tabelas 2.13 e 2.24, verifica-se que independe do tipo detetor de atividade de voz (embora os ganhos de capacidade com detetor de três estados sejam menores) a relação de dependência existente entre o número de slots por quadro e o ganho de capacidade do sistema CDMA/PRMA em relação a sistemas CDMA/ALOHA.

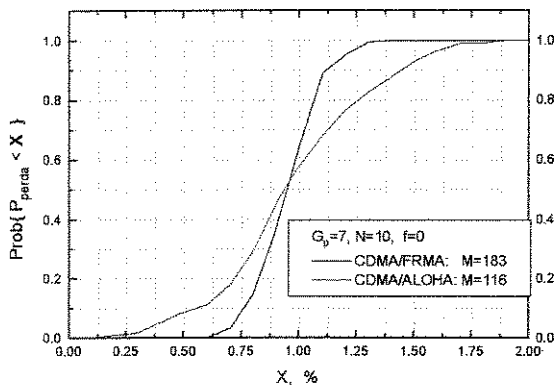
Tabela 2.24 – Ganho de capacidade do sistema CDMA/PRMA em relação ao sistema CDMA/ALOHA. Sistemas uncelulares DAV de três estados. Análise parametrizada pelo ganho de processamento e pelo número de slots por quadro.

	$G_p=7$	$G_p=15$
$N=20$	% 69,60	% 38,08
$N=16$	72,22	36,03
$N=10$	59,48	33,12

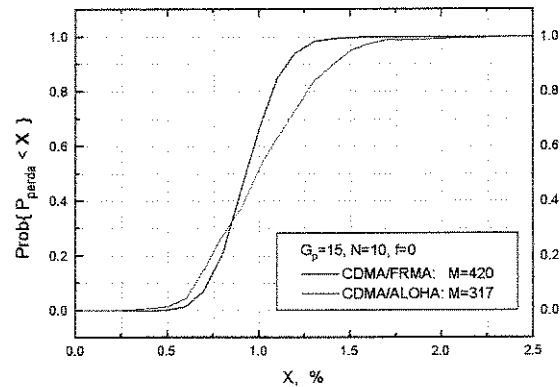
2.17 PROTOCOLO CDMA/FRMA COM DETETOR DE ATIVIDADE E VOZ DE TRÊS ESTADOS

Extensivas simulações em sistemas equipados com DAV de três estados, mostram que os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/FRMA têm um desempenho equivalente. Isto a despeito do fato de que neste último sistema as informações de controle sejam transmitidas somente no final de cada quadro. A explicação desse fenômeno, análogo ao encontrado em sistemas com detetores de dois estados, pode ser encontrada na Seção 2.10.

A Fig. 2.25 apresenta as funções cumulativas de probabilidade da perda de pacotes para os protocolos CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA. Nos casos mostrados a probabilidade média de perda de pacotes é de $\sim 1\%$ com estatísticas referentes a 180 segundos de transmissão em regime permanente. Nota-se que além do ganho de capacidade, o protocolo CDMA/PRMA apresenta uma menor dispersão na taxa de perda de pacotes.



(a) Configuração: FDDGp7Tq20N10D10.



(b) Configuração: FDDGp15Tq20N10D10.

Figura 2.25 – Função distribuição de probabilidade da perda de pacotes para os protocolos CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA: Perda média de pacotes de aproximadamente 1%.

2.18 EFEITOS DO PERÍODO DE QUADRO NO DESEMPENHO DO PROTOCOLO CDMA/PRMA

Sabe-se, conforme Seção 2.4, que o número de bits de informação transmitidos pelo terminal de voz em cada quadro depende do produto do período do quadro pela taxa de fonte. Assim, a mudança do período de quadro acarreta na mudança dos parâmetros do código de corretor de erro empregado.

A Tab. 2.25 mostra os códigos obtidos ao se empregar o método de otimização proposto na Seção 2.4. Em [Bra96] é proposto um cabeçalho com 69 bits, ou seja, 43,12 % dos 160 bits de informação. Nesta análise optou-se por manter de maneira aproximada esta relação para os demais períodos de quadro considerados. Isto acarreta perda da informação de controle transmitida por pacote. Contudo, pode ser especificado em um campo do cabeçalho o tipo de informações de controle transmitida no corrente pacote, de tal forma que não

ocorra perda da capacidade de sinalização ao se considerar uma janela de tempo maior. Por exemplo, em uma janela de tempo de 20 ms pode-se enviar 68 (17x4) bits de informação em quatro quadros de 5 ms; 70 (35 x 2) bits de controle em 2 quadros de 10 ms; 69 bits de controle em um quadro de 20 ms. É encontrada no Apêndice C uma lista de códigos BCH gerados por elementos primitivos menores que 2^9 .

Tabela 2.25 – Códigos BCH oriundos do processo de otimização pelo limitante de Gilbert e Varsharmov.

T_f	N	$R_v T_q + H$	Otimização pelo limitante de Gilbert e Varsharmov	$BCH(n,k,t)$
20 ms	20	160+69=229	$r_c=0,45$; $t \geq 31$	(511,229,38)
10 ms	20	80+35=115	$r_c=0,44$; $t \geq 16$	(255,115,21)
5 ms	20	40+17=57	$r_c=0,44$; $t \geq 7$	(127,57,11)
4,615 ms ^{2.6}	20	37 +20=57	$r_c=0,44$; $t \geq 7$	(127,57,11)

A Tab. 2.26a mostra resultados a respeito da capacidade do protocolo CDMA/PRMA configurado para diferentes períodos de quadro, onde o atraso máximo é de um quadro. Já na Tab. 2.26b, o atraso máximo especificado é de 20 ms. Pode-se chegar às seguintes conclusões: (i) o protocolo CDMA/PRMA é flexível em relação ao tamanho do quadro especificado; (ii) o efeito do atraso na capacidade depende do menor ou maior casamento da constante de tempo média do detetor de atividade de voz com o período de quadro; (iii) novamente os resultados numéricos permitem obter uma adequada estimativa da capacidade sob distintas configurações.

Tabela 2.26 – Resultados estimados via simulação (primeira linha) e numericamente calculados (segunda linha) para a taxa média de pacotes corrompidos e descartados. Função de acesso, Tab. B.2.8, otimizada para uma perda de pacotes de 1%.

Tabela 2.26a – Atraso máximo de um período de quadro. Configuração: $FDDGp7T_q x N20D20$, onde x assume 4,615, 10 ou 20 ms.

T_q [ms]	Detetor de dois estados				Detetor de três estados			
	M	$P_{perda} \%$	$P_{cpd} \%$	$P_{desc} \%$	M	$P_{perda} \%$	$P_{cpd} \%$	$P_{desc} \%$
20	362	0,95	0,60	0,35	385	0,95	0,68	0,27
	365	0,95	0,56	0,39	388	0,96	0,71	0,25
10	369	0,99	0,70	0,29	405	0,92	0,66	0,26
	373	0,99	0,67	0,32	410	0,93	0,65	0,28
4,615	350	1,0	0,90	0,10	388	0,95	0,85	0,1
	349	1,0	0,92	0,08	393	0,97	0,87	0,10

^{2.6} Período de quadro do sistema celular Global System for Mobile Communication (GSM) [HP95].

Tabela 2.26b - Atraso máximo de 20 ms. Configuração: $FDDGp7T_qxN20Dy$, onde x assume 4,615 ou 10 ms; y assume 87 slots para $T_q = 4,615\text{ms}$; 40 slots para $T_q = 10\text{ ms}$.

T_q [ms]	Detetor de dois estados				Detetor de três estados			
	M	$P_{perda} \%$	$P_{cpd} \%$	$P_{desc} \%$	M	$P_{perda} \%$	$P_{cpd} \%$	$P_{desc} \%$
10	373	0,93	0,71	0,22	421	0,92	0,74	0,18
	374	0,95	0,64	0,30	418	0,94	0,71	0,23
4,615	358	1,0	0,99	0,01	410	0,95	0,92	0,03
	353	1,0	1,01	0,001	400	0,956	0,95	0,006

2.19 APROXIMAÇÃO GAUSSIANA INCREMENTADA

No modelo de canal apresentado na Seção 2.5 foi empregada a Aproximação Gaussiana Padrão (AGP) para a determinação da taxa de erro de bit média. Esta expressão, originalmente desenvolvida por Purlsey [Pur77], é convenientemente repetida abaixo para o caso unicolor com carga de K usuários e controle ideal de potência:

$$\overline{P_e} = Q \left(\sqrt{\frac{1}{\frac{K-1}{3G_p} + \frac{N_0}{2T_b P_0}}} \right) \quad (2.53)$$

Na dedução desta clássica expressão foi assumido que o número de usuários no canal é grande o suficiente a fim de se utilizar o teorema central do limite para justificar a modelagem da interferência de múltiplo acesso por uma VA Gaussiana com média nula e uma dada variância σ^2_ξ . Os protocolos estudados nesta tese são do tipo híbrido CDMA/TDMA. Dependendo da combinação do código corretor de erro e ganho de processamento utilizada, podem ocorrer situações em que o número de usuários por slot não é suficientemente elevado para justificar a AGP. Portanto, esta seção tem por objetivo estudar as implicações da aplicação da AGP no desempenho do protocolo conjunto CDMA/PRMA. Nota-se que uma compilação compreensível da literatura sobre aproximações Gaussianas para sistemas DS-CDMA é encontrada em [Rap96, p. 569-591].

Uma expressão mais precisa e computacionalmente eficiente, denominada de aproximação Gaussiana incrementada (AGI), foi desenvolvida por Holtzman [Hol92] para a probabilidade de erro de bit média em sistemas DS-CDMA unicolorares com controle ideal de potência, ou seja,

$$\begin{aligned} \overline{P_e} \approx & \frac{2}{3} Q \left[\left(\frac{k-1}{3G_p} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0,5} \right] + \frac{1}{6} Q \left[\left(\frac{(K-1)(G_p/3) + \sqrt{3}\sigma}{G_p^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0,5} \right] + \\ & \frac{1}{6} Q \left[\left(\frac{(K-1)(G_p/3) - \sqrt{3}\sigma}{G_p^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0,5} \right] \end{aligned} \quad (2.54a)$$

onde

$$\sigma^2 = (K-1) \left[G_p^2 \frac{23}{360} + G_p \left(\frac{1}{20} + \frac{K-2}{36} \right) - \frac{1}{20} - \frac{K-2}{36} \right] \quad (2.54b)$$

Observe que tanto (2.54a) é aplicável desde que o numerador do terceiro termo seja positivo. Verifica-se que isto ocorre, independentemente de G_p e E_b/N_0 , quando o número de sinais interferentes é maior que 1. A Tab. 2.27 mostra o valor mínimo do ganho de processamento para que (2.54a) possa ser calculada no caso de um único sinal interferente. A Fig. 2.26 mostra a taxa de erro obtida por meio da AGP e da AGI; observa-se que a estimativa por meio da AGP é otimista para poucos usuários no canal.

Tabela 2.27 - Valor mínimo do ganho de processamento para um único usuário inteterferente.

E_b/N_0 [dB]	$(G_p)_{min}$
0	1
3	1
7	2
10	3
20	23
$+\infty$	-----

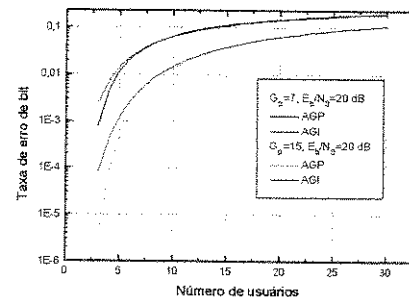


Figura 2.26 – Taxa de erro de bit obtida pela AGP e AGI.

Utilizando a AGI, a Fig. 2.27 mostra o número de usuários suportados pelos protocolos CDMA/PRMA (função de acesso otimizada para perda de pacotes de 0,1 e 1 % conforme a Tab. 2.5) e CDMA/ALOHA em função de E_b/N_0 . Ambos sistemas empregam DAV de dois estados. A Tab. 2.28 compara os resultados obtidos ao se utilizar a AGP e a AGI na análise de desempenho do protocolo CDMA/PRMA; entre parênteses são mostrados os resultados obtidos ao ser levado em conta o ruído térmico na otimização da função de acesso. O código corretor de erros faz com que ambas as abordagens conduzam aos mesmos resultados (descontadas as flutuações estatísticas normais à simulação) [Hoe99d].

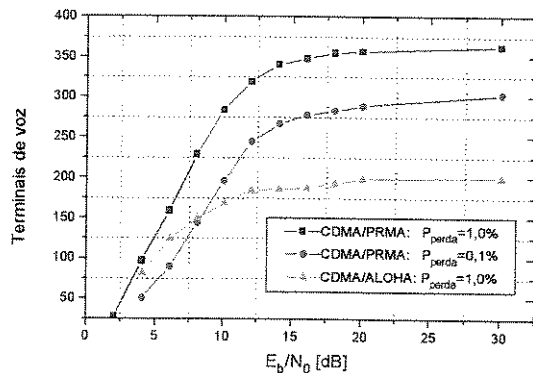


Figura 2.27 – Número de usuários de voz suportados pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função de E_b/N_0 . Configuração: FDDGp7 Tq20N20D20.

Tabela 2.28 – Número de usuários suportado pelo protocolo CDMA/PRMA ao se utilizar a AGP e a AGI. Função de acesso: Tab. B.2.9

E_b/N_0 [dB]	M	
	AGP	AGI
$+\infty$	363 (363)	363 (363)
20	357 (357)	357 (357)
16	349 (350)	348 (350)
10	282 (313)	284 (313)

2.20 PERMISSÕES DE ACESSO ADAPTATIVAS PARA O PROTOCOLO CDMA/FRMA

No método rotulado como permissão de acesso convencional (PAC), conforme descrito na Seção 2.3, as permissões de acesso são calculadas na ERB por meio de uma função de acesso (cujos parâmetros são heurísticamente otimizados utilizando-se um critério a-posteriori para avaliação e comparação) e transmitidas para os terminais de voz no canal de controle do enlace direto. No método a-posteriori, postulando-se que sejam conhecido o número de usuários em acesso no início do n -ésimo slot ($K_{acs,n}$), as probabilidades de permissões de acesso são fornecidas por:

$$Pf_{,n} = \frac{K_{ot} - K_{res,n}}{K_{acs,n}} \quad (2.55)$$

onde K_{ot} é o número ótimo de usuários por slot que satisfaz a qualidade de serviço requerida, $K_{res,n}$ denota o número de usuários que estavam no estado de reserva no mesmo slot do quadro anterior e que ainda continuam em atividade de voz no quadro atual. Nota-se que, conforme a Seção 2.14, $K_{res,n}$ é um valor conhecido pela ERB dado que se empregue um método de sinalização adequado

Em [Wan99] é descrito um método, denominado de permissões de acesso adaptativa (PAA), onde o número de terminais de voz no estado de acesso é estimado a fim de se determinar as permissões de acesso para o n -ésimo slot. Contudo, este método requer que as permissões de acesso sejam transmitidas a cada slot, ou seja, é adequado para o protocolo conjunto CDMA/PRMA. Portanto, após apresentar o método descrito em [Wan99], será proposto um esquema de PAA adequado para o protocolo conjunto CDMA/FRMA, onde as permissões de acesso são transmitidas antes do início do quadro seguinte do enlace reverso.

De acordo com a figuras 2.1a e 2.5, dado que M_{n-1} e $K_{res,n-1}$ terminais de voz estão no estado de silêncio e reserva no slot $n-1$, respectivamente, então a probabilidade que em um slot n_{sa} terminais vá para o estado de acesso, a partir do estado de silêncio, pode ser expressa por meio de uma função de densidade de probabilidade binomial, i.e.,

$$P(n_{sa} | M_{n-1}) = \text{binon}(M_{n-1}, n_{sa}, \sigma) = \binom{M_{n-1}}{n_{sa}} (\sigma)^{n_{sa}} (1 - \sigma)^{M_{n-1} - n_{sa}} \quad (2.56)$$

Nota-se que dado que $K_{res,n-1}$ terminais de voz estão no estado de reserva no slot $n-1$, então a probabilidade de que um usuário saia do estado de reserva dada por:

$$P(1 | R_{n-1}) = \text{binon}(K_{res,n-1}, 1, \gamma) = \binom{K_{res,n-1}}{1} (\gamma)(1 - \gamma)^{K_{res,n-1}} \quad (2.57)$$

Sabe-se que uma VA binomial pode ser aproximada por uma VA do tipo Poisson quando a população de usuários é grande, ou a probabilidade de sucesso do experimento de Bernoulli é pequena [Pap91, p. 49-53].

Isto posto, a taxa de chegada de usuários no estado de acesso oriunda do estado de silêncio pode ser expressa por $\lambda_{n-1} = M_{n-1}\sigma$, enquanto que $\mu_{n-1} = K_{res,n-1}\gamma$ é a taxa de saída do estado de reserva.

Utilizando-se (2.55) e (2.56), a permissão de acesso para o n -ésimo slot pode ser reescrita como

$$p_{f,n} = \frac{K_{ot} - K_{res,n}}{K_{acs,n}} = \frac{K_{ot} - K_{res,n}}{M_{n-1}\sigma + \frac{\Delta K_{res,n-1}}{p_{f,n-1}} - \Delta K_{res,n-1}} \quad (2.58)$$

onde $M_{n-1}\sigma$ é o número médio de usuários em silêncio que passam para o estado de acesso, $\Delta K_{res,n-1}$ é o número de terminais que obtiveram uma reserva no slot $n-1$ e, consequentemente, $\Delta K_{res,n-1}/p_{f,n-1} - \Delta K_{res,n-1}$ é o número de terminais de voz que estavam no estado de acesso no slot $n-1$ e que ainda permanecem neste estado por não terem obtido sucesso na obtenção de uma reserva. Em (2.58) é postulado que todos os usuários que obtêm permissão para acessar o canal tem sucesso na obtenção da reserva, o que é bastante razoável quando se trabalha com baixa probabilidade de perda de pacotes corrompidos (vide Seção 2.10).

Quando $p_{f,n-1}$ é nulo por k slots consecutivos, então (2.58) modificar-se-á para

$$p_{f,n} = \frac{K_{ot} - K_{res,n}}{M_{n-1}\sigma} \quad (2.59)$$

Apresentar-se-á nas duas próximas subseções um nova variante deste algoritmo [Hoe00] para a operação do modo TDD (*Time-Division Duplex*) simétrico (vide Fig. 5.4), configurado para um único ponto de chaveamento entre o enlace reverso e direto [OJA98, pp. 269-272].

2.20.1 Detetor de atividade de voz de dois estados

Neste caso, a Eq. (2.59) é modificada para

$$p_{f,i} = \frac{K_{ot} - K_{res,n}}{M_{sil} \left(1 - e^{-\frac{D\tau}{t_2}} \right)} \quad (2.60)$$

onde o denominador estima o número de usuários em silêncio que fluem para o estado de acesso em um período de tempo equivalente ao retardo máximo admissível dos pacotes de voz. Nota-se que a utilização de $D\tau$, número de slots que uma EM pode disputar por uma reserva antes de ter seu pacote descartado, ao invés de $N\tau$, número de slots por quadro, se constitui uma abordagem conservadora. Isto permite lidar com os eventuais surtos de tráfego do processo de Poisson.

O número de usuários em reserva no n -ésimo slot é obtido de acordo com o procedimento proposto na Seção 2.14. O número de usuários em silêncio é estimado como

$$M_{sil} = M - \sum_{n=0}^{N-1} K_{res,n} \quad (2.61)$$

Comparando a Tab. 2.29 com as tabelas 2.10b e 2.19, verifica-se que, em distintas condições operacionais, o esquema de PAA apresenta um desempenho superior ao convencional, especialmente quando se demanda uma maior qualidade de serviço.

Tabela 2.29 – Capacidade do protocolo CDMA/FRMA com PAA. Configuração: TDDGp15T_q20NxDy.

Tabela 2.29a – Capacidade em função da interferência externa e da perda de pacotes. N=D=20.

$P_{\text{perda}} \%$	$f=0$	$f=0,37$	$f=0,749$
0,1	710	520	415
1,0	792	584	457

Tabela 2.29b – Capacidade em função do número de slots por quadro e do atraso máximo permitido. Sistema unicelular. $P_{\text{loss}}=1\%$.

N	$D=N$	$D=1,5N$	$D=2N$
20	792	793	795
10	388	390	391

2.20.2 Detetor de atividade de voz de três estados

No caso de detetores de atividade de voz de três estados, conforme mostram as figuras 2.1b e 2.23, o número de usuários em silêncio estimado pela Eq. (2.61), pode ser decomposto como a soma dos terminais de voz no estado de silêncio principal ($M_{\text{sil,p}}$) com os terminais de voz no estado de mini-silêncio ($M_{\text{sil,m}}$), ou seja, $M_{\text{sil}}=M_{\text{sil,p}}+M_{\text{sil,m}}$. Utilizando-se os parâmetros da Tab. 2.1 nos resultados mostrados em [Ami93, eq. A1-A5], verifica-se imediatamente que a probabilidade de um terminal estar no estado de silêncio principal e mini-silêncio é de 0,937 e 0,063, respectivamente, dado que um usuário esteja no estado de silêncio. Portanto, modificar-se-á a permissão de acesso para o n-ésimo slot fornecida pela Eq. (2.60) para

$$P_{f,n} = \frac{K_{\text{ot}} - K_{\text{res},n}}{0,937 M_{\text{sil}} \left(1 - e^{-\frac{D\tau}{t_2}} \right) + 0,063 M_{\text{sil}} \left(1 - e^{-\frac{D\tau}{t_4}} \right)} \quad (2.62)$$

Verifica-se, ao se comparar as tabelas 2.19 e 2.30 e pela análise da Fig. 2.28, que a utilização de (2.62) leva a obtenção de bons resultados.

Tabela 2.30 – Capacidade do sistema CDMA/FRMA unicelular, otimizado para perda de pacotes de 1% (primeira linha) 0,1 % (segunda linha), para uma taxa média de perda de pacotes de ~1%. Configuração: TDDGp $\times$ T_q20N20D20, onde x pode valer 7 ou 15; y pode assumir 10 ou 20 slots.

$f=0$	$G_p=7$	$G_p=15$
$N=20$	397	866
	335	748
$N=16$	314	688
	266	597
$N=10$	192	429
	163	372

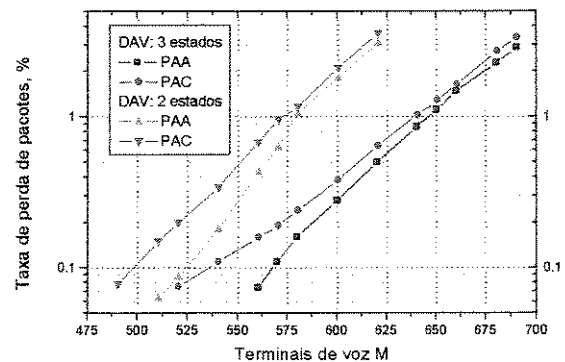


Figura 2.28 – Capacidade do sistema CDMA/FRMA celular ($f=0,37$) com DAV de dois e três estados. PAC otimizada para perda de pacotes de 1% (conforme Tab. B.2.5). PAA otimizada de acordo com o número instantâneo de usuários presentes no sistema. Configuração: FDD Gp15 T_q20N20D20.

2.21 DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA COM CÓDIGOS CONVOLUCIONAIS E DECODIFICADOR DE VITERBI COM DECISÃO ABRUPTA

No canal de tráfego do enlace direto, a norma IS-95 especifica a utilização de um código convolucional com os seguintes parâmetros [Rhe98, p.200]: taxa do código $r_d=k_d/n_d=1/2$; restrição de comprimento $K_d=9$; sequência geradora $g_1=(561)_{\text{octal}}$ e $g_2=(753)_{\text{octal}}$. A função transferência desse código, ao se utilizar os dados tabulados em [Con88], é fornecida por

$$T_{\text{dir}}(D) = 11D^{12} + 50D^{14} + 286D^{16} + 1630D^{18} + 9639D^{20} + 55152D^{22} + 320782D^{24} + \dots \quad (2.63)$$

O código convolucional do canal de tráfego do enlace reverso têm as seguintes características [Rhe98, p.65]: $r_r=1/3$; $K_r=9$; sequência geradora $g_1=(557)_{\text{octal}}$, $g_2=(663)_{\text{octal}}$ e $g_3=(772)_{\text{octal}}$. Logo, sua função de transferência é dada por

$$T_{\text{rev}}(D) = 5D^{18} + 7D^{20} + 36D^{22} + 85D^{24} + 204D^{26} + 636D^{28} + 1927D^{30} + 5416D^{32} + \dots \quad (2.64)$$

Os resultados a seguir consideram a utilização de um decodificador de Viterbi com decisão abrupta. A probabilidade do caminho correto na treliça ser rejeitado para um segmento com uma distância de Hamming d do caminho correto é fornecida por [Vit79, p. 247]

$$P_d = \frac{1}{2} \binom{d}{d/2} p^{d/2} (1-p)^{d/2} + \sum_{k=d/2+1}^d \binom{d}{k} p^k (1-p)^{d-k} \quad (2.65)$$

onde p é a probabilidade de transição do canal BSC e d é um número inteiro positivo par.

Utilizando-se o limitante da união, com (2.63) e (2.65), verifica-se imediatamente que a probabilidade do primeiro evento para o enlace direto é limitada superiormente por

$$P_{e,\text{dir}} \leq 11P_{12} + 50P_{14} + 286P_{16} + 1630P_{18} + 9639P_{20} + \dots \quad (2.66)$$

enquanto que para o enlace reverso é, analogamente, obtido que

$$P_{e,\text{rev}} \leq 5P_{18} + 7P_{20} + 36P_{22} + 85P_{24} + 204P_{26} + \dots \quad (2.67)$$

Os efeitos que a simplificação da modelagem exercem na diminuição da demanda computacional, bem como na confiabilidade dos resultados obtidos, se constitui uma preocupação recorrente dos projetistas de simuladores de sistemas de comunicação. Nesta perspectiva, apresenta-se resultados obtidos ao se utilizar um limitante superior para a probabilidade de um caminho à distância de Hamming d do caminho correto ser incorretamente selecionado [Vit79, p.96-102, p. 247], ou seja,

$$P_d < [4p(1-p)]^{d/2} \quad (2.68)$$

Postulando que os erros na entrada e no decodificador de Viterbi são independentes, verifica-se que o limitante superior da probabilidade de um pacote ser recebido com sucesso é fornecido por

$$Q_{\text{conv}} < (1 - nP_e) \quad (2.69)$$

onde n é o tamanho do segmento codificado e P_e é a probabilidade de erro do primeiro evento. Supondo que a interferência de múltiplo acesso faz com que os erros no interior do decodificador sejam dependentes, Pursley e

Taipale demonstraram que o limitante superior da probabilidade de um pacote ser recebido com sucesso, ao se utilizar um de Viterbi com decisão abrupta, é dado por [Pur87, eq. 3.29]

$$Q_{\text{conv}} < (1 - P_e)^n \quad (2.70)$$

Utilizando-se a configuração FDDGp16T_q10N10D20, os protocolos CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA podem suportar 410 (315) e 345 (247) usuários de voz, respectivamente, para uma perda de pacotes de % (0,1%). Nesta configuração é utilizado um código de bloco BCH(255,115,21) e decodificação abrupta. Nota-se que a utilização das permissões de acesso adaptativas (vide Seção 2.20) faz com que os resultados mostrados nesta Seção referenciem o protocolo conjunto CDMA/FRMA. Contudo, conforme a Seção 2.10, estes resultados podem ser estendidos para o protocolo CDMA/PRMA. A fim de comparar estes resultados com os obtidos com o uso de códigos convolucionais com decodificador de Viterbi e decisão abrupta, é mantido o mesmo número de bits de informação e, aproximadamente, a mesma taxa de chip. Portanto, para o sistema que utiliza o mesmo código do enlace direto da IS-95, os pacotes têm um comprimento de bloco de 230 bits e ganho de processamento de 18. Já para o sistema que utiliza o mesmo código do enlace reverso da IS-95, os pacotes têm comprimento de bloco de 345 bits, o que acarreta um ganho de processamento de 12 ao elevar a taxa de chips de 8,160 Mcps (16x255/0,5 ms) para 8,28 Mcps (12x345/0,5 ms). Nota-se ao resultados comparativos permanecem válidos ao desconsiderar a sequência piloto de treinamento (não-codificada), chips de guarda, etc., no cálculo da taxa de chip.

Analisando-se os resultados da Tab. 2.30 verifica-se que: (i) o sistema que utiliza o código do enlace reverso tem um desempenho superior em relação àquele que utiliza o código do enlace direto da norma IS-95. Nota-se que isto se deve à combinação dos efeitos do ganho de processamento com a capacidade de correção do código; (ii) a consideração de erros independentes na saída do decodificador de Viterbi (eq. 2.70) leva a resultados semelhantes aos obtidos no caso em que a dependência é levada em conta (eq. 2.69). Isto se deve aos valores da taxa de perda de pacotes habitualmente requerida para tráfego de voz; (iii) a utilização do limitante superior para a probabilidade do primeiro evento leva a resultados bastante pessimistas para a perda de pacotes, não sendo, portanto, recomendada.

Tabela 2.31- Capacidade dos protocolos CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA para perda de pacotes de 0,1% (1ª linha) e 1% (2ª linha). Sistemas com DAV de dois estados. Para cada configuração de parâmetros, utiliza-se o limitante superior da perda de pacotes fornecido por (2.70) e, entre parêntesis, (2.69). Configuração FDDGpxT_q10N10D20, onde x assume 12 e 18 ao se utilizar o código convolucional do enlace reverso e direto, respectivamente, da norma IS-95. O valor de k_{cc}(eq. 2.60) empregado é: (i) 16 (P_{perda}=0,1%) e 18 (P_{perda}=0,1%) ao se utilizar a Eq. (2.65) no código da IS-95 do enlace direto; (ii) 14 (P_{perda}=0,1%) e 16 (P_{perda}=0,1%) ao se utilizar a Eq. (2.68) no código da IS-95 do enlace direto; (iii) 17 (P_{perda}=0,1%) e 20 (P_{perda}=0,1%) ao se utilizar a Eq. (2.65) no código da IS-95 do enlace reverso; (iv) 15 (P_{perda}=0,1%) e 17 (P_{perda}=0,1%) ao se utilizar a Eq. (2.68) no código da IS-95 do enlace reverso.

Código	Enlace Direto: G _p =18		Enlace Reverso: G _p =12	
	Eq. (2.65)	Eq. (2.68)	Eq. (2.65)	Eq. (2.68)
CDMA/ FRMA	340 (341)	294 (295)	357 (357)	309 (309)
	400 (401)	348 (348)	430 (428)	366 (365)
CDMA/ ALOHA	233 (229)	185 (185)	250 (247)	203 (202)
	292 (291)	242 (239)	327 (320)	264 (259)

Capítulo 3

REDE DE PACOTES CELULAR CDMA/PRMA

3.1 INTRODUÇÃO

Até o presente momento, conforme Eq. 2.19, os efeitos da interferência externa no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA, CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA foram modelados pelo seu valor médio. Na Seção 3.2 são apresentadas as propriedades básicas de um simulador de sistema para o enlace reverso de redes DS-CDMA^{4.1}. A investigação das características da interferência externa sob distintas condições operacionais é efetuada na Seção 3.3. A comparação entre os resultados obtidos pela simulação das redes CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com os resultados produzidos somente pela simulação da célula central, empregando diferentes modelagens para a interferência externa, é efetuada na Seção 3.4. Finalmente, a Seção 3.5 faz uso dos resultados anteriores para analisar e compilar os efeitos da interferência externa na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA sob distintas condições de propagação. Nota-se, como indica a Seção 2.10, que os resultados obtidos para o protocolo CDMA/PRMA podem ser estendidos para o protocolo CDMA/FRMA.

3.2 SIMULADOR DE SISTEMA PARA O ENLACE REVERSO DE REDES DS-CDMA

As características principais do simulador, concernentes à investigação dos efeitos da interferência externa no desempenho do canal reverso de sistemas DS-CDMA, são descritas a seguir [Hoe99b]:

- A geometria do sistema consiste de um reticulado de N_{ERB} células hexagonais ou circulares;
- Os usuários estão uniformemente distribuídos na configuração padrão. Um possível algoritmo para células hexagonais consiste em distribuir os usuários uniformemente em cada um dos seis triângulos equiláteros do hexágono. Descreve-se abaixo um gerador de distribuição uniforme numa área triangular [Dev86, p.570]:
 - (i) gerar as variáveis aleatórias U e V independentes e uniformemente distribuídas no intervalo $[0,1]$;
 - (ii) se $U > V$ então trocar as variáveis U e V ;
 - (iii) retornar a localização do usuário $(x, y) = Uv_1 + (V - U)v_2 + (1 - V)v_3$, onde v_1 , v_2 e v_3 denotam os pares ordenados das coordenadas cartesianas dos vértices do triângulo.

No caso de usuários uniformemente distribuídos em células circulares, as funções de densidade de probabilidade da posição radial e angular dos usuários são fornecidas por [Alm98]:

$$p(r) = \frac{2}{R_c^2} r, \quad 0 \leq r \leq R_c \quad (3.1a)$$

$$p(\phi) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (3.1b)$$

onde R_c depende do raio do hexágono, R_h , e da topologia da rede: (i) $R_c = \sqrt{3}/2 R_h$ (círculo inscrito no

^{4.1} Um tutorial sobre simuladores de enlace e de sistema pode ser encontrado em [Oja98, Cap. 7].

hexágono); (ii) $R_c = R_h$ (hexágono inscrito no círculo) [LeeW86] [LeeJ98, p.278];

• Os efeitos do desvanecimento devido ao multipercurso não são considerados na modelagem do meio de propagação empregada no estudo dos efeitos da interferência externa na capacidade de sistemas DS-CDMA^{4.2}. O modelo de propagação utilizado considera a perda de percurso e o sombreamento log-normal [Vit95, Cap. 6]. Portanto, para um usuário à distância r_j da j -ésima ERB a atenuação é proporcional a

$$L(\Gamma, \zeta_j) = r_j^\Gamma 10^{-\zeta_j/10} \quad (3.2)$$

onde Γ é o expoente da perda de percurso e ζ_j , que modela o sombreamento, é uma VA Gaussiana em decibéis com média nula e desvio padrão σ_{dB} . A VA que modela o sombreamento é dividida em duas componentes independentes: uma comum a todas as ERBs do sistema, e outra pertinente à j -ésima ERB [Vit94a], ou seja,

$$\zeta_j = a\xi + b\xi_j, \quad \text{onde } a^2 + b^2 = 1, \quad a \leq 1 \quad (3.3a)$$

onde

$$E[\zeta_j] = E[\xi] = E[\xi_j] = 0, \quad \text{Var}[\zeta_j] = \text{Var}[\xi] = \text{Var}[\xi_j] = \sigma_{dB}^2, \quad E[\xi\xi_j] = 0 \quad (3.3b)$$

Imediatamente, verifica-se que o coeficiente de correlação entre duas ERBs quaisquer é dado por $E[\zeta_i\zeta_j]/\sigma_{dB}^2 = a^2$. Neste trabalho, leva-se em consideração o caso mais pessimista, ou seja, sombreamento descorrelacionado ($a=0$). Valores típicos do expoente da perda de percurso e do desvio do sombreamento podem ser encontrados em [Rap99, p.37].

Os comentários a seguir tomam como referência a Fig. 3.1, onde o usuário conectado com a célula superior gera interferência externa célula alvo (célula inferior). Nos sistemas DS-CDMA celulares, as estações móveis possuem um mecanismo de pesquisa do sinal piloto emitido por cada setor de todas as células do sistema. Isto permite direcionar o móvel para o enlace de menor atenuação, de tal forma que a potência transmitida seja minimizada [Vit94b]. Suponha que do conjunto de N_c ERBs mais próximas, a EM seja controlada pela ERB com menor atenuação no enlace direto. Portanto, assumindo-se controle ideal de potência, a potência recebida na ERB, devido a qualquer estação móvel não controlada pela célula alvo, é dada por

$$P_0 \min \left\{ r_1^\Gamma 10^{-\zeta_{d,I}/10}, \dots, r_{N_c}^\Gamma 10^{-\zeta_{d,N_c}/10} \right\} d^{-\Gamma} 10^{\zeta_r/10} \quad (3.4)$$

onde r_j e $\zeta_{d,j}$ denotam a distância e o sombreamento do enlace direto, respectivamente, entre a estação móvel e a j -ésima ERB do conjunto de N_c ERBs mais próximas da EM geradora da interferência. A distância e o sombreamento no enlace reverso entre a EM e a ERB da célula alvo são denotados por d e ξ_r , respectivamente, e P_0 é a potência nominal recebida na ERB que controla o usuário. Em suma, cada usuário no sistema se conecta logicamente com a ERB de menor atenuação (efeito do “soft handoff”) e transmite a mínima potência necessária para compensar as perdas do meio de propagação (efeito do controle de

4.2 A potência média do sinal piloto é a grandeza de primeira ordem no estudo dos efeitos da interferência externa em sistemas DS-CDMA [Rap92] [Wan93].

potência);

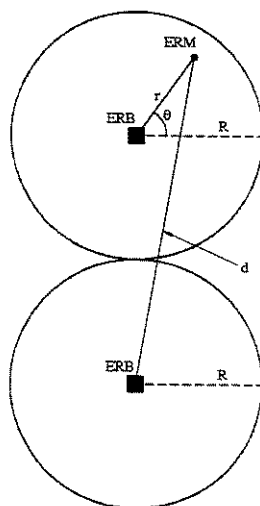


Figura 3.1 – Cálculo da interferência externa no enlace reverso.

- São consideradas células omnidirecionais e células com 3 setores. Nestas, são considerados diagramas de radiação idealizado (Fig 3.2a) bem como diagramas de radiação típicos (Fig. 3.2b). Para um ângulo de incidência, o valor do ganho da antena é obtido por meio de uma pesquisa em uma tabela com resolução de $2,5^\circ$.

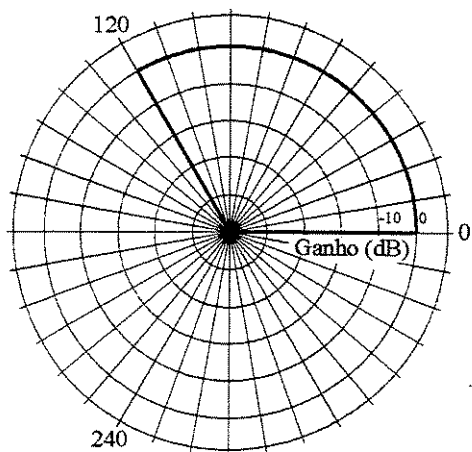


Figura 3.2a – Diagrama de radiação idealizado para células com setores de 120° .

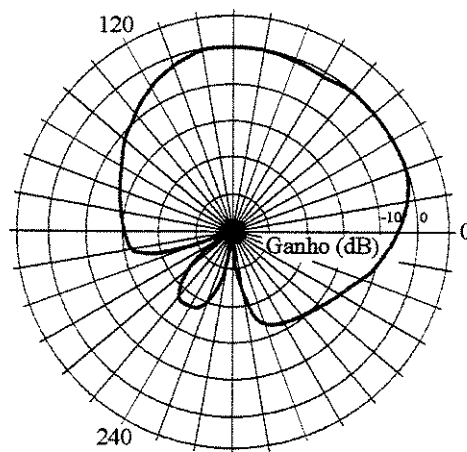


Figura 3.2b – Diagrama de radiação típico para células com setores de 120° .

- O código fonte foi desenvolvido utilizando-se o compilador BORLAND C++, versão 5.0.

3.3 INTERFERÊNCIA EXTERNA NO ENLACE REVERSO DE SISTEMAS DS-CDMA

Esta Seção tem por objetivo investigar as características da interferência externa no enlace reverso de sistemas celulares terrestres DS-CDMA. São consideradas distintas condições operacionais, ou seja, tipos de células (hexagonal, circular), número de células (N_{ERB}), número de células pesquisadas pelo rastreador do

sinal piloto (N_o), expoente da perda de percurso (Γ), desvio padrão do sombreamento log-normal (σ_{dB}), etc. A equipe de engenharia da QUALCOMM, veja por exemplo [Vit94a], apresenta uma série de trabalhos que enfocam a análise dos efeitos da interferência externa em sistemas DS-CDMA. Nestes, são apresentados resultados numéricos do valor médio da interferência externa. O presente estudo, além de ampliar a base de dados de domínio público ao considerar distintas configurações de rede, também apresenta resultados do desvio padrão da interferência externa. Estes dados, obtidos pelo método de Monte Carlo [Sob74], serão utilizados posteriormente no estudo de desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA.

As Tab. 3.1 a 3.6 mostram a média e o desvio padrão da interferência externa normalizadas pelo número de usuários por célula. Estes valores foram obtidos para atividade de voz contínua.

Desconsiderando o sombreamento log-normal, a Tab. 3.1 mostra resultados para as seguintes topologias: (i) células hexagonais (Tab. 3.1a); (ii) células circulares com $R_c = \sqrt{3}R_h/2$ (Tab. 3.1b); (iii) células circulares com $R_c = R_h$ (Tab. 3.1c). Os valores médios nas Tab. 3.1a e 3.1b estão em concordância com os indicados em [Vit95, p.189] e [Alm98], respectivamente. Ao abstrair o sombreamento log-normal, verifica-se que o número mínimo de camadas de células que devem ser levadas em conta no cômputo da interferência externa é: (i) $\Gamma=3$: 4 camadas; (ii) $\Gamma=4$: 2 camadas; (iii) $\Gamma=5$: 1 camada. Observa-se que a sobreposição das células (Tab. 3.1c) leva a um aumento da interferência devido a maior concentração de terminais em torno de R_h .

Tabela 3.1 – Valores da média e do desvio padrão da interferência externa normalizados pelo número de usuários por célula. Dados parametrizados pelo número de ERBs e pelo coeficiente da perda de percurso. $\sigma_{dB}=0$.

Tabela 3.1a – Células hexagonais.

$\sigma_{dB}=0$ dB	$\Gamma=3$		$\Gamma=4$		$\Gamma=5$	
$N_{ERB}=N_c$	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
7 (1ª camada)	0,578	0,410	0,381	0,363	0,280	0,329
19 (2ª camada)	0,707	0,416	0,416	0,366	0,290	0,333
37 (3ª camada)	0,763	0,409	0,425	0,362	0,291	0,332
61 (4ª camada)	0,791	0,413	0,430	0,370	0,292	0,332
91 (5ª camada)	0,809	0,407	0,429	0,363	0,287	0,324

Tabela 3.1b – Células circulares com raio $R_c = \sqrt{3}R_h/2$.

$\sigma_{dB}=0$ dB	$\Gamma=3$		$\Gamma=4$		$\Gamma=5$	
$N_{ERB}=N_c$	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
7	0,472	0,318	0,285	0,272	0,191	0,216
19	0,579	0,316	0,311	0,271	0,196	0,206
37	0,624	0,326	0,320	0,273	0,199	0,208
61	0,651	0,324	0,323	0,268	0,201	0,230
91	0,666	0,319	0,324	0,267	0,200	0,228

Tabela 3.1c – Células circulares com raio $R_c = R_h$.

$\sigma_{dB}=0$ dB	$\Gamma=3$		$\Gamma=4$		$\Gamma=5$	
$N_{ERB}=N_c$	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
7	0,708	0,477	0,487	0,433	0,371	0,397
19	0,857	0,486	0,528	0,430	0,383	0,395
37	0,920	0,488	0,540	0,432	0,386	0,392
61	0,958	0,492	0,545	0,435	0,383	0,395
91	0,973	0,489	0,544	0,431	0,387	0,396

Em [Vit94a], a interferência externa na célula alvo é modelada como a soma de duas componentes, ou seja,

$$I_{\text{ext}} = I_{S_0} + I_{\bar{S}_0} \quad (3.5)$$

onde I_{S_0} denota a componente da interferência oriunda da região em que os usuários podem ser controlados pela célula alvo. De maneira complementar, $I_{\bar{S}_0}$ representa a interferência externa gerada pelos usuários que não podem ser controlados pela célula alvo. A Fig. 3.3 ilustra estas duas regiões para $N_c=1, 2, 3, 4$ e 9 [Cor98].

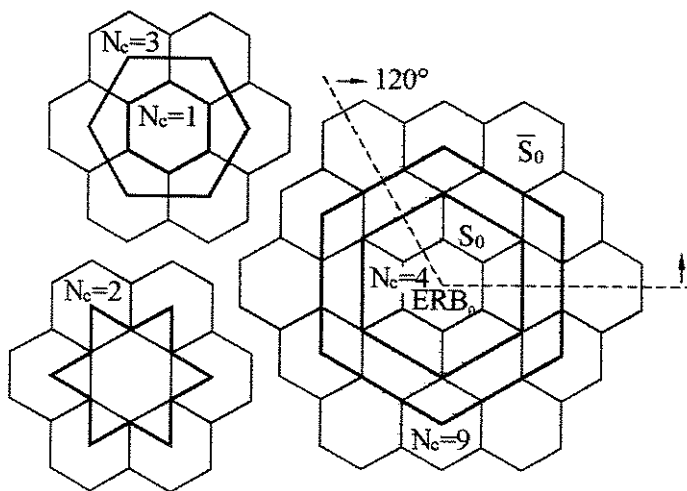


Figura 3.3 – Ilustração das regiões S_0 e $\bar{S}_0$ para $N_c=1, 2, 3, 4$ e 9.

A Tab. 3.2 mostra a média e a variância da interferência externa em função do desvio padrão do somreamento e do número de células que podem assumir o controle da estação móvel. É importante ressaltar que Viterbi [Vit95, p.195] conclui que $N_c=3$ é suficiente para obter a maioria do ganho oriundo do “soft-handoff” quando $\sigma_{dB} = 8/\sqrt{2}$ dB. Esta afirmação embora correta, não permite tirar conclusões para diferentes valores do somreamento. O presente estudo indica a necessidade de algoritmos de pesquisa do sinal piloto eficientes para determinar o enlace com menor atenuação num conjunto de células que minimizem a interferência oriunda de $\bar{S}_0$, conforme mostra a Tab. 3.3. Observa-se a forte dependência existente entre o valor de N_c e o desvio padrão do somreamento.

Tabela 3.2 – Valores da média e do desvio padrão da interferência externa normalizados pelo número de usuários por célula. Valores parametrizados pelo número de estações radio base habilitadas para controlar a estação rádio móvel e pelo desvio padrão do sombreamento. Células hexagonais: $\Gamma=4$, $N_{\text{ERB}}=19$.

σ_{dB}	5,67 dB ^{4.3}		8,0 dB		12,0 dB	
N_c	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
1	2,27	10,81 ^{4.4}	12,24 ^{4.4}	188,063 ^{4.4}	714,44 ^{4.4}	$4,9 \times 10^3$ ^{4.4}
2	0,751	1,91	1,94	12,502 ^{4.4}	36,61 ^{4.4}	$1,7 \times 10^3$ ^{4.4}
3	0,554	0,541	0,948	2,803 ^{4.4}	10,00 ^{4.4}	$2,3 \times 10^3$ ^{4.4}
4	0,532	0,445	0,788	1,634 ^{4.4}	4,66	80,62 ^{4.4}
5	0,528	0,437	0,727	1,526	3,48	100,00 ^{4.4}
6	0,525	0,415	0,674	0,918	2,42	44,72 ^{4.4}
7	0,522	0,410	0,621	0,596	1,25	14,71 ^{4.4}
8	0,523	0,409	0,603	0,462	0,731	3,39 ^{4.4}
9	0,522	0,409	0,602	0,452	0,647	0,491
19	0,523	0,407	0,601	0,445	0,637	0,483

Tabela 3.3 – Discriminação das componentes da potência interferente. Células hexagonais: $\Gamma=4$, $N_{\text{ERB}}=19$.

σ_{dB}	$N_c=4$				$N_c=6$				$N_c=9$			
	média		desvio padrão		média		desvio padrão		média		desvio padrão	
	S_0	$\bar{S}_0$	S_0	$\bar{S}_0$	S_0	$\bar{S}_0$	S_0	$\bar{S}_0$	S_0	$\bar{S}_0$	S_0	$\bar{S}_0$
5,67	0,36	0,17	0,39	0,22	0,43	0,09	0,40	0,14	0,52	0,0	0,41	0,0
8	0,35	0,44	0,37	1,59	0,44	0,23	0,41	0,84	0,60	0,0	0,45	0,0
12	0,29	4,37	0,42	80,66 ^{4.4}	0,40	2,01	0,40	44,72 ^{4.4}	0,64	0,0	0,48	0,0

As Fig. 3.4a ($N_c=9$) e 3.4b ($N_c=4$) mostram o histograma estimado da interferência externa na célula central (todas as células uniformemente carregadas com 10 usuários). Ilustra-se, assim, a relação existente entre N_c e o espalhamento da potência interferente externa. Considerando três valores de N_c (4, 9 e 19), a Tab. 3.4 enfatiza a forte dependência existente entre a interferência externa, o desvio padrão do sombreamento e o número de ERBs mais próximas habilitadas a controlar a estação móvel.

^{4.3} Sombreamento descorrelacionado com desvio padrão de 8 dB equivale a um sombreamento de 5,66 dB no modelo de sombreamento correlacionado com $a^2=b^2=1/2$.

^{4.4} Este valor varia consideravelmente em cada rodada da simulação. Isto se deve ao número insuficiente de células habilitadas para controlar o móvel para este desvio padrão do sombreamento.

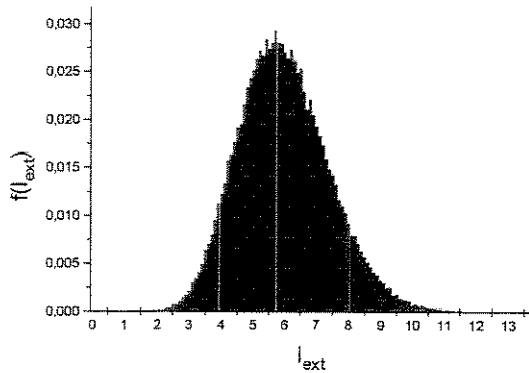


Figura 3.4a – Histograma da interferência externa na célula central: 10 usuários por célula ($N_c=9$, $\Gamma=4$, $\sigma_{dB}=8$).

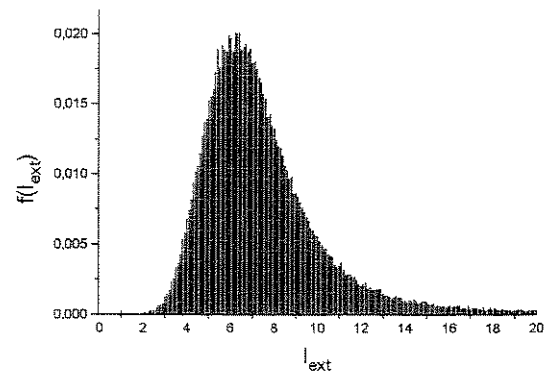


Figura 3.4b – Histograma da interferência externa na célula central: 10 usuários por célula ($N_c=4$, $\Gamma=4$, $\sigma_{dB}=8$).

Tabela 3.4 – Média e desvio padrão da interferência externa. Valores normalizados pelo número de usuários por células. Células hexagonais: $\Gamma=4$, $N_{RRB}=19$.

σ_{dB}	$N_c=4$		$N_c=9$		$N_c=19$	
	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>
0	0,416	0,366	0,416	0,366	0,416	0,366
4	0,467	0,382	0,468	0,385	0,471	0,383
$8/\sqrt{2}$ (5,67)	0,532	0,445	0,522	0,408	0,523	0,407
$10/\sqrt{2}$ (7,07)	0,647	0,839	0,573	0,429	0,571	0,432
8	0,788	1,633	0,602	0,453	0,601	0,445
10	1,57	10,28 ^{4.4}	0,637	0,471	0,637	0,473
12	4,64	80,51 ^{4.4}	0,647	0,491	0,637	0,484

A Tab. 3.5 apresenta resultados para sistemas com 37 células em três distintas configurações: (i) antenas omnidirecionais; (ii) 3 setores idealizados; (iii) 3 setores com diagrama de radiação fornecido pela Fig. 3.2b. Nos sistemas idealizados com três setores por célula, como era de se esperar, a média e a variância da interferência externa se reduzem a 1/3 dos valores encontrados ao se empregar antenas omnidirecionais. Nota-se um significativo aumento da interferência devido a não idealidade das antenas diretivas.

A Tab. 3.6 mostra os efeitos do sombreamento e do expoente da perda de percurso na determinação do número mínimo de camadas necessária para que a média e a variância da interferência externa converjam para seus valores assintóticos. Nota-se uma diminuição dos efeitos do sombreamento na variação da média e da variância da interferência externa com a diminuição do expoente da perda de percurso de quatro para três. Analisando-se a Eq. (3.2), verifica-se que isto se deve à pequena atenuação propiciada pela perda de propagação.

Tabela 3.5 – Valores da média e do desvio padrão da interferência externa normalizados pelo número de usuários por célula. Células hexagonais.

$N_{ERB}=N_c=37$	<i>1 setor por célula</i>		<i>3 setores por célula: diagrama idealizado</i>		<i>3 setores por célula: diagrama real</i>	
$\Gamma=4$						
σ_{dB}	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>
0	0,425	0,361	0,142	0,193	0,206	0,253
5,67 dB	0,538	0,403	0,180	0,229	0,250	0,300
8,0	0,629	0,448	0,210	0,258	0,286	0,333
12,0	0,710	0,499	0,237	0,286	0,315	0,369

Tabela 3.6 - Valores da média e variância da interferência externa. Valores normalizados pelo número de usuários por célula. Resultados parametrizados pelo número de células do sistema e pelo desvio padrão do sombreamento.

Tabela 3.6a – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=3$.

$N_{ERB}=N_c$	$\sigma_{dB}=5,67 \text{ dB}$		$\sigma_{dB}=8,0 \text{ dB}$		$\sigma_{dB}=12,0 \text{ dB}$	
	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>
19	0,925	0,514	0,965	0,559	0,844	0,552
37	1,018	0,511	1,112	0,576	1,030	0,595
61	1,078	0,514	1,198	0,587	1,150	0,609
91	1,115	0,516	1,254	0,576	1,236	0,626

Tabela 3.6b – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=4$.

$N_{ERB}=N_c$	$\sigma_{dB}=5,67 \text{ dB}$		$\sigma_{dB}=8,0 \text{ dB}$		$\sigma_{dB}=12,0 \text{ dB}$	
	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>
19	0,523	0,407	0,601	0,445	0,637	0,484
37	0,538	0,402	0,629	0,448	0,710	0,499
61	0,547	0,407	0,644	0,452	0,747	0,499
91	0,552 ^{4.5}	0,406	0,648	0,443	0,766	0,502

Tabela 3.6c – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=5$.

$N_{ERB}=N_c$	$\sigma_{dB}=5,67 \text{ dB}$		$\sigma_{dB}=8,0 \text{ dB}$		$\sigma_{dB}=12,0 \text{ dB}$	
	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>
19	0,337	0,348	0,390	0,372	0,461	0,416
37	0,339	0,348	0,392	0,367	0,483	0,415

^{4.5} Tempo de simulação para 10 mil iterações com 30 usuários por célula: aproximadamente 275 minutos em um Pentium II, 450 MHz e 128 Mbytes de memória de acesso aleatório

Na Tab. 3.7 leva-se em conta a atividade vocal, que mostra que, além do valor médio, pode-se também assumir que a variância da interferência externa apresenta uma relação linear e diretamente proporcional com o fator de atividade de voz.

Tabela 3.7 - Valores da média e variância da interferência externa normalizados pelo número de usuários por célula. Resultados parametrizados pelo fator de atividade de voz e pelo desvio padrão do sombreamento. $N_{\text{ERB}}=61$; $\Gamma=4$.

<i>Fator de atividade de voz</i>	$\sigma_{\text{dB}}=5,67 \text{ dB}$		$\sigma_{\text{dB}}=8,0 \text{ dB}$		$\sigma_{\text{dB}}=12,0 \text{ dB}$	
	<i>média</i>	<i>variância</i>	<i>média</i>	<i>variância</i>	<i>média</i>	<i>variância</i>
<i>1,0</i>	0,547	0,166	0,644	0,204	0,747	0,249
<i>0,426</i>	0,212	0,0695	0,275	0,0952	0,318	0,115
<i>0,368</i>	0,202	0,0684	0,237	0,0827	0,274	0,101

Gilhausen et al. em [Gil91] determinaram os seguintes limitantes superiores para a média e para a variância da interferência externa:

$$E\left[\frac{I_{\text{ext}}}{P_0}\right] \leq 0,247N_s \quad \text{e} \quad \text{var}\left[\frac{I_{\text{ext}}}{P_0}\right] \leq 0,078N_s \quad (3.6)$$

onde N_s é o número de usuários por setor. Utilizando-se $N_{\text{ERB}} = N_c = 37$ em condições idênticas às indicadas em [Gil91] (fator de atividade de voz de $3/8$, $\Gamma=4$, $\sigma_{\text{dB}}=8 \text{ dB}$ e 3 setores por célula com diagrama de radiação idealizado), foram obtidos 0,236 e 0,0789 para a média e a variância, respectivamente, normalizadas pelo número de usuários por setor. Neste clássico artigo, os autores consideram que o critério da mínima distância é empregado na determinação da célula controladora da estação móvel [Gil91, eq. 8']. Contudo, introduzem um fator de ponderação que anula a interferência gerada por um usuário que deveria ser controlado pela célula alvo, mas não o é devido a não satisfação do critério da distância mínima [Gil91, anexo I]. Este artifício explica a convergência entre os resultados explicitados nesse parágrafo com os mostrados ao longo desta Seção.

3.4 SIMULADOR DE REDES CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA

Esta Seção apresenta resultados de simulações de redes CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com interatividade total entre todas as células do sistema. Este simulador acrescenta a dinâmica do protocolo CDMA/PRMA (CDMA/ALOHA) às características explicitadas na Seção 3.2. A fim de diminuir a demanda computacional, os resultados se referem a uma rede com 19 ERBs. É considerado um expoente de perda de percurso igual a 4.

Considerando valores distintos para o desvio padrão do sombreamento log-normal, as Fig. 3.5 e 3.6 mostram a perda de pacotes em função do número de terminais de voz para as redes CDMA/ALOHA e CDMA/PRMA [Hoe99b], respectivamente. Nesta última, as probabilidades de acesso foram obtidas pela aplicação do critério a-posteriori (vide Seção 2.3). Para o caso de células circulares e $\sigma_{\text{dB}}=0$, os resultados para ambos os protocolos estão de acordo com os apresentados em [Bra96], onde a interferência externa foi modelada pelo seu valor médio. A Fig. 3.5 ilustra o efeito do sombreamento na redução da capacidade do sistema. Enquanto que a Fig. 3.6 mostra a dramática perda de capacidade quando o número de células

pesquisadas pelo sinal piloto não é adequada. Este fenômeno é claramente visualizado ao se verificar que a capacidade para $\sigma_{dB}=8$ dB e $N_c=4$ para células hexagonais é praticamente a metade da capacidade obtida para $N_c=19$.

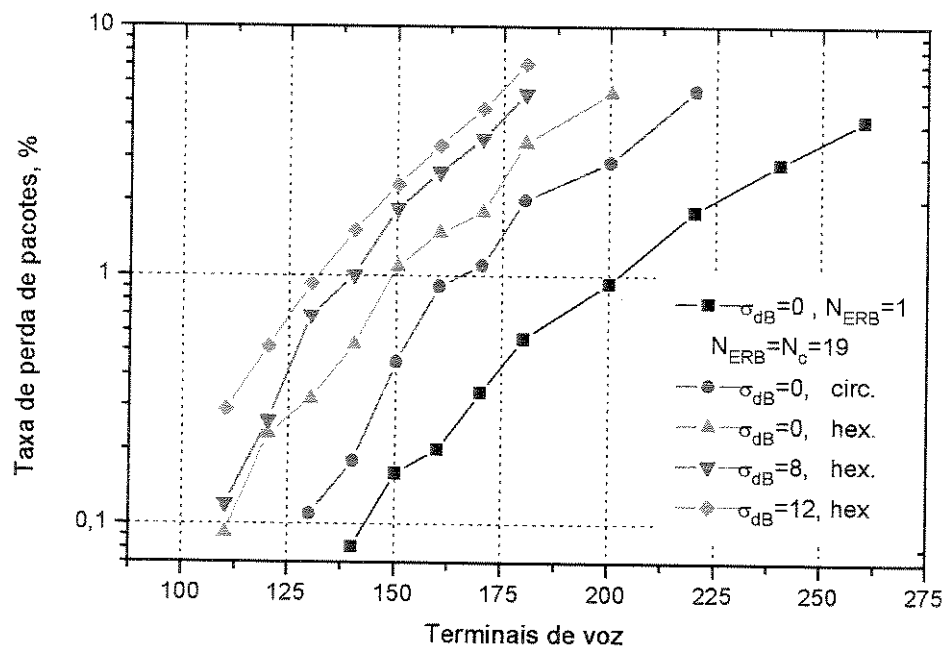


Figura 3.5 – Taxa de perda de pacotes em função do número de terminais de voz para o protocolo CDMA/ALOHA com detetores de atividade de voz de dois estados. Configuração: FDDG_p7T_q20N20D20.

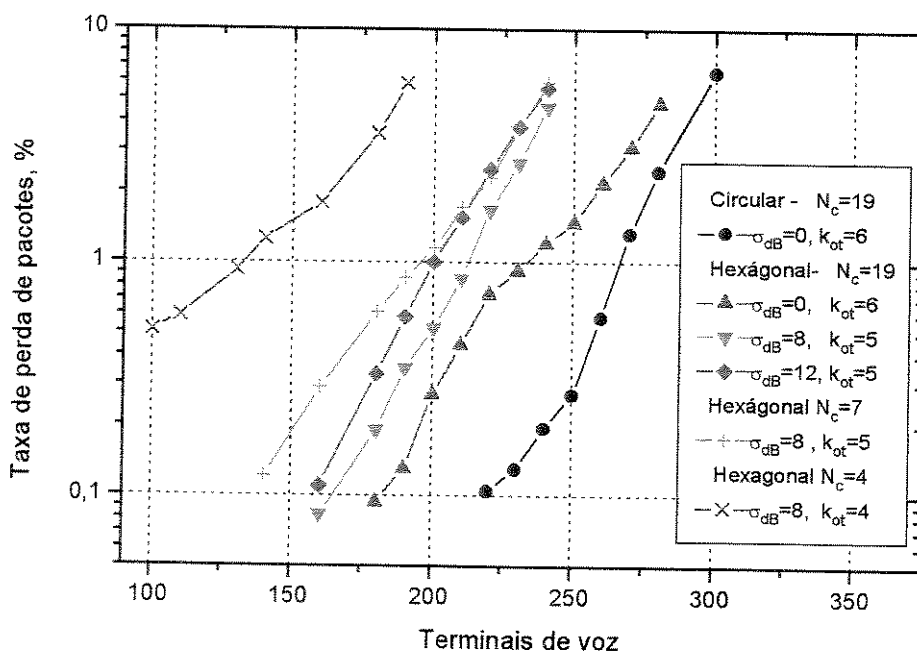


Figura 3.6 – Taxa de perda de pacotes em função do número de terminais de voz para o protocolo CDMA/PRMA com detetores de atividade de voz de dois estados. Configuração: FDDG_p7T_q20N20D20.

Para uma perda média de pacote de $\sim 1\%$, a Tab. 3.8 apresenta o número de usuários suportados pelas redes CDMA/PRMA (permissões de acesso obtidas pelo critério a-posteriori) e CDMA/ALOHA. São explicitados resultados, em ordem decrescente, utilizando-se as seguintes configurações: (i) células omnidirecionais; (ii) três setores por célula com diagrama de radiação idealizado; (iii) três setores por célula com diagrama de radiação real. Ratifica-se que é imprescindível a implementação de sofisticados algoritmos de pesquisa de sinal piloto para minorar os efeitos da interferência externa nos sistemas DS-SS-SS-SS. Para um dado desvio padrão do sombreamento, a Tab. 3.4 indica que a média e variância da interferência externa apresentam praticamente os mesmos valores para $N_c=9$ ou $N_c=19$. Contudo, a Tab. 3.8 evidencia uma perda de capacidade ao reduzir-se N_c de 19 para 9 com $\sigma_{dB}=12$ dB. Esse aparente paradoxo se desfaz na medida em que se considera conjuntamente os seguintes fenômenos: (i) existência de usuários que transmitem seus pacotes de um dado surto de atividade voz para uma célula que não apresenta a menor atenuação no enlace direto (a célula com menor atenuação não satisfaz o critério da distância); (ii) assimetria da perda de pacotes em relação à RSI média (vide Eq. 2.14 a 2.17). A Tab. B.3.1 mostra os valores de K_{ot} empregados na determinação das funções de acesso pelo método a-posteriori.

A Tab. 3.9 mostra o ganho de setorização obtido com diagramas idealizados e reais. Estes valores estão em concordância com os resultados médios apontados na literatura, ou seja, 3,0 (diagrama ideal) e 2,6 (diagrama real) para $\sigma_{dB}=8$ dB e $\Gamma=4$ [New94]. A Tab. 3.10 mostra o ganho de capacidade obtido pelo protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Nota-se que, como observado na Seção 2.9, o aumento da interferência não passível de ser controlada (interferência externa e não idealidade da setorização) causam diminuição do ganho de capacidade. Estas tabelas empregam a configuração FDDG_p7T_q20N20D20.

Tabela 3.8 – Terminais de voz por setor ($N_{ERB}=19$, $\Gamma=4$, $P_{perda}=1\%$, DAV de dois estados). Configuração: FDDG_p7T_q20N20D20.

σ_{dB}	N_c	CDMA/PRMA			CDMA/ALOHA		
		4	9	19	4	9	19
0			235			150	
			247			154	
			209			135	
8		130	210	213	89	138	140
		121	205	210	92	137	139
		111	167	170	77	116	118
12		18	144	200	10	100	133
		16	105	190	9	69	127
		13	99	161	6	62	109

Tabela 3.9 – Ganho de setorização. $N_{ERB}=N_c=19$.

σ_{dB}	CDMA/PRMA		CDMA/ALOHA	
	<i>Ideal</i>	<i>Real</i>	<i>Ideal</i>	<i>Real</i>
0	3,15	2,66	3,08	2,70
8	2,95	2,39	2,98	2,53
12	2,85	2,41	2,86	2,46

Tabela 3.10 – Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Sistema com células setorizadas. $N_{ERB}=N_c=19$.

σ_{dB}	Ganho de capacidade	
	<i>Ideal</i>	<i>Real</i>
0	%	%
	60,39	54,81
8	51,08	44,07
12	49,60	47,70

3.5 EFEITOS DO EXPOENTE DA PERDA DE PERCURSO, DO SOMBREAMENTO E DA SETORIZAÇÃO NA CAPACIDADE DE SISTEMAS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA

A interferência externa é formada pela soma de um grande número de VAs independentes. Portanto, pode-se aplicar a forma causal do teorema do limite central [Pap62, p.234-237] para aproximar a interferência externa por uma VA do tipo chi-quadrada (ou gamma), cuja FDP é dada por

$$f(I_{\text{ext}}) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta^{-\alpha} I_{\text{ext}}^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{I_{\text{ext}}}{\beta}\right) \quad \text{para } I_{\text{ext}} > 0 \quad (3.7)$$

onde $\Gamma(\cdot)$ é a função gamma. A média e variância são dadas por $\alpha\beta$ e $\alpha\beta^2$, respectivamente. Os parâmetros α , β são fornecidos por

$$\alpha = \frac{E[I_{\text{ext}}]^2}{E[(I_{\text{ext}} - E[I_{\text{ext}}])^2]}, \quad \beta = \frac{E[(I_{\text{ext}} - E[I_{\text{ext}}])^2]}{E[I_{\text{ext}}]} \quad (3.8)$$

de tal sorte que os parâmetros da VA chi-quadrada são prontamente determinados ao se fazer uso dos valores desnormalizados da média e da variância da interferência externa na Eq. (3.8).

A Tab. 3.11 apresenta o número de usuários suportados pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA para uma taxa média de perda de pacotes de 1%. Emprega-se em ordem descendente, os seguintes métodos: (i) simulação da rede CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA; (ii) simulação da célula central com a interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada; (iii) simulação da célula central com a interferência externa pelo seu valor médio; (iv) para o protocolo CDMA/PRMA, são também mostrados resultados numéricos com a interferência modelada pelo seu valor médio. Os comentários a seguir tomam como referência os valores obtidos pela simulação das redes CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com 19 ERBs. Supondo tráfego balanceado nas células e sistemas adequadamente otimizados, então a EM se comunica na maior parte do tempo com a ERB de menor atenuação. Nestes casos, a modelagem da interferência externa por uma VA chi-quadrada é adequada. Os resultados obtidos com a modelagem da interferência pelo seu valor médio permitem obter uma razoável estimativa da capacidade quando a aproximação por uma VA chi-quadrada é válida. Verifica-se ainda a concordância entre os resultados obtidos pelo cálculo das expressões numéricas propostas no Capítulo anterior com os resultados obtidos via simulação (interferência modelada pelo seu valor médio). Finalmente, ao modelar inadequadamente a interferência externa por uma VA chi-quadrada ($N_c=4$, $\sigma_{\text{dB}}=8$), constata-se que praticamente a mesma capacidade é obtida por ambos protocolos (neste caso, a interferência externa é predominante no desempenho dos sistemas).

A Tab. 3.12 é análoga a Tab. 3.11, exceto por considerar um sistema com 37 células omnidirecionais ou setorizadas com diagrama de radiação real. O ganho de processamento é reduzido de 15 para 7, visando a redução da carga computacional. A Tab. 3.6b mostra o aumento do valor médio da interferência externa com a adição de mais camadas de células interferentes. Contudo, ao se comparar as tabelas 3.12 e 3.8, verifica-se que a mesma capacidade é obtida para duas ou três camadas de células interferentes. Observe que nos casos simulados, o número médio de usuários acessando canal não faz com que o aumento da interferência externa seja traduzido em decréscimo da capacidade. Estes resultados ratificam a possibilidade de se modelar a interferência externa por uma VA chi-quadrada ou pelo seu valor médio em sistemas otimizados.

Tabela 3.11 – Usuários por célula suportados pelos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA ($P_{\text{perda}}=1\%$, $N_{\text{ERB}}=19$, $\Gamma=4$, detetor de dois estados). Parâmetros da função de acesso podem ser encontrados na Tab. B.3.2. Configuração: FDDG_p15T_q20N20D20.

σ_{dB}	CDMA/PRMA		CDMA/ALOHA	
	$N_c=4$	$N_c=9, 19$	$N_c=4$	$N_c=9, 19$
0 dB	533	533	414	414
	529	529	408	408
	554	554	419	419
	554	554	----	----
5,67 dB	477	486	380	387
	479	487	381	389
	517	519	394	396
	513	517	----	----
8,0 dB	317	462	240	370
	228	461	205	363
	442	493	348	380
	443	495	----	----

Tabela 3.12 – Usuários por setor suportados pelo protocolo CDMA/ALOHA ($P_{\text{perda}}=1\%$, $N_{\text{ERB}}=N_c=37$, $\Gamma=4$, detetor de dois estados). Configuração: FDDG_p7T_q20N20D20.

σ_{dB}	1 setor por célula	3 setores por célula: diagrama real
0 dB	150	135
	152	135
	155	144
8,0 dB	135	117
	135	127
	143	130
12,0 dB	124	110
	129	120
	137	123

É empregada a configuração FDDG_p15T_q20N20D20 nas figuras 3.7 a 3.10. A Fig. 3.7 ilustra o efeito do perda de percurso, em um ambiente sem sombreamento log-normal, na capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. A diferença entre o número de usuário por célula com antenas omnidirecionais e o número de usuários por setor se deve à não-idealidade do diagrama de radiação das antenas setorizadas. A figuras 3.8 a 3.10 mostram que a perda de capacidade devido ao aumento do desvio padrão do sombreamento log-normal depende fortemente do coeficiente da perda de percurso. Finalmente, a Tab. 3.13 mostra que, embora elevado, o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao

protocolo CDMA/ALOHA diminui com o aumento da aleatoridade da interferência externa.

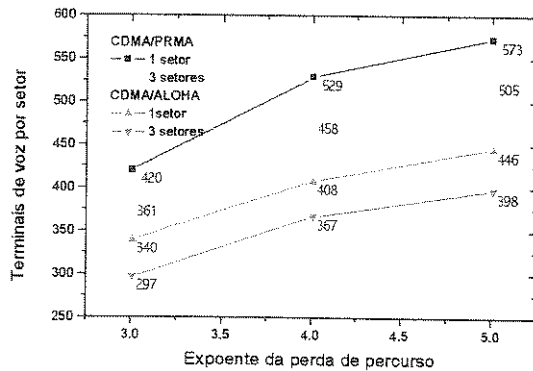


Figura 3.7 - Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do expoente da perda de percurso em um ambiente sem sombreamento log-normal. Funções de acesso: Tab. B.3.3a, b ou c.

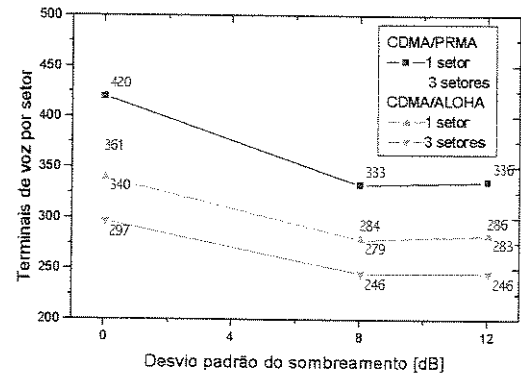


Figura 3.8 - Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do desvio padrão do sombreamento em um ambiente com $\Gamma=3$. Funções de acesso: Tab. B.3.3a.

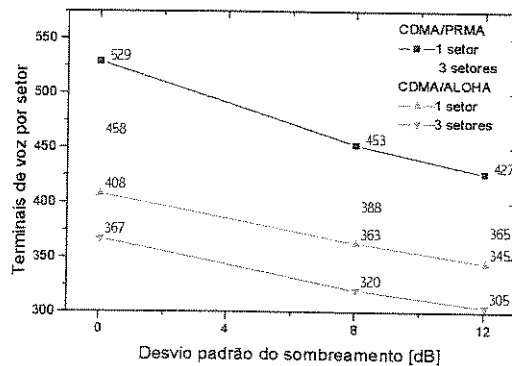


Figura 3.9 - Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do desvio padrão do sombreamento em um ambiente com $\Gamma=4$. Funções de acesso: Tab. B.3.3b.

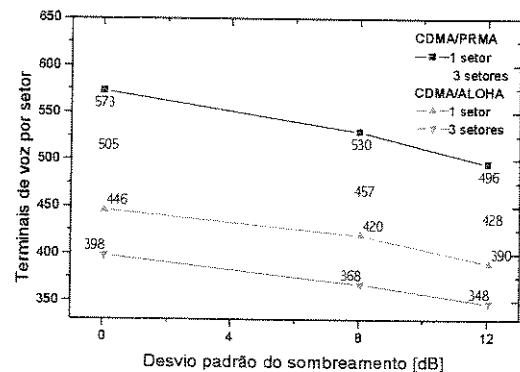


Figura 3.10 - Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em função do desvio padrão do sombreamento em um ambiente com $\Gamma=5$. Funções de acesso: Tab. B.3.3c.

Tabela 3.13 – Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Valores parametrizado pelo desvio padrão do sombreamento log-normal, pelo expoente da perda de percurso e pelo do número de setores por célula.

σ_{dB}	0 dB		8 dB		12 dB	
Γ	1 setor	3 setores	1 setor	3 setores	1 setor	3 setores
3	%	%	%	%	%	%
	23,53	21,54	19,35	15,45	18,72	16,26
4	29,66	24,80	24,79	21,25	23,77	19,67
5	28,47	26,88	26,19	24,18	27,17	22,99

Capítulo 4

DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA EM CANAIS COM DESVANECIMENTO

4.1 INTRODUÇÃO

Fundamentalmente, o objetivo deste capítulo é investigar o desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em canais com desvanecimento. Limita-se aqui a considerar unicamente tráfego de voz, uma vez que estudos para tráfego multimídia são efetuados no Cap. 5.

O entrelaçamento (“interleaving”) é uma técnica concebida para quebrar a memória em canais que apresentam erros em surtos, visto que códigos corretores de erro convencionais apresentam uma maior eficiência em canais com erros aleatórios. Considerações sobre o entrelaçamento de pacotes de voz em sistemas CDMA/TDMA são tecidas na Seção 4.2. A análise de desempenho dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em canais com desvanecimento Rayleigh e Nakagami-m é efetuada nas Seções 4.3 e 4.4, respectivamente. Breves comentários sobre a modelagem de canais com desvanecimento do tipo Weibull podem ser encontrados na Seção 4.5. Nas Seções anteriores foi assumido que o controle de potência (CP) é apenas capaz de controlar a potência média recebida. Pode ser encontrado na literatura ([Pad94], por exemplo) resultados experimentais que indicam que a RSI na saída da estrutura de recepção da ERB (formadas por um conjunto antenas e receptores do tipo RAKE) é uma VA do tipo log-normal, cuja média é a potência nominal desejada e o desvio padrão modela as imperfeições no controle de potência. Assim, a Seção 4.6 cumpre o necessário objetivo de analisar os efeitos do CP imperfeito no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA.

4.2 DESEMPENHO DO PROTOCOLO CDMA/PRMA COM ENTRELAÇAMENTO ENTRE QUADROS

Entrelaçamento é a modificação determinística da ordem dos símbolos codificados transmitidos no canal. Esta técnica é concebida para dispersar surtos de erros e, conseqüentemente, aumentar a eficiência dos códigos corretores de erro em canais com desvanecimento [Won92, p.348-358]. A profundidade do entrelaçamento, necessária para prover a diversidade temporal, depende do tempo de coerência do canal, ΔT_c . Esta é uma medida estatística do tempo em que a resposta impulsiva permanece aproximadamente constante.

A Tab. 4.1 mostra o tempo de coerência em função da velocidade da estação móvel (EM). Nesta, foram empregadas as seguintes definições: (I) $\Delta T_c = 1/B_d$; (II) $\Delta T_c = 9/(16\pi B_d)$ e (III) $\Delta T_c = 0,423/B_d$ [Rap96, p.165]. Nota-se que a banda Doppler do canal, $B_d \equiv v \cdot f_c / c$, depende da velocidade do móvel (v) em m/s, da frequência da portadora (f_c) em Hz e da velocidade da luz ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s) [Pro95, p. 762-767]. A terceira definição empregada é a média geométrica das duas anteriores, constituindo-se em uma regra de algebeira bastante utilizada em comunicações digitais.

Analisando os dados da tabela ao lado, verifica-se que o entrelaçamento dos símbolos a serem transmitidos em um slot pode não ser efetivo em sistemas CDMA/TDMA, cujos pacotes apresentem uma pequena duração. Nestes, é mais efetivo realizar o entrelaçamento entre os símbolos a serem transmitidos em diferentes quadros. A profundidade do entrelaçamento depende do compromisso entre o atraso máximo permitido para o serviço requerido e o tempo de coerência do canal. Para exemplificar, resalta-se a proposta europeia para serviços de voz na interface do ar de 3ª geração CDMA/TDMA no modo TDD, a qual contempla um entrelaçamento sobre dois quadros de 10 ms [UTRA98, p. 62].

Tabela 4.1 - Tempo de coerência em função da velocidades da EM, $f_c=2$ GHz.

v (km/h)	B_d (Hz)	ΔT_c (ms)		
		I	II	III
5	9,2	108	19,3	45,7
10	18,5	54	9,7	22,8
20	37	27	4,8	11,4
30	55,5	18	3,2	7,6
40	74	13,5	2,4	5,7
50	92,6	10,8	1,9	4,6
60	111,1	9,0	1,6	3,8
80	148,1	6,7	1,2	2,8
100	185,2	5,4	0,97	2,3

Investiga-se agora as modificações necessárias para implementar o entrelaçamento entre quadros no protocolo CDMA/PRMA, visto que a implementação em sistemas CDMA/ALOHA é imediata. Isto porque o livre acesso ao canal faz com que a realização do entrelaçamento seja o único atraso constituinte do retardo de acesso. Já para o protocolo CDMA/PRMA, a fim de evitar a sobreposição do atraso do entrelaçamento com o atraso inerente ao processo de obtenção de reserva, é proposto que o detetor de atividade de voz dispare o processo de obtenção de reserva ao sinalizar a passagem do estado de silêncio para o de fala. O entrelaçamento não é aplicado a este pacote a fim de evitar atrasos na obtenção da reserva. Contudo, o incremento da susceptibilidade ao desvanecimento pode ser contrabalançado, por exemplo, pelo aumento do ganho de processamento devido à menor taxa de transmissão deste pacote (este pacote transmite somente informação de controle). Obviamente, é necessário mudar os parâmetros do código corretor de erro dos pacotes transmitidos para a obtenção da reserva. Os pacotes de informação continuam sendo descartados caso a reserva não seja concretizada em um período de tempo pré-estabelecido. Verifica-se que ao efetivar o entrelaçamento sobre dois quadros e, concomitantemente, disparar o processo de reserva, haverá situações em que o entrelaçamento ainda estará em curso no caso da reserva ser obtida no primeiro quadro. Entre outras, pode-se efetivar as seguintes abordagens: (i) transmitir o segundo pacote apenas com informação de controle com o intuito de facilitar a implementação de algoritmos de controle de potência; (ii) não transmitir no quadro subsequente na medida em que a reserva já esteja sinalizada na ERB. Os resultados desta Seção corroboram a primeira abordagem, pois permite investigar uma situação de maior tráfego no canal.

A Tab. 4.2 mostra resultados para distintas configurações do protocolo CDMA/PRMA. Sistemas sem entrelaçamento entre quadros (SEEQ) utilizam os mesmos parâmetros da Tab. 2.26. Lembra-se que neste caso o atraso máximo permitido é de um período de quadro. As demais configurações empregam entrelaçamento entre dois quadros, onde o atraso máximo permitido é compatível com o tempo necessário para a efetivação do entrelaçamento, ou seja, dois períodos de quadro. Verifica-se que o maior tráfego no

canal gerado pelos pacotes adicionais para a obtenção de reserva é contrabalançado pela diminuição dos pacotes descartados devido ao aumento do atraso máximo permitido. Em sistemas TDD, os enlaces direto e reverso são transmitidos de maneira “*half-duplex*” na mesma portadora [Oja98, cap. 9]. No contexto do protocolo CDMA/PRMA, verifica-se que pacotes de voz gerados quando o enlace direto está ativo têm seus processos de obtenção de reserva postergados para o próximo enlace reverso. Os valores na segunda linha (para cada período de quadro especificado) na Tab. 4.2 mostram que a maior concentração de terminais em busca de reserva no início do enlace reverso tem um efeito desprezível na capacidade. Isto porque, em um sistema otimizado, todos os slots apresentam uma carga semelhante na região de operação nominal do sistema. Observa-se que os efeitos do entrelaçamento entre quadros na capacidade de sistemas com detetores de três estados depende do tamanho do quadro empregado, bem como do atraso máximo permitido. Isto, conforme visto na Seção 2.18, se deve ao menor ou maior casamento da constante de tempo média do detetor de atividade de voz com o período de quadro.

Tabela 4.2 - Efeitos do entrelaçamento entre quadros na capacidade do sistema CDMA/PRMA com codificadores de voz de 2 e 3 estados. Sistemas SEEQ utilizam a configuração $FDDGp7T_q \times N20D20$ e $TDDGp7T_q \times N20D20$, onde x designa o período do quadro (4,615, 10 ou 20 ms). Sistemas com entrelaçamento entre quadros (CEEQ) empregam a configuração $FDDGp7T_q \times N20D40$ e $TDDGp7T_q \times N20D40$, com a utilização de entrelaçamento entre dois quadros. Os resultados na segunda linha (para cada período de quadro especificado) referenciam a sistemas operando no modo TDD. As funções de acesso empregadas na configuração $FDDGp7T_q \times N20D20$ podem ser encontradas na Tab. B.2.8a, e as demais na Tab. B.4.1.

Tabela 4.2a – Detetor de dois estados. $P_{\text{perda}}=1\%$.

T_q (ms)	M	
	SEEQ	CEEQ
4,615	350	352
	349	353
10	369	371
	368	371
20	363	361
	360	360

Tabela 4.2b – Detetor de três estados. $P_{\text{perda}}=1\%$.

T_q (ms)	M	
	SEEQ	CEEQ
4,615	388	395
	388	395
10	405	404
	405	404
20	385	368
	381	366

4.3 EFEITOS DO DESVANECIMENTO DO TIPO RAYLEIGH NO DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA

Primeiramente, são apresentadas distintas modelagens para canais com desvanecimento Rayleigh, onde são enfatizadas as peculiaridades inerentes ao enlace reverso de sistemas DS-CDMA/TDMA. Em seguida, é analisado o desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA nestes ambientes. Assume-se que a perda de percurso e o sombreamento log-normal são compensados, de tal sorte que a potência média é controlada. Contudo, a dinâmica do controle de potência pode ser insuficiente para compensar o desvanecimento Rayleigh. Nota-se que os resultados se referem à modulação de dados e de espalhamento

BPSK coerente e DS-CDMA, respectivamente.

4.3.1 Desvanecimento plano em frequência: interferência modelada como uma densidade espectral de potência plana

Considere um sistema de espectro espalhado (SS – *Spread Spectrum*) com um único usuário transmitindo em um canal com desvanecimento plano. Neste caso, a relação sinal ruído (RSR) de bit instantânea na saída do filtro casado pode ser expressa por [Pro95, p. 773]

$$\gamma_b = \frac{\alpha^2 E_b}{N_0} \quad (4.1)$$

onde α é uma VA do tipo Rayleigh que modela o desvanecimento plano e E_b e N_0 denotam a energia por bit e a densidade espectral de potência unilateral do ruído aditivo térmico, respectivamente.

Suponha que as mensagens são codificadas por meio de um código de bloco linear e transmitidas em pacotes, cuja duração é menor que o tempo de coerência do canal. Logo, o entrelaçamento entre os bits de um mesmo pacote não é efetivo. Considerando que o desvanecimento é constante durante a transmissão do pacote, então a probabilidade de um pacote ser recebido corretamente ao se utilizar decodificação abrupta é fornecida por^{4.1}

$$Q_E = E \left[\sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (P_e)^i (1 - P_e)^{n-i} \right] \quad (4.2)$$

onde $E[x]$ denota o valor esperado da VA x . A probabilidade de erro de bit (BER do inglês *Bit Error Rate*) instantânea para a modulação BPSK coerente é dada por

$$P_e = Q(\sqrt{2\gamma_b}) \quad (4.3)$$

onde $Q(x)$ denota a função Gaussiana-Q (vide Seção 2.5).

Postula-se agora que o entrelaçamento entre quadros, conjugado com a diminuição do tempo de coerência do canal, faça com que os símbolos de um dado pacote sofram os efeitos médios do desvanecimento. Dessa forma, a probabilidade de um pacote ser recebido corretamente pode ser expressa por

$$Q_E = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} \left(\overline{P_e} \right)^i \left(1 - \overline{P_e} \right)^{n-i} \quad (4.4)$$

Neste caso, a probabilidade de erro de bit média para a modulação BPSK coerente é fornecida por

$$\overline{P_e} = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2\gamma_b}) p(\gamma_b) d\gamma_b \quad (4.5)$$

onde $p(\gamma_b)$ é a FDP de γ_b . Nota-se que quando α é uma VA do tipo Rayleigh, então γ_b é uma VA do tipo exponencial negativa [Pro95, p.773], ou seja,

^{4.1} Comentários a respeito da aplicabilidade do modelo de canal binário simétrico para canais que apresentam surtos de erro podem ser encontrados na Seção 2.5.

$$p(\gamma_b) = \frac{1}{\overline{\gamma_b}} \exp\left(-\frac{\gamma_b}{\overline{\gamma_b}}\right) \quad (4.6)$$

onde $\overline{\gamma_b}$ é o valor esperado de (4.1).

Convencionalmente, a literatura denomina como desvanecimento lento aquele que permanece constante durante um ou mais intervalos de símbolo. Correspondentemente, desvanecimento rápido é aquele que varia em um intervalo menor do que o do símbolo transmitido no canal [Sk197a]. Neste trabalho, utiliza-se os jargões desvanecimento lento e rápido tendo como referência a variação da potência recebida em um dado pacote [Jal90]. Portanto, (4.2) e (4.4) modelam sistemas com desvanecimento lento e rápido, respectivamente.

Modelando-se a IMA como uma densidade espectral de potência plana, então a RSI por bit instantânea para o i -ésimo usuário em um sistema DS-CDMA com K usuários acessando o canal pode ser expressa por [Hoe98d]^{4.2}

$$\gamma_{b_i} = \frac{\alpha_i^2 E_b}{I_0} = \frac{\alpha_i^2 E_b}{\frac{2}{3G_p} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K \alpha_k^2 E_b + N_0} = \frac{\alpha_i^2 \frac{E_b}{N_0}}{\frac{2}{3G_p} (K-1) \frac{E_b}{N_0} + 1} \quad (4.7)$$

onde foi assumido que $\overline{\alpha_i^2} = 1$. Assim, a RSI por bit média é fornecida por

$$\overline{\gamma_{b_i}} = \frac{E_b}{I_0} \quad (4.8)$$

Finalmente, a probabilidade de sucesso na transmissão de pacote em canais com desvanecimento Rayleigh plano e lento é fornecida por (4.2) ao empregar (4.7) em (4.3). Já para canais com desvanecimento Rayleigh plano e rápido deve ser utilizada (4.4), com a substituição de (4.7) e (4.8) em (4.5) e (4.6).

4.3.2 Desvanecimento plano em frequência: interferência modelada como uma soma de variáveis aleatórias

Utilizando o conceito do valor esperado condicionado como uma VA [Pap91, p.169], então a RSI por bit instantânea para o i -ésimo usuário, expressa por (4.7), na saída de um simples detector de correlação modificar-se-á para [Hoe98d]

$$E[\gamma_{b_i} / \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K] = \frac{\alpha_i^2 \frac{E_b}{N_0}}{\frac{2}{3G_p} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K \alpha_k^2 \frac{E_b}{N_0} + 1} \quad (4.9)$$

^{4.2} Nota-se que ao se utilizar as igualdades $\gamma_{b,i} = 2RSI_i$ e $P_i = \alpha_i^2 E_b / T_b$, então verifica-se que (2.16) e (4.7) se equivalem.

onde α_k ($k=1,2,\dots,K$) são VAs independentes do tipo Rayleigh que modelam o desvanecimento plano. Nota-se que se assume que $\overline{\alpha_i^2} = 1$.

No caso de desvanecimento lento, a BER instantânea pode ser obtida ao utilizar (4.9) em (4.3). Já no caso de desvanecimento rápido, a BER média para a modulação BPSK coerente é dada por

$$\overline{P_e} = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty Q\left(\sqrt{2E[\gamma_{b_i} / \alpha_1, \dots, \alpha_K]}\right) p(\alpha_1, \dots, \alpha_K) d\alpha_1 \dots d\alpha_K \quad (4.10)$$

A probabilidade de sucesso na transmissão de pacotes é obtida ao empregar (4.2) e (4.4) para desvanecimento lento e rápido, respectivamente.

4.3.3 Desvanecimento seletivo em frequência: interferência modelada como uma densidade espectral de potência plana

Assumindo-se que o número de independentes caminhos, L_c , do canal de múltiplos percursos é idêntico para todos os usuários e modelando-se a interferência como uma densidade espectral de potência, então a RSI por bit para o i -ésimo usuário na saída do j -ésimo braço de um receptor de correlação pode ser expressa por [Hoe98d]

$$\gamma_{b_{i,j}} = \frac{\alpha_{i,j}^2 \frac{E_b}{L_c N_0}}{\frac{2}{3G_p} \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^{L_c} \overline{\alpha_{i,m}^2} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K \sum_{m=1}^{L_c} \overline{\alpha_{k,m}^2} \right) \frac{E_b}{L_c N_0} + 1} \quad (4.11)$$

onde o primeiro e o segundo somatórios do denominador modelam a auto-interferência causada pelos múltiplos caminhos e a IMA, respectivamente. Nota-se que ao se assumir que $\sum_{m=1}^{L_c} \overline{\alpha_i^2} = L_c$ para todos os K usuários, então a RSI por bit se reduz a [Pah95, p.404]

$$\gamma_{b_{i,j}} = \frac{\alpha_{i,j}^2 \frac{E_b}{L_c N_0}}{\frac{2(K L_c - 1)}{3G_p} \frac{E_b}{L_c N_0} + 1} \quad (4.12)$$

No caso de se empregar um esquema de combinação de razão máxima (MRC, do inglês *Maximum Ratio Combiner*) com L_{mrc} ramos independentes de diversidade, então a RSI por bit pode ser expressa por [Skl97b]

$$\gamma_{b_{mrc}} = \sum_{j=1}^{L_{mrc}} \gamma_{i,j} = \sum_{j=1}^{L_{mrc}} \frac{\alpha_{i,j}^2 \frac{E_b}{L_c N_0}}{\frac{2(K L_c - 1)}{3G_p} \frac{E_b}{L_c N_0} + 1} \quad (4.13)$$

A probabilidade de erro de pacote pode ser obtida utilizando-se (4.13) nas expressões desenvolvidas na Subseção 4.3.1. Nota-se que para o caso de desvanecimento rápido onde todos os caminhos para todos os K usuários apresentam a mesma potência média, então a probabilidade de erro de bit média pode ser expressa por [Pro95, p.781]

$$\overline{P_e} = \left[\frac{1}{2} (1 - \mu)^{L_{\text{mrc}}} \right] \sum_{k=0}^{L_{\text{mrc}}-1} \binom{L_{\text{mrc}}-1-k}{k} \left[\frac{1}{2} (1 + \mu)^k \right] \quad (4.14)$$

onde por definição $\mu = \sqrt{\frac{\overline{\gamma_{i,j}}}{1 + \overline{\gamma_{i,j}}}}$. Finalmente, a probabilidade de sucesso na transmissão de pacote pode ser obtida ao se utilizar (4.14) em (4.4).

4.3.4 Desvanecimento seletivo em frequência: interferência modelada como uma soma de variáveis aleatórias

Utilizando novamente o conceito do valor esperado condicionado como uma VA, então a RSI por bit instantânea para o i -ésimo usuário na saída do j -ésimo braço de um receptor de correlação é fornecida por

$$\gamma_{b_{i,j}} = \frac{\alpha_{i,j}^2 \frac{E_b}{L_c N_0}}{\frac{2}{3G_p} \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^{L_c} \alpha_{i,m}^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K \sum_{m=1}^{L_c} \alpha_{k,m}^2 \right) \frac{E_b}{L_c N_0} + 1} \quad (4.15)$$

onde assume-se que $\overline{\alpha_{i,j}^2} = 1$. Utilizando que a RSI por bit na saída do receptor RAKE com L_{mrc} ramos

independentes de diversidade é dada por $\gamma_{b_{\text{mrc}}} = \sum_{j=1}^{L_{\text{mrc}}} \gamma_{b_{i,j}}$, pode-se então recorrer aos resultados da

subseção 4.3.2 para calcular a taxa de sucesso na transmissão de pacotes.

4.3.5 Comentários adicionais sobre desvanecimento rápido e lento

Considere uma antena com polarização vertical e ganho constante na direção do azimute, ângulo de chegada do sinal com distribuição uniforme entre 0 a 2π e uma portadora contínua sem modulação. Neste caso, pode-se demonstrar que a correlação do envelope de dois sinais Rayleigh recebidos em intervalos de tempo separados por τ segundos é dada por [LeeW98, p.226]

$$\rho(\tau) = J_0^2(\beta v \tau) \quad (4.16)$$

onde $J_0(x)$ denota uma função de Bessel de primeira classe e ordem 0, $\beta=2\pi/\lambda$ é a constante de fase do espaço livre que transforma distância para radianos de fase, λ é o comprimento de onda em metros e v é a velocidade do móvel em m/s.

O modelo com alta densidade de espalhadores supra descrito (Eq. 4.16) é mais adequado para modelar o efeito Doppler na EM ou na ERB em sistemas micro e pico celulares. Isto porque na ERB de sistemas macro celulares, o ângulo de chegada do sinal geralmente não é uniforme entre 0 e 2π . Nestes ambientes, o fator de correlação de dois sinais na ERB pode ser expresso por [Yac93, p.204]

$$\rho(\tau) = \left(\int_{-\pi/2+\alpha}^{\pi/2+\alpha} p(\theta) \cos[\beta V \tau \cos(\theta - \alpha)] d\theta \right)^2 + \left(\int_{-\pi/2+\alpha}^{\pi/2+\alpha} p(\theta) \sin[\beta V \tau \cos(\theta - \alpha)] d\theta \right)^2 \quad (4.17)$$

Assume-se que a FDP do ângulo de chegada da onda plana que chega na ERB no ângulo central α é dada por [Yac93, p.204]

$$p(\theta) = \frac{Q}{\pi} \cos^n(\theta - \alpha) \quad (4.18)$$

onde Q é uma fator de normalização. Finalmente, a relação entre o parâmetro n e o ângulo de meia potência $\Delta\phi$ pode ser expresso por $\cos^n\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Nota-se que $\Delta\phi$ depende de considerações sobre o ambiente no qual se dá a comunicação. Assim, um valor pequeno de $\Delta\phi$ modela um ambiente com poucos espalhadores, de tal forma que o sinal recebido na ERB fica confinado em um ângulo de chegada pequeno.

Em ordem decrescente, a Tab. 4.3 mostra o fator de correlação na ERB e na EM para distintos parâmetros. Imediatamente, verifica-se um maior fator de correlação para os sinais recebidos na ERB. Comparando-se estes resultados com o modelo II da Tab. 4.1, verifica-se que aquele fornece o tempo de coerência correspondente a um fator de correlação de aproximadamente 0,5 no modelo com alta densidade de espalhadores. Por último, indica-se que em ambientes interiores, o espectro Doppler é modelado como plano no intervalo $-f_{d,\max}$ a $+f_{d,\max}$, onde a frequência de Doppler máxima é $f_{d,\max} = \frac{v}{\lambda} = \frac{v f_c}{c}$ [Pah95, p.162].

Tabela 4.3 – Coeficiente de correlação do envelope de sinais Rayleigh recebidos na ERB e na EM (alta densidade de espalhadores), nesta ordem. A frequência da portadora (f_c) é de 2 GHz.

v	3 km/h			30 km/h			60 km/h			100 km/h		
$\Delta\phi/2$ (n)	90° (1)	66° (2)	30° (5)	90°	66°	30°	90°	66°	30°	90°	66°	30°
$\tau=1$ ms	1	1	1	0,99	1	1	0,98	0,99	0,99	0,93	0,96	0,99
	1			0,94			0,77			0,47		
$\tau=10$ ms	0,99	1	1	0,56	0,71	0,89	0,21	0,36	0,67	0,14	0,22	0,45
	0,94			0,14			0,09			0		
$\tau=50$ ms	0,86	0,91	0,97	0,09	0,15	0,31	0,04	0,07	0,16	0,03	0,04	0,09
	0,14			0,1			0,01			0		

4.3.6 Análise de desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA

Sistemas do tipo DS-CDMA/TDMA tem uma maior aplicabilidade no modo de operação TDD. Fundamentalmente, isto se deve à extrema dificuldade para implementar algoritmos de controle de potência em sistemas que operam em regime de transmissão descontínuo (ou seja, em slots de tempo) no modo FDD. Isto porque a transmissão em diferentes bandas de frequência descorrelaciona o desvanecimento observado nos enlaces direto e reverso, tornando necessário que o controle de potência de malha fechada trabalhe com uma taxa de operação mínima (i.e., no padrão IS-95B é enviado um comando a cada 1,25 ms). Assim, os sistemas analisados estão configurados para operar no modo TDD (vide anexo A).

Basicamente, os resultados mostrados referenciam duas situações extremas. Por um lado, o desempenho dos protocolos em canais com desvanecimento rápido permite obter conclusões sobre os efeitos médios do desvanecimento em sistemas DS-CDMA/TDMA com estruturas de recepção convencionais (ou seja, receptor do tipo RAKE). Por outro lado, canais com desvanecimento lento modelam uma situação de extrema exigência pela ocorrência de erros em surtos. Neste caso, assume-se que o desvanecimento observado por um dado terminal de voz é descorrelacionado durante período de um quadro. Tal situação, dificulta demasiadamente a implementação de algoritmos de controle de potência em sistemas do tipo DS-CDMA/TDMA. Por último, ressalta-se a utilização de $E_b/N_0=20$ dB (sistema limitado por interferência) em sistemas com codificadores de voz de dois estados, a menos que seja indicado ao contrário.

4.3.6.1 Canais com mesma potência em todos os percursos e número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal

A Fig. 4.1 mostra a taxa de perda de pacotes para o protocolo CDMA/PRMA em canais com desvanecimento Rayleigh rápido, onde a IMA foi modelada como uma densidade espectral de potência plana. A Tab. 4.4 mostra resultados referentes à Fig. 4.1. O modelo numérico para o protocolo CDMA/PRMA foi desenvolvido para sistemas FDD sem entrelaçamento. Assim, são também mostrados resultados obtidos com esta configuração. A semelhança entre os resultados numéricos com os obtidos via simulação indica a validação mútua das distintas abordagens. Ao modelar a interferência como uma soma de variáveis aleatórias, obteve-se os seguintes resultados uma taxa de perda de pacotes de ~1% no modo TDD: (a) 133 terminais de voz, M , para $L=1$; (b) $M=279$ para $L=3$; (c) $M=332$ para $L=6$. Tomando estes resultados como referência, verifica-se uma discrepância máxima de 4% em relação aos resultados mostrados na Tab. 4.4. Assim, a aproximação da interferência por uma densidade espectral de potência permite obter estimativas adequadas da capacidade com uma menor demanda computacional.

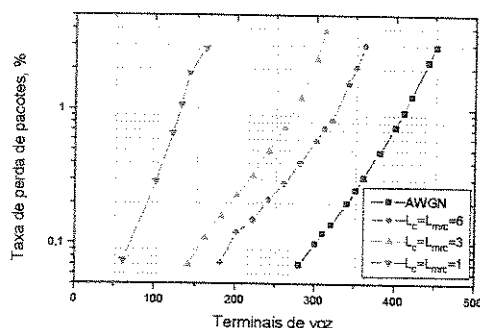


Figura 4.1 – Taxa de perda de pacotes de voz para o sistema CDMA/PRMA unicelular em canais AWGN e com desvanecimento Rayleigh rápido. Configuração: TDDGp16Tq10N10D20. Funções de acesso: Tab. B.4.2a.

Ao considerar uma perda máxima de pacotes de 1%, a Tab. 4.5 mostra o número de terminais de voz em sistemas CDMA/ALOHA em canais com desvanecimento rápido Rayleigh. Evidencia-se o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Novamente, verifica-se a semelhança dos resultados obtidos com as distintas modelagens da interferência.

Tabela 4.4 – Resultados de simulação referentes a uma taxa de perda de pacotes de ~1% para os casos mostrados na Fig. 4.1. Resultados de simulação e numéricos, nesta ordem, para sistemas FDD sem entrelaçamento.

L_c		Simulação (Numéricos)		
		M	P_{cpd}	P_{desc}
1	TDD	128	0,77	0,22
	FDD	130 (132)	0,75 (0,72)	0,24 (0,27)
3	TDD	268	0,85	0,08
	FDD	279 (282)	0,90 (0,94)	0,10 (0,06)
6	TDD	322	0,83	0,1
	FDD	329 (338)	0,87 (0,92)	0,13 (0,08)

Tabela 4.5 – Resultados de simulação referentes a uma perda de pacotes de aproximadamente 1% para o protocolo CDMA/ALOHA em canais com desvanecimento rápido Rayleigh. É também mostrado o ganho do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA.

Configuração: TDDGp16Tq10N10D20.

Interferência	Densidade espectral de potência		Soma de variáveis aleatórias	
	M	Ganho %	M	Ganho %
$L_c=1$	81	58,02	86	54,65
$L_c=3$	202	32,67	208	34,13
$L_c=6$	245	31,43	250	32,80

Para o canais AWGN, a capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA é de 410 e 315, respectivamente, ao se considerar uma taxa de perda de pacotes de ~1%. Levando-se em conta a interferência modelada como uma soma de VAs nos sistemas CDMA/PRMA, então a perda de capacidade oriunda do desvanecimento Rayleigh rápido é: (i) 67,56 % para $L=1$; (ii) 31,95 % para $L=3$; (iii) 19,02 % para $L=6$. Já para o protocolo CDMA/ALOHA a perda é de: (i) 72,70 % para $L=1$; (ii) 33,97 % para $L=3$; (iii) 20,63 % para $L=6$. Assim, pode-se concluir que o esquema de diversidade empregado é capaz de combater adequadamente o desvanecimento rápido.

Mantidas as condições anteriores, a Tab. 4.6 explicita os resultados para o caso de desvanecimento lento. Os resultados mostrados em ordem descendente referenciam às seguintes nuances da configuração básica: (i) sem entrelaçamento entre quadros; (ii) entrelaçamento com profundidade de dois quadros; (iii) entrelaçamento com profundidade de três quadros. Conforme a Seção 4.2, os pacotes de controle (obtenção de reserva e liberação de recursos) não passam pelo processo de entrelaçamento. Contudo, isto é compensado pela

utilização de um ganho de processamento maior e, conseqüentemente, de um código corretor de erros compatível com a menor quantidade de informação transmitida por estes pacotes (vide Tab. A.8). Isto posto, verifica-se que a diversidade temporal induzida pelo entrelaçamento propicia um aumento significativo da capacidade em ambos protocolos. Estes resultados também permitem ratificar que a modelagem da interferência como uma densidade espectral de potência plana leva a resultados levemente pessimistas em relação aos obtidos através da modelagem da interferência como uma soma de variáveis aleatórias. Explicações sobre a diminuição do ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA com o aumento do número permitido de usuários por slot podem ser encontradas na Seção 2.9.

Tabela 4.6 - Resultados de simulação referentes a uma taxa de perda de pacotes de aproximadamente 1% para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em canais com desvanecimento lento Rayleigh. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20. Funções de acesso: Tab. B.4.2b a B.4.2d.

	<i>Densidade espectral de potência</i>					<i>Soma de variáveis aleatórias</i>				
	<i>CDMA/PRMA</i>		<i>CDMA/ALOHA</i>		<i>Ganho</i>	<i>CDMA/PRMA</i>		<i>CDMA/ALOHA</i>		<i>Ganho</i>
	<i>M</i>	<i>Perda, %</i>	<i>M</i>	<i>Perda, %</i>		<i>M</i>	<i>Perda, %</i>	<i>M</i>	<i>Perda, %</i>	
<i>L_c=1</i>	8	98,05	1	99,68	700	9	97,89	1	99,68	800
	11	97,31	1	99,68	1000	12	97,07	1	99,68	1100
	15	96,34	3	99,05	400	14	96,58	3	99,05	366,67
<i>L_c=3</i>	69	83,17	51	83,81	35,29	77	81,22	59	81,27	30,51
	100	75,61	75	76,19	33,33	104	74,63	83	73,65	25,30
	126	69,27	100	68,25	26,00	135	67,07	107	66,03	26,17
<i>L_c=6</i>	143	65,12	119	62,22	20,17	153	62,68	125	60,32	22,40
	196	52,19	158	49,84	24,05	203	50,48	165	47,62	23,03
	222	45,85	176	44,13	26,14	233	43,17	184	41,59	26,63

Empregando como referência o caso do desvanecimento seletivo em frequência, cuja MAI é modelada como uma soma de variáveis aleatórias, resulta que a RSI por bit instantânea, expressa por (4.15), deve ser modificada a fim de se levar em conta a interferência externa, ou seja

$$\gamma_{bi,j} = \frac{\alpha_{i,j}^2 \frac{E_b}{L_c N_0}}{\frac{2}{3G_p} \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^{L_c} \alpha_{i,m}^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K \sum_{m=1}^{L_c} \alpha_{k,m}^2 \right) \frac{E_b}{L_c N_0} + \frac{2I_{ext}}{3G_p} + 1} \quad (4.19)$$

onde assume-se que $\overline{\alpha_{i,j}^2} = 1$. Conforme a Seção 2.5, a interferência externa pode ser modelada pelo seu valor médio, ou seja,

$$I_{ext} = f \frac{v_f M}{N} \left(\sum_{m=1}^{L_c} \overline{\alpha_{i,m}^2} \frac{E_b}{L_c N_0} \right) \quad (4.20)$$

onde é assumido que o enlace reverso de todos os usuários, embora independentes, apresenta o mesmo perfil de potência. Observe que enquanto a Eq. (4.19) refere o caso no qual K distintos usuários estão acessando um dado slot, a Eq. (4.20), evocando o teorema central do limite, utiliza o número médio de usuários que acessam o canal em um sistema com M usuários por célula. Utilizando-se que $\overline{\alpha_{i,m}^2} = 1$, então (4.20) modificar-se-á para

$$I_{\text{ext}} = f \frac{v_f M}{N} \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \quad (4.21)$$

Ao modelar a interferência externa como uma VA chi-quadrada, faz-se necessário multiplicar os valores normalizados da média e da variância externados nas distintas tabelas da Seção 3.3 por

$$\sum_{m=1}^{L_c} \overline{\alpha_{i,m}^2} \frac{E_b}{L_c N_0} = \frac{E_b}{N_0} \quad (4.22)$$

a fim de desnormalizar os níveis de potência. Em seguida, efetua-se a desnormalização pelo número de usuários, conforme detalhadamente explicado na Seção 3.5.

A Fig. 4.2 ilustra o efeito do entrelaçamento entre quadros na capacidade do protocolo CDMA/PRMA em sistemas celulares com $\Gamma=4$, $\sigma_{dB}=8$ e desvanecimento Rayleigh lento. Nestas mesmas condições, conforme será visto na Seção 4.6, os sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA admitem 246 e 202, respectivamente, terminais de voz em canais AWGN. Nesta mesma ordem, verifica-se também que a perda de capacidade devido à interferência externa é de 40% e 36%. De acordo com a Tab. 4.7, esta perda de capacidade para os distintos níveis de entrelaçamento é de $\sim 37\%$ para o protocolo CDMA/PRMA e de $\sim 34\%$ nos sistemas CDMA/ALOHA. Comparando esta tabela com as tabelas 4.4 e 4.5, verifica-se que a perda de capacidade causada pelo desvanecimento Rayleigh lento nos sistemas celulares é praticamente a mesma observada nos sistemas unicelulares. Para canais AWGN, referencie as tabelas 4.14 e 4.15 ($\sigma_{cp}=0$ dB).

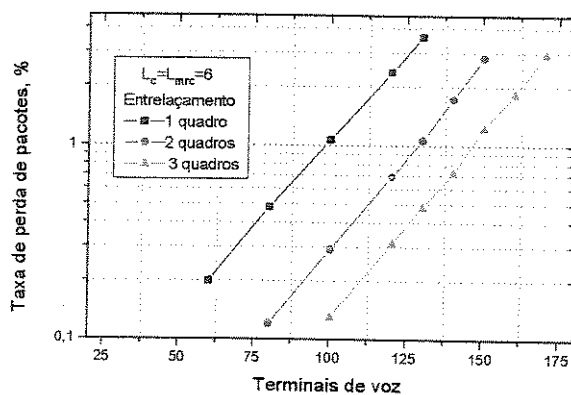


Figura 4.2 - Efeito do EE na capacidade do sistema CDMA/PRMA celular ($\Gamma=4$, $\sigma_{dB}=8$) com desvanecimento Rayleigh lento. Configuração: TDDGp16Tq10N10D20. Funções de acesso: Tab. B.4.3.

Tabela 4.7 – Perda de capacidade devido ao desvanecimento Rayleigh lento. Dados obtidos com as mesmas condições da Fig. 4.2. Interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada.

Protocolo	CDMA/ PRMA		CDMA/ ALOHA	
	<i>EE</i>	<i>M</i> <i>Perda</i> %	<i>M</i> <i>Perda</i> %	
1	95	61,38	83	58,91
2	127	48,37	108	46,53
3	145	41,06	120	40,59

4.3.6.2 Canais com potência distintas em cada percurso e número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal

Até o presente momento, assumiu-se que todos os caminhos possuem a mesma potência média. Nesta subseção, emprega-se o perfil de potência de múltiplos percursos para sistemas microcelulares denominado Advanced TDMA (ATDMA)^{4.3} [Oja98, p.91], ou seja,

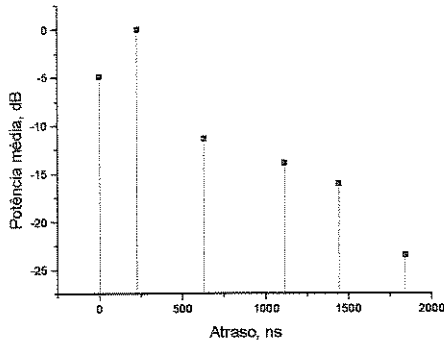


Tabela 4.8 – Características do modelo da Fig. 4.4.

Per-curso	Atraso ns	Potência Média dB	Desvanecimento
1	0	-4,9	Rayleigh
2	230	0	Rayleigh
3	630	-11,4	Rayleigh
4	1110	-13,9	Rayleigh
5	1440	-16,1	Rayleigh
6	1840	-23,5	Rayleigh

Figura 4.3 – Resposta impulsiva do modelo de canal ATDMA para microcélulas.

Seja uma canal com desvanecimento seletivo em frequência, cuja MAI é modelada como uma soma de variáveis aleatórias. No caso uma estrutura de recepção do tipo MRC com múltiplas antenas, então a RSI para o i -ésimo usuário no j -ésimo braço do receptor RAKE da m -ésima antena é fornecida por

$$\gamma_{bi,j,m} = \frac{\alpha_{i,j,m}^2 \frac{E_b}{L_{ant} L_c N_0}}{\frac{2}{3G_p} \left(\sum_{p=1}^{L_{ant}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^{L_c} \alpha_{i,n,p}^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K \sum_{p=1}^{L_{ant}} \sum_{n=1}^{L_c} \alpha_{k,n}^2 \right) \frac{E_b}{L_{ant} L_c N_0} + 1} \quad (4.23)$$

onde L_{ant} é o número de antenas e assume-se que $\overline{\alpha_{i,j,m}^2} = 1$. A RSI na saída da estrutura de recepção do tipo MRC para o i -ésimo usuário é dada por

$$\gamma_{mrc,i} = \sum_{p=1}^{L_{ant}} \sum_{n=1}^{L_{mrc}} \gamma_{i,n,p} \quad (4.24)$$

onde foi postulado que o desvanecimento é independente em cada antena.

A Fig. 4.4 mostra o desempenho dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA unicelulares ao se utilizar o

^{4.3} Este modelo, concebido para avaliação de desempenho de sistemas de terceira geração do tipo TDMA, é utilizado devido a estrutura de quadros empregada nos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA

modelo de canal ATDMA supradescrito. Os protocolos empregam a mesma configuração da Tab. 4.6, porém os resultados são restritos a um entrelaçamento com profundidade de dois quadros. Mesmo com três antenas, o perfil de potência simulado conduz a uma perda de capacidade em relação à canais com idêntica potência em todos os caminhos (vide Tab. 4.6). Em decorrência, conclui-se que modelos com idêntico perfil de potência, embora facilitem a obtenção analítica do desempenho, podem levar a resultados de capacidade demasiadamente otimistas. Finalmente, o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA é de aproximadamente 38% e 30% para uma e duas antenas, respectivamente, e de 26% para três antenas.

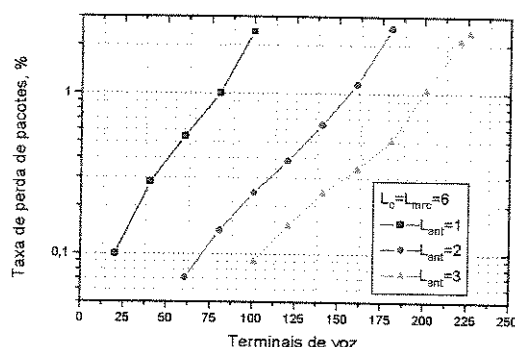


Fig. 4.4a- Protocolo CDMA/PRMA.

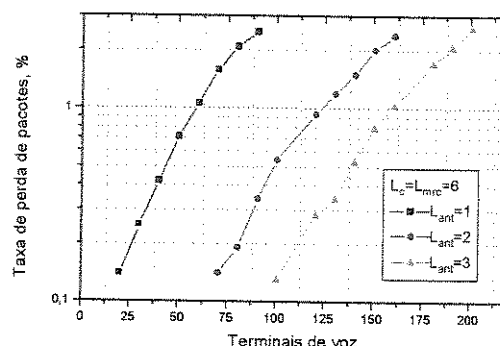


Fig. 4.4b- Protocolo CDMA/ALOHA.

Figura 4.4 – Desempenho dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA uncelulares em um canal com desvanecimento Rayleigh lento com perfil de potência dado pelo modelo de canal ATDMA. Configuração: *TDDGp16Tq10N10D20* com EE de quadros). Funções de acesso: Tab. B.4.4.

4.3.6.3 Canais com potência distintas em cada percurso e número de ramos do receptor RAKE descasado com a diversidade do canal

Com o intuito de investigar os efeitos da desigualdade da diversidade do canal com o número de braços do receptor RAKE, a Fig. 4.5 mostra resultados para o sistema CDMA/PRMA com três antenas em um canal de desvanecimento Rayleigh lento, onde o perfil de potência é dado pelo modelo ATDMA.

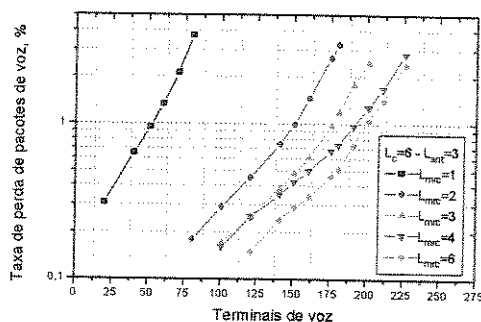


Figura 4.5 – Efeito na capacidade do protocolo CDMA/PRMA do descasamento da número de ramos do receptor RAKE com a diversidade do canal ATDMA com desvanecimento Rayleigh lento. Funções de acesso: Tab. B.4.4b.

Os dados mostrados se referem à configuração *TDDGp16Tq10N10D20*, com EE de dois quadros e ERB equipada com três antenas. Estes dados indicam que o receptor RAKE de cada antena deve ter no mínimo três braços de diversidade, e que um quarto braço torna possível captar quase a totalidade da potência disponível. Nota-se a dependência destas conclusões com o modelo de canal empregado. Contudo, acredita-se que estes resultados são reveladores de aspectos que devem ser levados em conta no projeto de sistemas CDMA/PRMA.

4.4 EFEITOS DO DESVANECIMENTO DO TIPO NAKAGAMI-m e RICE NO DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA

A variável aleatória Nakagami-m é amplamente empregada para modelar a variação do envelope em ambientes interiores e celulares. É uma VA bastante flexível, visto que permite sintetizar, com um adequado ajuste de parâmetros, VAs do tipo Rayleigh, Rice e log-normal [Pah95, p. 94-95]. A função densidade de probabilidade de uma VA Nakagami-m é dada por [Pro95, p.48-49]

$$p(\alpha) = \begin{cases} \frac{2\alpha^{2m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \exp\left(-\frac{m\alpha^2}{\Omega}\right) & \text{para } \alpha > 0 \\ 0 & \text{demais valores de } \alpha \end{cases} \quad (4.25a)$$

onde $\Gamma(z)$ é a função gamma e Ω é o valor quadrático médio da VA. O formato da figura é dado pelo fator do desvanecimento m , que é definido pela seguinte razão de momentos

$$m \equiv \frac{\Omega^2}{\text{Var}[\alpha^2]}, \quad m \geq \frac{1}{2} \quad (4.25b)$$

A Fig. 4.6 mostra a FDP da VA Nakagami-m para distintos valores de m , com $\Omega=1$. Para $m=1/2$ e $m=1$, a distribuição Nakagami-m se reduz a uma distribuição Gaussiana unilateral e Rayleigh, respectivamente. Para $0,5 \leq m < 1$ são obtidas FDP que decaem mais lentamente do que a distribuição Rayleigh. Para $m > 1$, pode-se modelar um canal menos rigoroso do que o canal Rayleigh, visto que seu decaimento é mais rápido. Nota-se que a FDP se degenera para um impulso quando $m \rightarrow \infty$, ou seja, modela um canal sem desvanecimento.

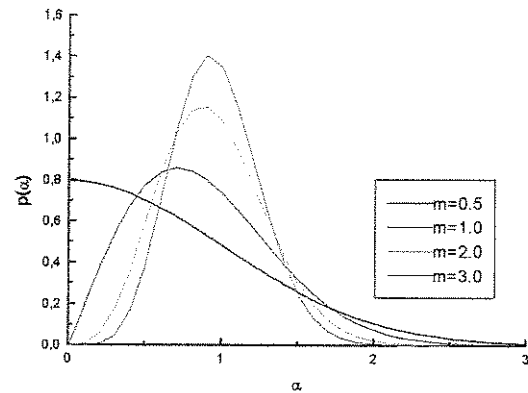


Figura 4.6 – FDP da VA Nakagami-m para distintos valores de m ($\Omega=1$).

A fim de simular um canal com desvanecimento do tipo Rice, basta utilizar a relação abaixo para mapear o fator K da VA Rice para o parâmetro m da VA Nakagami-m [Pra98, p.41-44], ou seja,

$$m = \frac{(1+K)^2}{1+2K} \cong 0,4998528K + 0,7622159 \quad (4.26)$$

onde K é definido como a razão da potência do sinal de linha de visada e a potência recebida nos caminhos sem linha de visada.

Utilizando-se (4.1), verifica-se que quando α é uma VA do tipo Nakagami-m, a FDP da VA γ_b (vide Eq. 4.7 e 4.8) é dada por [Hoe99b]

$$p(\gamma_b) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\gamma_b} \right)^m (\gamma_b)^{m-1} \exp\left(-\frac{m}{\gamma_b}\right) & \text{para } \gamma_b > 0 \\ 0 & \text{demais valores} \end{cases} \quad (4.27)$$

onde $\overline{\gamma_b} = \frac{E_b}{LI_0}$, sendo que $\frac{E_b}{L}$ é a energia de bit por caminho e I_0 a densidade espectral unilateral da interferência.

A FDP da VA γ_b é do tipo gamma. Por conseguinte, dado que eficazes algoritmos para geração da VA Gamma são amplamente disponíveis na literatura [Dev86, p. 401-423], a relação $y = \begin{cases} \sqrt{x} & , x \geq 0 \\ 0 & , \text{demais valores de } x \end{cases}$ gera

uma VA Nakagami-m, quando x é uma VA do tipo gamma. Ressalta-se que pode ser encontrado em [Yac99] uma extensão do método de Jakes para geração de VAs Nakagami-m. Isto para distintos valores de correlação em um espectro Doppler gerado por ângulos de chegada uniformemente distribuídos, como postulado por Jakes [Jak74, Cap. 1]. Finalmente, indica-se que o método proposto em [Hoe99a], embora restrito para geração de VA descorrelacionadas, é computacionalmente eficiente, na medida que geradores rápidos para VA Gamma estão amplamente disponíveis na literatura aberta [Dev86, p. 401-428].

Ao se modelar o desvanecimento como uma VA Nakagami-m, a função característica da RSI na saída do j -ésimo braço de um receptor do tipo MRC é dada por

$$\Psi_{\gamma_j}(i\omega) = \left(1 - i\omega \frac{\overline{\gamma_j}}{m} \right)^{-m}, \quad j = 1, 2, \dots, L_{\text{mrc}} \quad (4.28)$$

onde $i = \sqrt{-1}$. Nota-se que se omitiu o subscrito b empregado em (4.27). Caso as VAs γ_j ($j=1, 2, \dots, L_{\text{mrc}}$) sejam independentes e igualmente distribuídas, então a FDP da RSI na saída do receptor RAKE é também do tipo gamma, ou seja,

$$p(\gamma_j) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(L_{\text{mrc}} m)} \left(\frac{m}{\gamma_j} \right)^{L_{\text{mrc}} m} (\gamma_j)^{L_{\text{mrc}} m - 1} \exp\left(-\frac{m}{\gamma_j}\right) & , \text{para } \gamma_j > 0, m \geq 0.5 \\ 0 & , \text{demais valores} \end{cases} \quad (4.29)$$

onde foi utilizado que a soma de VAs independentes é a convolução, ou produto de funções características, de suas respectivas FDPs.

Portanto, quando todos os caminhos são independentes e possuem a mesma potência média, pode-se utilizar (4.29), juntamente com os resultados das subseções 4.3.1 e 4.3.3, para analisar canais com desvanecimento rápido Nakagami-m. Nota-se que isto se restringe aos casos nos quais a interferência média é modelada como uma densidade espectral de potência. Para os demais casos, a adaptação da metodologia de análise desenvolvida na Seção 3.3 para canais Rayleigh é imediata e trivial. Os resultados a seguir referem-se à interferência modelada como uma soma de VAs do tipo Nakagami-m.

A Fig. 4.7 ilustra o efeito da figura de desvanecimento m da VA Nakagami- m na capacidade do protocolo CDMA/PRMA. Estes resultados, juntamente com os mostrados na Tab. 4.9, mostram claramente o efeito da velocidade do decaimento da FDP na capacidade de sistema DS-CDMA equipados com receptor do tipo RAKE. Nestas simulações é empregada a configuração TDDGp16T_q10N10D20, com entrelaçamento entre dois quadros. As funções de acesso podem ser encontradas na Tab. B.4.5.

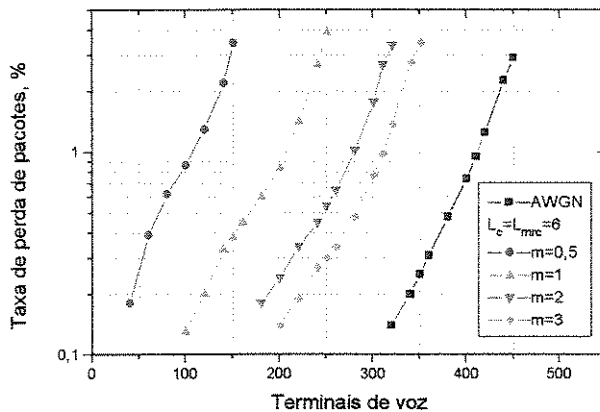


Figura 4.7 - Efeitos do desvanecimento lento Nakagami- m , para distintos valores da figura de desvanecimento m , na capacidade do sistema CDMA/PRMA unicolor. Canal com seis percursos com mesma potência média. Receptor Rake casado com a diversidade do canal.

Tabela 4.9 – Dados concernentes aos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA para as mesmas condições da Fig. 4.6. Perda de pacotes de aproximadamente 1%.

	CDMA/ PRMA		CDMA/ ALOHA		Ga- Nho %
	M	Perda %	M	Perda %	
<i>AWGN</i>		%		%	%
$m=\infty$	410	---	315	---	30,2
$m=0,5$	105	74,4	85	73,0	23,5
$m=1$	203	50,5	165	47,6	23,0
$m=2$	278	32,2	220	30,2	26,4
$m=3$	310	24,4	241	23,5	28,6

A Fig. 4.8 e a Tab. 4.10 mostram as características do canal ATDMA para ambientes pico-celulares [Oja92, p. 92-93]. Imediatamente, verifica-se que a taxa de chip mínima para que todos os percursos possam ser discernidos é de 12,987 Mcps. A configuração analisada até o presente momento (TDDGp16T_q10N10D20), opera com uma taxa de chips de 7,65 Mcps (1/77 ns). Assim, o ganho de processamento é aumentado para 32 na investigação comparativa do desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA neste canal. Este é um canal altamente agressivo pela conjunção dos pequenos atrasos, perfil de potência com decaimento acentuado e pequenos valores do fator K da VA Rice (estes fazem com que a VA de cada percurso seja praticamente uma VA do tipo Rayleigh). Nota-se que resultados analíticos para a probabilidade de erro de bit em sistemas com modulação BPSK DS-CDMA em canais com desvanecimento RICE podem ser encontrados em [Foe97].

Os resultados da Tab. 4.11, indicam que é imprescindível que as ERBs estejam equipadas com mais de uma antena, pois, caso contrário, ocorrerá uma perda de capacidade bastante acentuada. Observa-se que para um adequado desempenho, o receptor RAKE de cada antena deve coletar e combinar coerentemente a energia de, no mínimo, três caminhos.

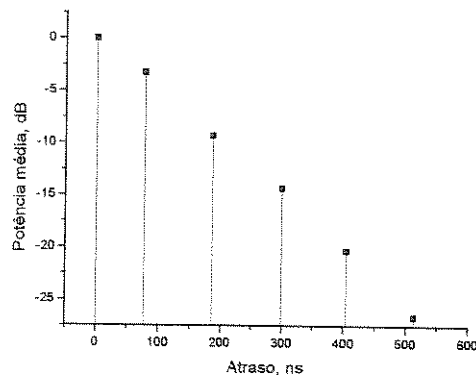


Figura 4.8 – Resposta impulsiva do canal ATDMA para pico-células.

Tabela 4.10 – Parâmetros do canal ATDMA para pico-células.

Percurso	Atraso ns	Potência Média, dB	Desvanecimento	Fator K dB
1	0	0	Rice	-10,0
2	77	-3,3	Rice	-4,0
3	186	-9,3	Rice	-4,0
4	299	-14,3	Rice	-4,0
5	404	-20,3	Rice	-4,0
6	513	-26,8	Rayleigh	---

Tabela 4.11 – Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com desvanecimento lento e perfil de potência de acordo com o modelo ATDMA para pico-células. Perda de pacotes de aproximadamente 1%. Configuração: TDDGp32T_q10N10D20, com entrelaçamento entre dois quadros. Funções de acesso: Tab. B.4.6.

Tabela 4.11a – Receptor RAKE casado com a diversidade do canal.

	CDMA/PRMA		CDMA/ALOHA		Ganho
	M	Perda	M	Perda	
AWGN	499	---	450	---	10,9
$L_{ant}=1$	113	77,3	100	77,8	15,0
$L_{ant}=2$	213	57,3	197	56,2	8,1
$L_{ant}=3$	270	45,9	249	44,7	8,4

Tabela 4.11b – Influência do número de ramos do receptor RAKE na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. ERB com três antenas independentes.

L_{mrc}	CDMA/PRMA		CDMA/ALOHA		Ganho
	M	Perda	M	Perda	
1	57	88,6	50	88,9	14,0
2	205	58,9	187	58,4	9,6
3	251	49,7	230	48,9	9,1
4	266	46,7	247	45,1	7,7

As duas próximas tabelas empregam o modelo de canal descrito na Tab. 4.10, exceto pelo fator K do primeiro percurso que é aumentado para +3 dB (Tab. 4.12) e +10 dB (Tab. 4.13). Estes dados mostram a forte influência da potência recebida em linha de visada no número de antenas necessárias na ERB, bem como no número mínimo de ramos do receptor RAKE de cada antena. No caso de ERBs com três antenas e receptor RAKE casado com a diversidade do canal, a perda de capacidade devido ao desvanecimento diminui de 36% para 23% com o aumento do fator K de +3 dB para +10 dB.

Tabela 4.12 – Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com desvanecimento Rice lento. Perfil de potência de acordo com o modelo ATDMA para pico células, exceto para o primeiro percurso que agora possui o fator K da VA Rice de +3 dB. Taxa de perda de pacotes de aproximadamente 1%. Configuração: TDDGp32T_q10N10D20, com entrelaçamento entre dois quadros. Funções de acesso: Tab. B.4.7.

Tabela 4.12a – Diversidade do receptor RAKE casada com a diversidade do canal.

L_{ant}	CDMA/ PRMA		CDMA/ ALOHA		Ga- nho %
	M	Perda %	M	Perda %	
1	164	67,1	148	67,1	10,8
2	270	45,9	248	44,9	8,9
3	319	36,1	295	34,4	8,1

Tabela 4.12b – Influência da diversidade do receptor RAKE na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA para uma ERB com duas antenas.

L_{mrc}	CDMA/ PRMA		CDMA/ ALOHA		Ga- nho %
	M	Perda %	M	Perda %	
1	80	84,0	67	85,1	19,4
3	250	49,9	230	48,9	8,7
4	265	46,7	244	45,8	8,6

Tabela 4.13 – Capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com desvanecimento Rice lento. Perfil de potência de acordo com o modelo ATDMA para pico células, exceto para o primeiro percurso que agora possui o fator K da VA Rice de +10 dB. Taxa de perda de pacotes de aproximadamente 1%. Configuração: TDDGp32T_q10N10D20, com entrelaçamento entre dois quadros. Funções de acesso: Tab. B.4.7.

Tabela 4.13a – Diversidade do receptor RAKE casada com a diversidade do canal.

L_{ant}	CDMA/ PRMA		CDMA/ ALOHA		Ga- Nho %
	M	Perda %	M	Perda %	
1	278	44,3	255	43,3	9,0
2	353	29,3	323	28,2	9,3
3	384	23,0	350	22,2	9,7

Tabela 4.13b – Influência da diversidade do receptor RAKE na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. ERB com duas antenas.

L_{mrc}	CDMA/ PRMA		CDMA/ ALOHA		Ga- Nho %
	M	Perda %	M	Perda %	
1	187	62,5	162	64,0	15,4
2	297	40,5	270	40,0	10,0
3	336	32,7	308	31,5	9,1
4	348	30,3	320	28,9	8,7

4.5 BREVES COMENTÁRIOS SOBRE CANAIS COM DESVANECIMENTO WEIBULL

A FDP da VA Weibull, uma outra distribuição utilizada na modelagem de canais de rádio em ambientes interiores e celulares, é dada por [Pah95, p. 95]

$$p(\alpha) = \begin{cases} s \left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma} \right) \left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma} \right)^{s-1} \exp \left[- \left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma} \right)^s \right] & \text{para } \alpha > 0 \\ 0 & \text{demais valores} \end{cases} \quad (4.30)$$

onde o parâmetro s define o formato da distribuição e

$$r = \sqrt{\frac{2}{s} \Gamma\left(\frac{2}{s}\right)} \quad (4.31)$$

é um fator de normalização baseado na função gamma $\Gamma(z)$. O valor médio quadrático de α , $E[\alpha^2] = 2\sigma^2$, é a potência média da VA Weibull.

A Fig. 4.9 mostra a FDP da VA Weibull para distintos valores de s , com $\sigma = r/\sqrt{2}$. Nota-se que para $s=1$ e $s=2$, a distribuição Weibull se reduz a uma distribuição exponencial negativa e Rayleigh [Yac93, p. 92-95], respectivamente. Para $0 < s < 2$ e $s > 2$, são obtidas FDPs que decaem mais rapidamente e lentamente, respectivamente, do que a VA Rayleigh.

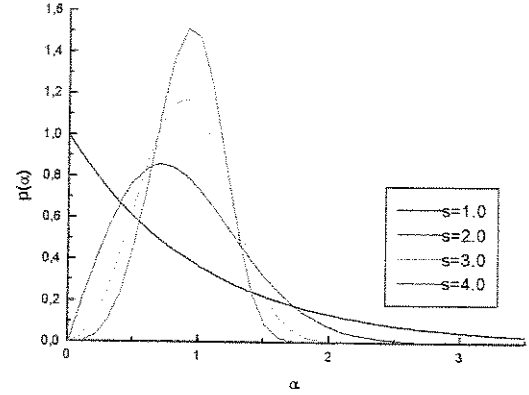


Figura 4.9 – FDP da VA Weibull para distintos valores de s , com $\sigma = r/\sqrt{2}$.

Ao se modelar a IMA como uma densidade espectral de potência plana I_0 , a RSI por bit para o i -ésimo usuário na saída do j -ésimo braço de um receptor do tipo RAKE é dada por

$$\gamma_{b_{i,j}} = \frac{\alpha_{i,j}^2 E_b}{I_0} \quad (4.32)$$

Por simples transformação de VAs, pode-se mostrar que a PDF da VA $\gamma_{b_{i,j}}$ é fornecida por

$$p(\gamma_{b_{i,j}}) = \begin{cases} \frac{s}{2\gamma_{i,j}} \left(r \sqrt{\frac{\gamma_{b_{i,j}}}{\gamma_{i,j}}} \right)^s \exp \left[- \left(r \sqrt{\frac{\gamma_{b_{i,j}}}{\gamma_{i,j}}} \right)^s \right] & \text{para } \gamma_{i,j} > 0 \\ 0 & \text{demais valores} \end{cases} \quad (4.33)$$

onde seu valor médio é dado por

$$\overline{\gamma_{b_{i,j}}} = E[\gamma_{b_{i,j}}] = \frac{E_b}{I_0} E[\alpha_{i,j}^2] = \frac{E_b}{I_0} 2\sigma^2 \quad (4.34)$$

Convenientemente, repete-se neste parágrafo comentários tecidos no estudo da distribuição Nakagami-m. Quando todos os caminhos são independentes e possuem a mesma potência média, então pode-se utilizar (4.33), juntamente com os resultados das Subseções 4.3.1 e 4.3.3, para analisar canais com desvanecimento rápido. Isto, obviamente, nos casos em que a interferência média modelada como uma densidade espectral de potência. Para os demais casos, basta adaptar a metodologia de análise desenvolvida na Seção 3.3 para canais Rayleigh.

A Fig. 4.10 mostra a taxa média de perda de pacotes de voz em canais com desvanecimento plano rápido do tipo Weibull modelado como uma soma de VAs. São também mostrados resultados para canais AWGN, para os quais a função de acesso foi otimizada. A Fig. 4.11 é análoga à anterior, exceto que, agora, as funções de acesso foram otimizadas para cada valor do parâmetro s . Em ambos os casos a interferência é modelada por como uma densidade espectral de potência plana e FDDG_p7T_q20N20D20 é a configuração empregada [Hoe98d]. Ao se comparar as figuras 4.10 e 4.11, verifica-se os efeitos da correta otimização da função de acesso e do parâmetro s na capacidade do sistema. Finalmente, indica-se que o protocolo CDMA/PRMA provê um acentuado ganho de capacidade em relação ao protocolo CDMA/ALOHA.

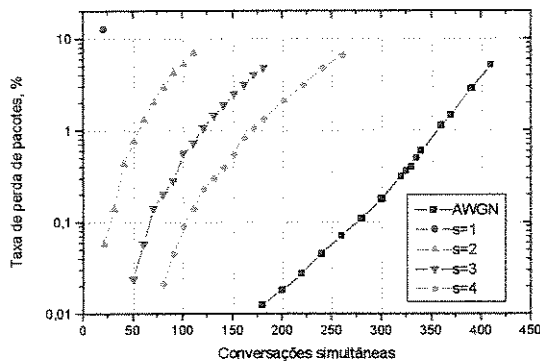


Figura 4.10 - Taxa média da perda de pacotes para o protocolo CDMA/PRMA. Canal com desvanecimento plano rápido do tipo Weibull. Sistema unicelular. Funções de acesso: Tab. 2.5.

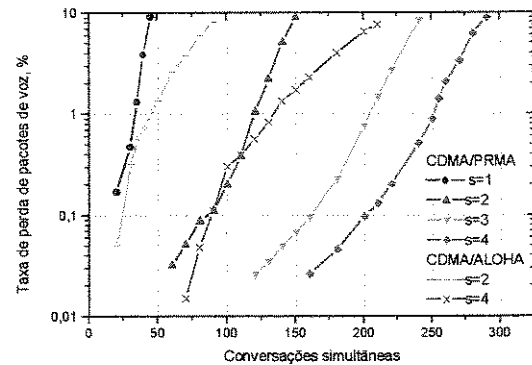


Figura 4.11 - Taxa média da perda de pacotes para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Canal com desvanecimento plano rápido do tipo Weibull. Sistema unicelular. Funções de acesso: Tab. B.4.8

4.6 NÃO-IDEALIDADE NO CONTROLE DE POTÊNCIA

Normalmente, sistemas DS-CDMA concebidos para comunicação móvel terrestre empregam três tipos de controle de potência (CP): de malha aberta, de malha fechada e do laço externo [UTRA98, p.45, p.75], [Pic96]. O CP de malha aberta é concebido para combater variações de longo prazo, tais como, perda de percurso e variações do terreno [Sol92]. O CP de malha fechada combate as alterações rápidas, causadas pelo desvanecimento, na potência do sinal recebido [Ste96]. O laço externo do CP tem a função de periodicamente determinar a relação sinal-interferência mínima necessária para satisfazer a qualidade de serviço desejada. Isto evita que excessos no ajuste da potência sejam efetuados pelos controles de malha aberta e de malha fechada [Vit95, p.183-183]. Quando da utilização de algoritmos de CP implementáveis, resultados experimentais indicam que a potência, na saída de uma estrutura de recepção do tipo MRC, é uma VA log-normal (LN), com média dada pela potência nominal desejada P_0 e desvio padrão σ_{pc} entre 1 e 2,5 decibéis [Cam92], [Pad94]. Basicamente, encontra-se na literatura duas distintas abordagens para a modelagem da interferência gerada pelos usuários controlados pela célula alvo: (i) interferência modelada como uma soma de VAs do tipo log-normal [Jan95]; (ii) interferência modelada como uma densidade espectral de potência [Vit92]. Assim, ao se utilizar estes dois enfoques na modelagem potência interferente interna, apresentar-se-á uma série de resultados sobre os efeitos da não-idealidade do CP na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em distintas configurações.

4.6.1 Interferência interna no enlace reverso modelada como uma soma de variáveis aleatórias do tipo log-normal

Utilizando o conceito do valor esperado condicionado como uma VA [Pap91, p.169] e considerando um sistema DS-CDMA limitado por interferência, então a RSI por bit instantânea para o i -ésimo usuário na saída de um detector de correlação convencional é dada por [Hoe98a]

$$E[RSI_i / P_1, \dots, P_K, I_{ext}] = \sqrt{\frac{3G_p P_i}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K P_k + \frac{I_{ext}}{P_0}}} \quad (4.35)$$

onde P_k ($k=1, \dots, K$) é uma VA log-normal com média logarítmica nula e cujo desvio padrão em decibéis, σ_{cp} , modela o nível de imprecisão no CP, P_0 é a potência nominal recebida na ERB no caso do CP ser ideal, e I_{ext} é a potência interferente externa. Conforme a Seção 3.5, esta pode ser modelada por uma VA chi-quadrada, ou de maneira determinística, ao se utilizar o valor médio da interferência externa. Nota-se que se pode desconsiderar a não idealidade do CP na modelagem da interferência externa, pois nesta há preponderância da perda de percurso e do sombreamento log-normal [Pra93].

Neste momento, é interessante citar que a FDP de uma VA log-normal $LN(\mu, \sigma^2)$ é fornecida por

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.36)$$

onde μ e σ denotam a média e o desvio padrão logarítmicos, respectivamente, da VA x . A média e a variância são fornecidas por [Law91, p.337]

$$E[x] = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (4.37a)$$

$$\text{Var}[x] = \exp(2\mu + \sigma^2) (\exp(\sigma^2) - 1) \quad (4.37b)$$

A fim de converter a média e o desvio padrão em decibéis para seus valores logarítmicos, devem ser empregadas as seguintes relações [Pra98, p.35]

$$u = \ln\left(10^{\frac{\mu_{dB}}{10}}\right) \quad (4.37c)$$

$$\sigma = \ln\left(10^{\frac{\sigma_{dB}}{10}}\right) \quad (4.37d)$$

Finalmente, nota-se que quando $\sigma \rightarrow 0$ a distribuição log-normal torna-se degenerada em $\exp(\mu)$, ou seja, $f(x) = \delta(x - e^\mu)$.

Em sistemas TD/CDMA com slots de pequena duração, a potência recebida em cada slot é praticamente constante. Portanto, ao se utilizar um código de bloco com decisão abrupta em um canal binário simétrico, o número de erros estimado j é uma VA com FDP binomial, isto é,

$$b(j, N, P_e) = \sum_{k=0}^n \binom{N}{j} (P_e)^j (1 - P_e)^{N-j} \delta(n - k), \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (4.38)$$

onde a probabilidade de erro de bit é dada por $P_e \approx Q(RSI)$. Subjacente a esta modelagem encontram-se os conceitos da interferência atuando como ruído Gaussiano em cada período curto de tempo em que o canal permanece constante [Ari93] e da independência da probabilidade de erro de bit levar, dependendo da carga no canal, a um limitante inferior ou superior da probabilidade de erro de pacote (vide Seção 2.5).

A Fig. 4.12 mostra os efeitos da não idealidade do CP na capacidade de um sistema CDMA/PRMA unicelular. A configuração empregado é a rotulada como TDDG_p16T_q10N10D20 (vide anexo A). As funções de acesso, otimizadas para cada valor do desvio padrão em decibéis da VA LN (σ_{cp}), podem ser encontradas na Tab. B.4.9. A Tab. 4.14 mostra a perda de capacidade em função de σ_{cp} . Resultados para o protocolo CDMA/ALOHA, análogos aos supra citados, são mostrados na Fig. 4.13 e na Tab. 4.15.

A Tab. 4.16 mostra resultados análogos aos das Tab. 4.14 e 4.15, exceto por ser agora utilizado um ganho de processamento de 32 ao invés de 16, como anteriormente.

As Tab. 4.17 e 4.18 mostram, respectivamente, os efeitos do CP imperfeito em sistemas celulares CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA ($\Gamma=4$, $\sigma_{dB}=8$).

A Tab. 4.19 mostra o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA, em função do nível da não-idealidade no CP, ganho de processamento e da interferência externa. Nota-se que não é implementado o entrelaçamento entre quadros nestes sistemas.

Os resultados mostrados nas Tab. 4.15 a 4.18 indicam que os sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA apresentam uma significativa e semelhante perda de capacidade devida às imperfeições no CP. Esta perdas percentuais praticamente independem do ganho de processamento, bem como do nível da interferência externa.

A Tab. 4.19 evidencia claramente que com o aumento da aleatoriedade da interferência interna, a existência de interferência externa não passível de ser controlada pela função de acesso do protocolo CDMA/PRMA e o maior ganho de entroncamento do protocolo CDMA/ALOHA (vide Seção 2.9) levam a uma diminuição do ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. O aumento do ganho de capacidade percentual para $\sigma_{cp}=3$ dB e $G_p=16$ deve-se à baixíssima capacidade obtida por ambos os protocolos nestas condições.

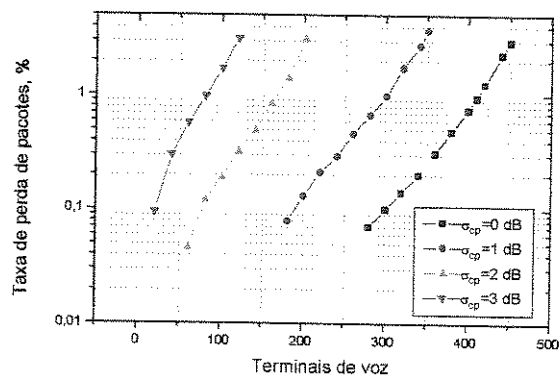


Figura 4.12 – Efeitos do CP imperfeito na capacidade de um sistema CDMA/PRMA unicelular.

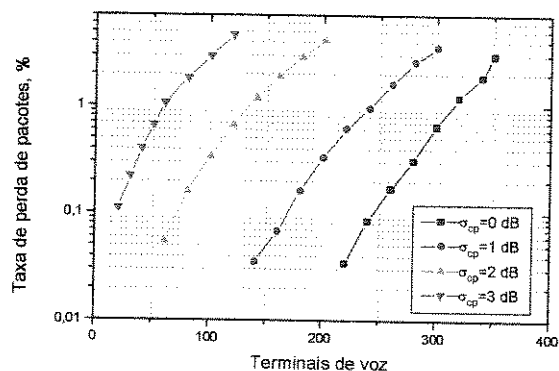


Figura 4.13 – Efeito do CP imperfeito na capacidade de um sistema CDMA/ALOHA unicelular.

Tabela 4.16 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP em sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA unicelulares. Funções de acesso: Tab. B.4.9. $P_{\text{perda}}=1\%$. Configuração: TDDGp32T_q10N10D20 sem EE.

σ_{cp} dB	M		Perda de Capacidade, %	
	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA	CDMA/ PRMA	CDMA/ ALOHA
0	820	710	0	0
1	596	532	27,32	25,07
2	338	297	58,78	58,17
3	168	145	79,51	79,58

Tabela 4.14 - Perda de capacidade referente à Fig. 4.1. $P_{\text{perda}}=1\%$. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20, sem EE. Funções de acesso: Tab. B.4.9.

σ_{cp} dB	M	Perda de Capacidade, %
0	410	0
1	302	26,34
2	167	59,27
3	80	80,49

Tabela 4.15 - Perda de capacidade referente à Fig. 4.2. $P_{\text{perda}}=1\%$. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20, sem entrelaçamento entre quadros.

σ_{cp} dB	M	Perda de Capacidade, %
0	315	0
1	240	23,81
2	130	58,73
3	58	81,58

Tabela 4.17 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP em sistemas CDMA/PRMA celulares. Configurações: (i) TDDGp16 T_q10N10D20 sem EE (ii) TDDGp32T_q10 N10D20 sem EE. Funções de acesso: Tab. B.4.10. $P_{\text{perda}}=1\%$.

σ_{cp} dB	M		Perda de Capacidade, %	
	$G_p=16$	$G_p=32$	$G_p=16$	$G_p=32$
0	246	499	0	0
1	183	370	25,61	25,85
2	107	218	56,50	56,31
3	58	118	76,42	76,35

Tabela 4.18 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP em sistemas CDMA/ALOHA celulares. Configurações: (i) TDDGp16T_q10N10D20 sem EE; (ii) TDDGp32T_q10N10D20 sem EE. Funções de acesso: Tab. B.4.10. $P_{\text{perda}}=1\%$.

σ_{cp} dB	M		Perda de Capacidade, %	
	$G_p=16$	$G_p=32$	$G_p=16$	$G_p=32$
0	202	450	0,0	0,0
1	157	337	22,27	25,11
2	92	197	54,45	56,22
3	49	102	75,74	77,33

Tabela 4.19 - Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA, otimizado em função de σ_{pc} em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. $P_{\text{perda}}=1\%$.

	Unicelular		Celular ($\Gamma=4, \sigma_{dB}=8$ dB)	
σ_{cp} dB	$G_p=16$	$G_p=32$	$G_p=16$	$G_p=32$
0	30,16	15,49	21,78	10,89
1	25,83	12,03	16,56	9,79
2	22,15	13,81	14,01	10,66
3	37,93	15,86	18,37	15,68

As tabelas 4.20 a 4.22, utilizando a mesma configuração empregadas nas tabelas 4.11 e 4.16, mostram que o entrelaçamento entre quadros propicia um substancial e semelhante incremento na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Novamente, os efeitos do CP apresentam uma fraca dependência com o ganho de processamento. Ratifica-se também a menor perda de capacidade observada nos sistemas onde a interferência externa é considerada (compare as tabelas 4.16 com 4.17 e 4.21a com 4.21b). Basicamente, isto se deve à diminuição dos efeitos relativos do controle não ideal de potência na interferência total, que agora é dada pela soma das interferências interna e externa.

Tabela 4.20 - Perda de capacidade devido à não-idealidade no CP em sistemas CDMA/PRMA unicelulares. Funções de acesso: Tab. B.4.11. $P_{\text{perda}}=1\%$.

Tabela 4.20a - Configuração: TDDGp16T_q10N10D20.

σ_{cp} , dB	2 quadros		3 quadros	
	M	Perda, %	M	Perda, %
0	410	0	410	0
1	335	18,3	350	14,6
2	214	47,8	240	41,4
3	117	71,5	143	65,1

Tabela 4.20b - Configuração: TDDGp32T_q10N10D20.

σ_{cp} , dB	2 quadros		3 quadros	
	M	Perda, %	M	Perda
0	820	0	820	0
1	666	18,8	699	14,8
2	430	47,6	483	41,1
3	237	71,1	288	64,9

Tabela 4.21 - Perda de capacidade devido a não-idealidade no CP em sistemas CDMA/ALOHA. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20 com EE. $P_{\text{perda}}=1\%$.

Tabela 4.21a – Sistema unicelular.

σ_{cp} , dB	2 quadros		3 quadros	
	M	Perda, %	M	Perda, %
0	315	0	315	0
1	262	16,8	275	12,7
2	171	45,7	190	39,9
3	88	72,1	107	66,0

Tabela 4.21b – Sistema celular. A interferência externa é modelada por meio de uma VA chi-quadrada, onde a média e variância normalizada assumem os valores de 0,63 e 0,2, respectivamente.

σ_{cp} , dB	2 quadros		3 quadros	
	M	Perda, %	M	Perda, %
0	205	0	205	0
1	175	14,6	185	9,7
2	117	42,9	131	36,1
3	64	68,9	80	61,0

A Tab. 4.22 mostra a perda da capacidade em sistemas CDMA/PRMA com CP imperfeito, quando a função de acesso foi otimizada para um ambiente com controle ideal de potência. Estes sistemas, diferentemente dos analisados anteriormente, operam no modo FDD. Isto evita que probabilidades de acesso demasiadamente folgadas, em decorrência do sistema operar com uma carga bastante inferior para o qual foi otimizado, concentrem a carga nos primeiros slots do quadro do enlace reverso, quando o sistema opera no modo TDD (vide Seção 4.2). Evita-se assim a polarização nos resultados, o que mascararia o fenômeno estudado. No mundo real, pode-se combater esta concentração de pacotes nos primeiros slots do quadro, aplicando-se, entre outras, as seguintes abordagens: (i) mudar dinamicamente os parâmetros da função de acesso em função da carga do sistema; (ii) distribuir de maneira uniforme nos slots do enlace reverso o momento em que se libera a busca da reserva para os terminais que tenham o início do seu surto de fala no enlace direto. Nesta tabela, são também apresentados resultados obtidos por diferentes autores para sistemas uncelulares [Hea92] e celulares com os mesmos parâmetros de projeto definidos por Gilhousen et. al., ou seja, $G_p=156$, $\alpha_s=0,375$, $\Gamma=4$, $\sigma_{dB}=8$, $(E_b/N_0)_{req}=7$ dB e “outage probability” de 1% [Gil91]. Os resultados mostrados na Tab. 4.22 modelam a perda da capacidade de um sistema otimizado para baixa mobilidade, onde o CP é efetivo, mas que apresenta imprecisões com o aumento da velocidade do móvel. Finalmente, a comparação destes resultados com os mostrados nas tabelas 4.15, 4.20a e 4.21, mostra que o casamento dos parâmetros da função de acesso com as não-idealidades no CP, proporciona uma acentuada diminuição na perda da capacidade. Ressalta-se que a maior restrição ao acesso em sistemas otimizado para $\sigma_{pc}=1$ dB também leva a uma perda de capacidade, caso o CP apresente um melhor desempenho. Assim, reforça-se a necessidade da otimização dinâmica dos parâmetros da função de acesso em uma implementação real. A frequência dessa atualização deve ser suficientemente rápida para acompanhar as variações do sistema, mas não tão veloz a ponto de ser polarizada por estatísticas instantâneas do ambiente em que o sistema está inserido e configurado. Finalmente, nota-se que os sistemas CDMA/PRMA não otimizados, e sem entrelaçamento entre quadros, apresentam uma perda de capacidade semelhante às obtidas por diversos autores para sistemas com os parâmetros básicos do padrão IS-95A.

Tabela 4.22 – Perda de capacidade, devido à imprecisões no CP, em sistemas CDMA/PRMA uncelulares otimizados para ambientes com controle ideal de potência. São mostrados, em ordem decendente, resultados sem EE e com EE com profundidade de dois quadros. $P_{perda}=1\%$.

Configur.	FDDGp16T _q 10N10D20		FDDGp32T _q 10N10D20		Perda de capacidade, %			
	M	Perda de cap. %	M	Perda de cap. %	[Hea92]	[Pra93]	[Kud92]	[Gud92]
0	410	0	820	0	0	0	0	0
1	252	38,54	538	34,39	40	38	31	40
	289	29,51	606	26,10				
2	137	66,58	306	62,68	65	65	61	65
	173	57,80	383	53,29				
3	62	84,88	151	81,58	81	80	81	80
	87	78,78	205	75,00				

4.6.2 – Interferência no enlace reverso modelada como uma densidade espectral de potência

Aqui, a interferência é modelada como uma densidade espectral de potência plana em um sistema DS-CDMA limitado por interferência. Portanto, a razão instantânea da RSI de bit para o i -ésimo usuário na saída de um detector de correlação convencional é dada por [Hoe98a]

$$E[\gamma_{b,i} / \alpha_i] = \frac{\frac{3}{2} G_p \alpha_i}{(K-1) \overline{\alpha} + I_{\text{ext}}} \quad (4.39)$$

onde α é uma VA log-normal que modela a não idealidade no CP. Agora, a probabilidade de erro de bit instantânea para o i -ésimo usuário é fornecida por $P_e \approx Q(\sqrt{2E[\gamma_{b,i} / \alpha_i]})$ [Pro95, p.773].

Resultados para os sistemas CDMA/FRMA e CDMA/ALOHA, sem entrelaçamento entre quadros, equipados com detetor de atividade de voz de 2 estados são mostrados nas tabelas 4.23 e 4.24, respectivamente. Comparando estes resultados com os mostrados nas tabelas 4.14 e 4.15, verifica-se que para $\sigma_{pc} \leq 2$ dB a utilização do valor médio na modelagem da interferência interna conduz à resultados bastante semelhantes aos obtidos com a modelagem da interferência por meio de uma soma de VAs log-normal. Contudo, esta modelagem torna-se otimista quando a potência recebida apresenta uma maior variação em torno de seu valor médio. Observa-se ainda o aumento da perda de capacidade com a mudança da qualidade média de serviço de 1% para 0,1%. Basicamente, isto se deve à maior dispersão relativa da carga no canal com a diminuição do número de usuários por slot que satisfaz a qualidade de serviço média de 0,1%. Comparando a Tab. 4.23 com as tabelas 4.14 e 4.16, nota-se que os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/FRMA degradam seu desempenho médio de maneira similar. Este fenômeno, análogo ao ocorrido em canais AWGN, é detalhado na Seção 2.10. Finalmente, ratifica-se o maior ganho de capacidade dos protocolos CDMA/FRMA e CDMA/PRMA, em relação ao protocolo CDMA/ALOHA, ao se aumentar a exigência média de desempenho de 1% para 0,1% (vide Seção 2.9).

Tabela 4.23 – Efeitos da não-idealidade do CP no desempenho do protocolo CDMA/FRMA em um ambiente unicelular. Funções de acesso: B.4.12.

Configuração	TDDGp16T _q 10N10D20				TDDGp32T _q 10N10D20			
	$P_{\text{perda}}=0,1\%$		$P_{\text{perda}}=1\%$		$P_{\text{perda}}=0,1\%$		$P_{\text{perda}}=1\%$	
σ_{cp} dB	M	Perda de cap., %	M	Perda de cap., %	M	Perda de cap., %	M	Perda de cap., %
0	345	0	410	0	707	0	820	0
1	226	34,49	300	26,83	465	34,23	601	26,70
2	105	69,56	175	57,31	220	68,88	345	57,93
3	46	86,67	95	76,83	95	86,56	185	77,43

Tabela 4.24 – Efeitos da não-idealidade do CP do desempenho do protocolo CDMA/ALOHA em um ambiente unicelular. Interferência modelada como uma densidade espectral de potência.

Configuração	TDDGp16T _q 10N10D20				TDDGp32T _q 10N10D20			
	P _{perda} =0,1 %		P _{perda} =1 %		P _{perda} =0,1 %		P _{perda} =1 %	
σ_{cp}	M	Perda de cap.	M	Perda de cap.	M	Perda de cap.	M	Perda de cap.
dB	247	%	315	%	584	%	710	%
0		0		0		0		0
1	168	31,98	242	23,17	400	31,51	532	25,07
2	78	68,42	139	55,87	190	67,47	306	56,90
3	29	88,25	70	77,77	75	87,15	155	78,16

4.6.3 Interferência interna no enlace reverso modelada como uma soma de variáveis aleatórias correlacionadas do tipo log-normal

Até o presente momento, a não-idealidade no CP foi modelada por meio de uma VA log-normal unidimensional. Assim, suas sucessivas amostras são descorrelacionadas. Aqui, utilizando o modelo de Gudmundson [Gud91], investiga-se o desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA quando o CP é modelado por VAs correlacionadas. Neste modelo, a correlação é dada por

$$R_{cp}(k) = \sigma_{cp}^2 a^{|k|}$$

Pragmaticamente, pode-se gerar uma VA log-normal com este perfil de correlação, ao se filtrar um processo Gaussiano do tipo passa baixas com potência σ_E^2 através de filtro passa baixas de primeira ordem com um polo em a . No domínio discreto, a função de transferência deste filtro é dada por

$$H(e^{j\omega}) = \frac{K_N}{1 - ae^{j\omega}} \quad (4.40)$$

onde K_N é uma constante real. Esta é utilizada para estabelecer a potência na saída do filtro em σ_{cp}^2 , onde σ_{cp} é o desvio padrão em decibéis que modela o nível de imprecisão no CP. A constante K_N é facilmente obtida, ao se verificar que o primeiro momento na saída do filtro tem média nula e o segundo momento pode ser obtido por [Peeb93, p. 241-246]

$$\overline{Y^2} = \sigma_E^2 \sum_{k=0}^{\infty} (K_N a^k)^2 \quad (4.41)$$

Para $\overline{Y^2} = \sigma_{cp}^2$ e utilizando-se (4.40), verifica-se que a função de correlação da potência na saída do filtro é, como desejado, dada por

$$R_{cp}[k] = \sigma_{cp}^2 a^{|k|} \quad (4.42)$$

Finalmente, pode-se gerar uma VA log-normal z , cujo perfil de correlação aproximado é dado por (4.42), ao se utilizar o seguinte mapeamento

$$z = 10^{\frac{y}{10}} \quad (4.43)$$

Observa-se que as simulações efetuadas neste trabalho ratificam o método de Gudmundson para geração de VAs log-normal correlacionadas. Exaustivas simulações indicaram serem desprezíveis os efeitos da correlação no CP na capacidade dos sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA sem entrelaçamento entre quadros. Como era de se esperar, a Fig. 4.14 mostra uma forte diminuição do ganho de capacidade devido ao entrelaçamento quando a potência recebida nos quadros sucessivos é fortemente correlacionada. Nota-se que para $a=0,9$, os sistemas com e sem entrelaçamento apresentaram um desempenho análogo.

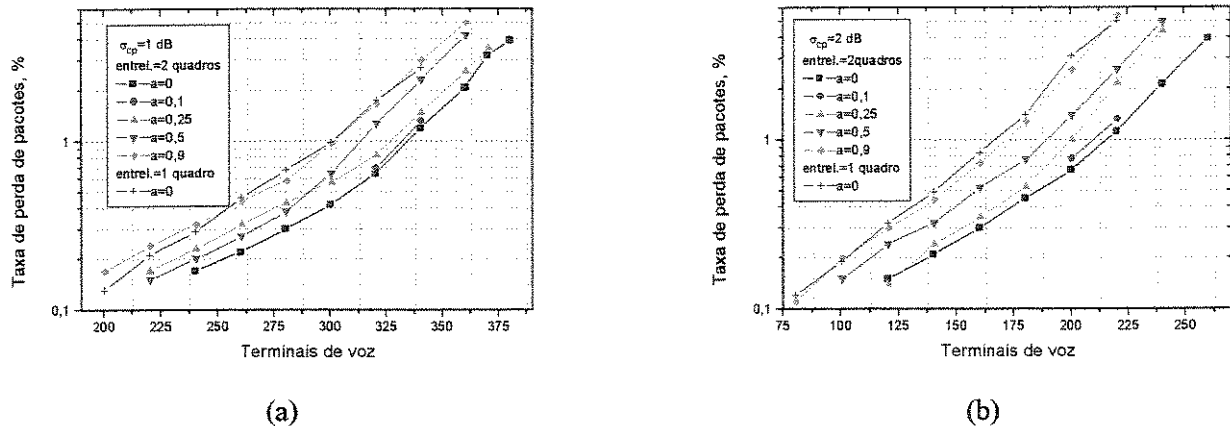


Figura 4.14 – Efeitos da correlação na potência recebida na capacidade do protocolo CDMA/PRMA: (a) $\sigma_{pc}=1$ dB; (b) $\sigma_{pc}=2$ dB. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20. Funções de acesso: Tab. B.4.13.

Capítulo 5

DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA COM TRÁFEGO MULTIMÍDIA

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo investiga-se o desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com tráfego misto voz/vídeo e voz/dados. Os modelos de tráfego de vídeo e de dados descritos nas Seções 5.2 e 5.3, respectivamente, subsidiarão a análise comparativa do desempenho dos protocolos realizadas nas Seções 5.4 (tráfego misto voz/vídeo) e 5.5 (tráfego misto voz/dados).

5.2 MODELOS DE TRÁFEGO DE VÍDEO

5.2.1 Modelo ON/OFF

Neste modelo a fonte pode estar no estado ON (gerando tráfego a uma taxa constante de pico r), ou no estado OFF (sem geração de tráfego). As distribuições de probabilidade dos estados são assumidas independentes [Tat98, p.137]. A probabilidade do processo estar no estado ON, P_{ON} , é dada por

$$P_{on} = \frac{E[ON]}{E[ON] + E[OFF]} \quad (5.1)$$

onde $E[ON]$ e $E[OFF]$ denotam o tempo médio de permanência nos estados ON e OFF, respectivamente.

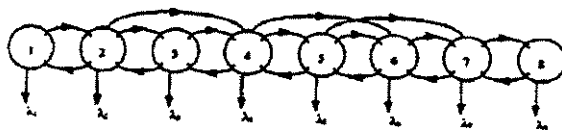
Seja R_t um processo que representa a taxa do processo ON/OFF no instante t , $R_t = rX_t$, onde X_t é uma VA de Bernoulli que representa o estado do processo no tempo t (assume 1 para ON e 0 para OFF). Logo, verifica-se facilmente que $E[R_t] = rP_{ON}$ e $Var[R_t] = r^2P_{ON}(1-P_{ON})$. Finalmente, observa-se que este modelo é aplicável a um grande número de processos ao se assumir, além da taxa de pico r , distintas funções de probabilidade do tempo de permanência nos estados ON e OFF.

Neste trabalho, o modelo ON/OFF é particularizado da maneira descrita a seguir. Em cada slot de tempo, um terminal de vídeo realiza um experimento de Bernoulli com probabilidade α_{vd} . Caso o experimento seja positivo, então é gerada uma transição para o estado ON. Após gerar um pacote de vídeo neste estado, o terminal volta para o estado OFF antes do início do próximo slot. No slot de tempo a seguir este procedimento é repetido, e assim sucessivamente. Por exemplo, seja um sistema FDD com período de quadro de 10 ms com 10 slots por quadro. Suponha ainda que os pacotes sejam dimensionados para transmitir 80 bits de informação por slot (ou seja, uma taxa líquida de $80\text{bits}/(10\text{ ms}/10\text{ slots})=8\text{ kbps}$). Decorre, portanto, uma geração de pacotes de informação com uma taxa média de 64 kbps ao se dimensionar a probabilidade de sucesso do experimento de Bernoulli em $\alpha_{vd}=0,8$.

5.2.2 Processo de Markov com taxa modulada

O modelo ON/OFF supra descrito é utilizado para modelar a transmissão de vídeo com taxa contínua (CBR

do inglês *Continuous Bit Rate*) devido à pequena variância na geração de pacotes, a qual é obtida ao se estabelecer que o experimento de Bernoulli tem alta probabilidade de sucesso. A fim de modelar a transmissão de vídeo com taxa variável (VBR do inglês *Variable Bit Rate*), produz-se tráfego por meio de um processo de Markov com taxa modulada (MMRP do inglês *Markov Modulated Rate Process*). A Fig. 5.1 ilustra a máquina de estados deste modelo (para efeito de simplificação, não são mostradas todas as transições entre os distintos estados), bem como a matriz de transição de estados da taxa correspondente. Este modelo captura os desafios, tal como a variação abrupta na taxa de transmissão instantânea, que devem ser enfrentados por protocolos projetados para suportar terminais multimídia [Ske93].



$$Q_{vd} = \begin{bmatrix} -4,737 & 4,105 & 0,105 & 0,316 & 0,000 & 0,316 & 0,000 & 0,000 \\ 0,643 & -1,714 & 0,771 & 0,043 & 0,129 & 0,043 & 0,086 & 0,000 \\ 0,000 & 1,408 & -2,254 & 0,845 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,083 & 0,740 & -1,562 & 0,616 & 0,082 & 0,000 & 0,041 \\ 0,000 & 0,000 & 0,111 & 0,741 & -1,333 & 0,407 & 0,074 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,095 & 1,518 & -3,130 & 1,423 & 0,095 \\ 0,000 & 4,105 & 0,000 & 0,000 & 0,137 & 2,606 & -2,743 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,189 & 0,000 & 0,189 & -0,378 \end{bmatrix}$$

Figura 5.1 – Máquina de estados e matriz de transição de estados da taxa de transmissão para o modelo MMRP da fonte de vídeo.

Em simuladores que trabalham com tempo discreto, é mais conveniente trabalhar com a matriz de transição de probabilidade^{5.1} P_{vd} . Esta matriz pode ser obtida a partir da matriz de transição de estados da taxa Q_{vd} ao se utilizar a seguinte igualdade [Ske93], [Kle75, p. 48]:

$$Q_{vd} = f_{vd}(P_{vd} - I) \quad (5.2)$$

onde f_{vd} é a taxa de quadros da fonte de vídeo e I é a matriz de identidade.

O vetor de probabilidades estacionárias do sistema $\pi = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_8]$, pode ser obtido a partir da equação de equilíbrio global ($\pi_1 + \pi_2 + \dots + \pi_8 = 1$) e da igualdade $\pi P_{vd} = \pi$ [Kle75, p.31]. A Tab. 5.1 mostra resultados numéricos e obtidos por simulação para o referido modelo com $f_{vd} = 24$ Hz. As taxas de transição foram adaptadas para providenciar serviço a taxa média de 64 kbps, ou seja, em média aproximadamente 178 células/s (utilizando-se 45 amostras de vídeo por célula ATM).

Tabela 5.1 – Taxa de chegada de células e probabilidade estacionária para a fonte de vídeo VBR.

Resultado Estado	Numérico		Simulação	
	λ_i (cel/s)	π_i	λ_i (cel/s)	π_i
1	106,00	0,025	104,88	0,024
2	128,72	0,190	128,73	0,189
3	151,43	0,145	151,97	0,145
4	174,14	0,210	174,11	0,205
5	196,86	0,240	196,68	0,222
6	219,57	0,090	219,08	0,094
7	242,29	0,060	243,33	0,063
8	265,00	0,040	264,92	0,057

^{5.1} Matrizes e vetores são denotados por letras maiúsculas e minúsculas, respectivamente, em negrito.

5.3 MODELOS DE TRÁFEGO DE DADOS

Utiliza-se dois modelos de tráfego para terminais de dados. Tráfego de dados aleatório pode ser gerado ao se utilizar um valor pequeno para a probabilidade de sucesso do experimento de Bernoulli, que particulariza o modelo ON/OFF descrito na Subseção 5.2.1. Deste modo, a taxa média de transmissão é $R_d = \sigma_d R_s N$ bps, onde σ_d é a probabilidade de sucesso do experimento de Bernoulli, R_s é a taxa líquida de informação transmitida em cada slot, e N é o número de slots por quadro. Utilizando-se o mesmo exemplo da Subseção 5.2.1, verifica-se que uma taxa líquida de 3400 bps é obtida ao se estabelecer $\sigma_d=0,02125$.

O modelo WWW (*World Wide Web*) especificado pelo ETSI (*European Telecommunications Standardization Institute*) é descrito a seguir [Bra98]. Em uma sessão, uma EM realiza uma ou mais requisições para a transmissão de pacotes. O número de requisições para a transmissão de pacotes é uma VA geométrica, N_{sp} , com valor médio, $\mu_{N_{sp}}$, de 5 pacotes por sessão. O tempo entre a chegada de duas requisições, D_s , é uma VA exponencial negativa com média, μ_{D_s} , de 4 segundos. Um nova sessão somente pode ser iniciada quando todos os pacotes gerados na sessão anterior forem transmitidos com sucesso. O número de pacotes gerados em cada sessão, N_{ps} , é uma VA geométrica com média, $\mu_{N_{ps}}$, de 25 pacotes por sessão. O tempo entre a chegada de pacotes, D_{ps} , é modelado por meio de uma VA exponencial negativa com média, $\mu_{D_{ps}}$, de 0,5 segundos. O tamanho de cada pacote é modelado por uma VA de Pareto com fator de forma (ou fator de Noah) de 1,1, parâmetro de localização de 81,5 e tamanho máximo de 67 kbytes. Este modelo produz pacotes com tamanho médio de 481 bytes e uma taxa líquida de aproximadamente 8 kbps. Neste trabalho, gera-se um novo terminal de dados WWW quando uma dada EM encerra a transmissão de todos os seus pacotes gerados. O tempo de chegada entre EMs WWW é modelado por uma VA exponencial negativa com média de 2 segundos.

A distribuição acumulativa de Pareto, do tamanho do pacote X , com fator de forma β e parâmetro de localização a é fornecida por [Pax95]

$$F_X(x) = P[X \leq x] = 1 - \left(\frac{a}{x}\right)^\beta \quad \text{para } a, \beta \geq 0, x \geq a \quad (5.3)$$

A média da distribuição de Pareto é

$$\mu = \frac{a\beta}{\beta - 1} \quad (5.4)$$

sendo que a variância é infinita para $\beta \leq 2$, enquanto que a média é infinita para $a \leq 1$. Conforme dito anteriormente, o modelo WWW do ETSI utiliza $\beta=1,1$ e $a=81,5$. Para propiciar uma variância finita, o tamanho máximo do pacote é truncado em 67 kbytes. A distribuição de Pareto truncada tem média [Bra98]

$$\mu = \frac{\beta a - c(a/c)^\beta}{\beta - 1} \quad (5.5)$$

e variância

$$\sigma^2 = \frac{\beta a^2 - 2c^2(a/c)^\beta}{a - 2} \quad \text{para } \beta \neq 2 \quad (5.6)$$

A geração da VA de Pareto é implementada de acordo com o método descrito em [Dev86, p. 29], ou seja, pelo método da inversão. A Tab. 5.2 mostra os valores teóricos e os obtidos por simulação do modelo WWW da ETSI.

Tabela 5.2 – Comparação entre os valores teóricos e os obtidos por simulação do modelo WWW do ETSI.

N_{sp}		D_s		N_{ps}		D_{ps}		Tamanho do pacote	
Teórico	Simulação	Teórico	Simulação	Teórico	Simulação	Teórico	Simulação	Teórico	Simulação
5	4,82	4 s.	4,3 s	25	23,7	0,5 s	0,49 s	481 bytes	480,4

Finalmente, ressalta-se uma interessantíssima propriedade da FDP de Pareto ao se considerar o caso em que esta modela o tempo de espera em uma fila. Neste caso, verifica-se que

$$E[X - x | X \geq x] = \frac{x}{\beta - 1} \quad \text{para } \beta > 1 \quad (5.7)$$

ou seja, quanto mais tempo “gasto” na fila para ser atendido maior será o tempo médio de espera na fila. É amplamente conhecido que para um processo de Poisson (X uma VA exponencial negativa), a Eq. (5.7) é independente de X. Nota-se que medidas de tráfego em redes de banda larga indicam que o tempo de chegada entre pacotes é auto-similar e, em muitos casos, adequadamente modelado por meio de uma VA de Pareto [Pax95].

5.4 DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA COM TRÁFEGO MISTO VOZ/VÍDEO

Os pacotes gerados pelos terminais de vídeo são armazenados numa estrutura de dados do tipo FIFO (*First-in First-out*) com capacidade de armazenamento de B_{vd} pacotes de vídeo. São analisadas duas políticas para a manipulação dos pacotes corrompidos: (i) os pacotes corrompidos não são transmitidos novamente; (ii) os pacotes somente são descartados do “buffer” após a EM receber o reconhecimento, transmitido pela ERB, do sucesso da transmissão. Neste último caso, é utilizada a política SARQ (*Selective Automatic Repeated Request*) [Lin83, p. 465] para a retransmissão dos pacotes corrompidos. Também são consideradas as seguintes estratégias para o descarte de pacotes por excesso de atraso: (i) os pacotes não são descartados; (ii) os pacotes são descartados após ultrapassarem um tempo de permanência máximo no “buffer”. Em todas os esquemas considerados, um sistema é dito estável se nenhum terminal exceder sua capacidade de armazenamento de pacotes (“overflow”).

Utiliza-se a política de alocação fixa de recursos para os terminais de vídeo, ou seja, um dado número de recursos (onde um recurso é entendido por uma sequência de assinatura em um slot) é permanentemente alocado para a EM de vídeo, desde o momento de sua entrada no sistema até o encerramento de sua transmissão. São consideradas as políticas de alocação de múltiplos slots (onde um código é alocado em cada slot) e de múltiplos códigos (onde mais de um código é alocado em um único slot).

Utiliza-se o caso de alocação de múltiplos slots a fim de exemplificar o cálculo das permissões de acesso para terminais de voz com tráfego misto voz/vídeo.

Quando do uso de funções de acesso, o método descrito na Seção 2.2 é modificado para $f_{K_{vd},i}[K_{res,i}] = f[K_{res,i} + K_{vd}]$, onde $K_{res,i}$ denota o número de usuários de voz com reserva no i -ésimo slot, K_{vd} o número de usuários de vídeo ativos e $f[\cdot]$ a função de permissão de acesso otimizada para usuários de voz [Bra96]. Ressalta-se que este método considera a reserva permanente das EMs de vídeo no cálculo das permissões de acesso para as EMs de voz.

Ao se utilizar o método proposto na Seção 2.20, a Eq. (2.55) deve ser modificada para

$$p_i = \frac{K_{ot} - K_{res,i} - K_{vd}}{K_{acs,i}} \quad (5.8)$$

ou seja, os recursos permanentes alocados para os usuários de vídeo devem ser desconsiderados no cálculo da permissão de acesso para as EMs de voz. Suponha, por exemplo, que $K_{ot}=19$ é o valor apropriado para obter uma perda média de pacotes de voz de 1 %. Assim, 17 códigos por slot estão disponíveis para as EMs de voz caso haja duas EMs de vídeo no sistema. Deve-se observar que isto não implica necessariamente que a perda de pacotes média seja de 1% quando o canal é carregado, constantemente, com 19 terminais. Contudo, este valor é o mais apropriado para a política de acesso, uma vez que minimiza a perda de pacotes corrompidos e descartados. Maiores detalhes podem ser encontrados nas Seções 2.3 a 2.5. Os resultados mostrados a seguir referenciam sistemas que utilizam DAV de dois estados.

5.4.1 – Taxa de Vídeo Contínua

Primeiramente, consideram-se terminais de vídeo gerando tráfego CBR à taxa de 144 kbps. A Fig. 5.2 mostra resultados concernentes aos efeitos da não-idealidade do CP no desempenho do protocolo CDMA/PRMA com tráfego misto voz/vídeo. A configuração empregada, FDDGp7Tq20N20D20 com $B_{vd}=200$ pacotes, tem um período de quadro de 20 ms com 20 slots por quadro. Assim, as EMs de vídeo podem transmitir a uma taxa líquida de 160 kbps ao se alocar 1 código em cada slot, visto que cada recurso alocado permite a transmissão de dados à taxa líquida de 8 kbps (vide Seções 2.4 e 5.2.1). Nota-se que a alocação de recursos acima do necessário em um canal sem perdas, permite a retransmissão dos pacotes eventualmente corrompidos em um canal com perdas. Nestes resultados, os pacotes não são descartados por excesso de atraso e os pacotes corrompidos são retransmitidos de acordo com a política SARQ. Finalmente, é imperativo ressaltar que os resultados para $\sigma_{cp}=0$ dB estão de acordo com os apresentados em [Bra96], enquanto os demais foram originalmente obtidos em [Hoe98c].

Comparando os resultados da Fig. 5.2 com os mostrados na Tab. 5.3, constata-se que a otimização da função de acesso em função de σ_{cp} conduz a um substancial incremento da capacidade do protocolo CDMA/PRMA. Pode também ser verificado o elevado ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Considerando somente tráfego de voz, foram obtidos os seguintes resultados: (i) 359 para $\sigma_{cp}=0$ dB; (ii) 320 para $\sigma_{cp}=0,5$ dB; (iii) 250 para $\sigma_{cp}=1$ dB; (iv) 130 para $\sigma_{cp}=2$ dB. Utilizando estes dados em conjunto com os mostrados na Tab. 5.3, a Tab. 5.4 expressa o número equivalente de EMs em função do número de EMs de vídeo. Nota-se que 1 terminal de vídeo (144 kbps) é equivalente a 44 usuários de

voz ($44 \times 0,425 \times 8000 \approx 149,6$ kbps) para $\sigma_{cp}=0$ dB. Nestes resultados, a RSI é modelada como uma razão de variáveis aleatórias do tipo log-normal (vide Subseção 4.61).

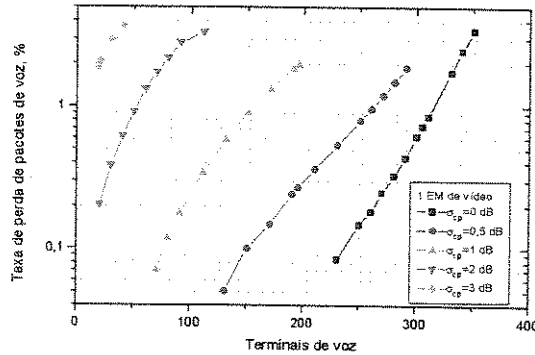


Figura 5.2a – Um terminal de vídeo.

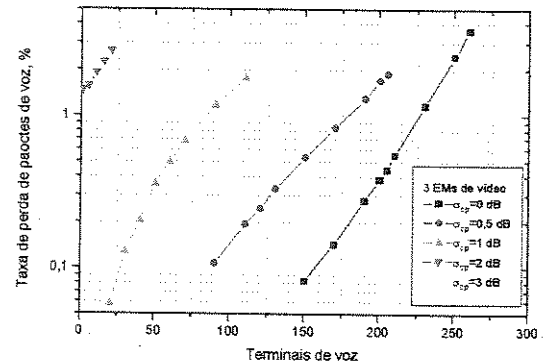


Figura 5.2b – Três terminais de vídeo.

Figura 5.2 – Capacidade do protocolo CDMA/PRMA com tráfego misto voz/vídeo CBR (144 kbps) em um sistema unicelular. Resultados parametrizados pelo desvio padrão do CP. Configuração: FDDGp7Tq20N20D20 sem EE. Função de permissão de acesso otimizada para perda de pacotes de 1% em um canal com CP perfeito (vide Tab. 2.5).

Tabela 5.3 – Ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA para a configuração explicitada na Fig. 5.2. Função de acesso otimizada para cada valor de σ_{pc} : Tab. B.5.1. $P_{perda}=1\%$.

σ_{cp} dB	CDMA/ PRMA		CDMA/ ALOHA		Ganho %	
	Vídeo		Vídeo		Vídeo	
	1	2	1	2	1	2
0	315	270	172	142	83,1	90,1
0,5	280	235	156	126	79,5	86,5
1,0	205	161	120	95	70,8	69,5
2,0	92	48	49	22	85,7	118,1

Tabela 5.4 – Número de terminais de voz equivalente para o protocolo CDMA/PRMA em função do número de EMs de vídeo e do nível de imperfeição no CP. $P_{perda}=1\%$.

M_{vd}	# de EMs de voz equivalente			
	σ_{cp}, dB			
	0,0	0,5	1,0	2,0
1	44	40	45	38
2	89	85	89	82

A Tab. 5.5 mostra que ambos protocolos sofrem uma semelhante perda da capacidade devido à não-idealidade no CP. A comparação destes resultados com os das tabelas 4.14 e 4.15 também mostra que o tráfego misto voz/vídeo acarreta um aumento da perda da capacidade relativa dos usuários de voz. Basicamente, isto decorre da restrição do sistema comportar, obrigatoriamente, um determinado número de terminais de vídeo em detrimento da diminuição do número de usuários de voz. Ressalta-se que não é utilizado entrelaçamento entre quadros (EE) nestes resultados.

No modelo de tráfego empregado nesta Seção, um terminal de vídeo transmite pacotes em praticamente todos os slots. Logo, a interferência externa pode ser modelada por (vide Eq. 2.19)

$$\frac{I}{P_0} = f(v_f) \frac{M_{voz}}{N} + K_{vd} \quad (5.9)$$

onde M_{voz} é o número de terminais de voz no sistema [Hoe98c].

A Fig. 5.3 mostra o número de EMs de voz em função do número de EMs de vídeo para um sistema CDMA/PRMA celular com $f=0,37$. Utilizando-se os dados da Tab. 5.4 e tratando a EM de vídeo pelo seu número equivalente de EMs de voz, verifica-se que a perda de capacidade devido a interferência externa é de 26,46% em um sistema com 1 EM de vídeo (este valor foi obtido para uma taxa de perda de pacotes de 1% para o subsistema de voz). A Tab. 2.10a mostra que uma perda de capacidade similar (26,26%) foi observada para tráfego de voz.

Tabela 5.5 – Perda de capacidade nos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA devido a não-idealidade no CP capacidade. A 1ª linha para o protocolo CDMA/PRMA mostra resultados onde a função de acesso foi otimizada para PC perfeito, enquanto na 2ª linha a função de acesso foi otimizada para cada valor de σ_{pc} .

σ_{pc} dB	CDMA/ PRMA		CDMA/ ALOHA	
	Vídeo		Vídeo	
	1	2	1	2
0,5	%	%	%	%
	14,9	18,5		
1,0	11,1	12,9	9,3	11,2
	52,1	55,9		
2,0	34,9	40,3	30,2	33,1
	83,8	92,5		
	70,8	82,2	71,3	84,5

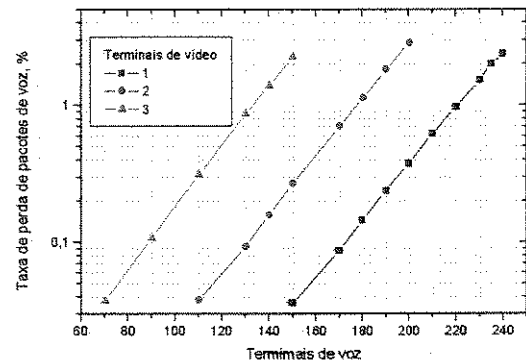


Figura 5.3 – Capacidade do protocolo CDMA/PRMA com tráfego misto voz/vídeo CBR em um sistema celular com $f=0,37$. Configuração: FDDGp7T_q20 N20D20. Função de acesso: Tab. B.2.1.

A Tab. 5.6 compara a capacidade do protocolo CDMA/PRMA ao se empregar a política SARQ para retransmissão dos pacotes corrompidos (1ª linha) e o esquema sem retransmissão (2ª linha). São também apresentados valores numéricos para a perda de pacotes de voz, os quais foram obtidos através do seguinte procedimento :

- 1) Calcula-se o ponto de equilíbrio considerando somente tráfego de voz (vide Seção 2.6). Os usuários de vídeo são indiretamente levados em conta ao se modificar a função de acesso. Suponha, por exemplo, que para uma dada configuração a função de acesso é $f[K_{res,i}] = 0,25 - 0,1K_{res,i}$, onde $K_{res,i}$ é o número de usuários de voz em reserva no i -ésimo slot. Tendo em vista que para tráfego CBR os usuários de vídeo tem alocado um recurso em cada slot, a função de acesso para um sistema com K_{vd} terminais de vídeo é $f[K_{res,i}] = 0,25 - 0,1(K_{res,i} + K_{vd})$. Evidentemente, este exemplo supõe que $0,1(K_{res,i} - K_{vd}) < 0,25$.
- 2) O número médio de usuários no canal é $(r + K_{vd})$, onde r é o valor de equilíbrio para tráfego de voz. Este valor é utilizado para calcular o valor médio da VA binomial que modela a carga no canal (vide Subseção 2.8.2).
- 3) Utilizando-se a função de acesso e a VA binomial supra definidas, calcula-se a perda de pacotes corrompidos e descartados conforme a Subseção 2.8.2.

- 3) Utilizando-se a função de acesso e a VA binomial supra definidas, calcula-se a perda de pacotes corrompidos e descartados conforme a Subseção 2.8.2.

Observou-se, no caso em que os pacotes de vídeo não são retransmitidos, a seguinte taxa média de perda de pacotes de vídeo: (i) 0,52 % para $M_{vd}=1$; (ii) 0,47 % para $M_{vd}=2$; (iii) 0,38 % para $M_{vd}=3$. Os resultados da Tab. 5.6 mostram, além da excelente concordância entre os resultados numéricos e os obtidos via simulação, que o pequeno percentual de pacotes de vídeo corrompidos faz com que o desempenho dos terminais de voz não seja afetado pela política de retransmissão adotada (SARQ).

Tabela 5.6 - Resultados numéricos e de simulação para o protocolo CDMA/PRMA com tráfego misto voz/vídeo CBR. Sistema celular com $f=0,749$ e CP perfeito. Configuração: FDDGp7Tq20N20D20. Função de acesso: Tab. 2.5.

M_{vd}	Simulação			Numéricos		
	M_{voz}	P_{cpd} , %	P_{desc} %	M_{voz}	P_{cpd} , %	P_{desc} %
1	165	0,66	0,30	161	0,74	0,25
	164	0,65	0,30			
2	118	0,65	0,31	115	0,73	0,27
	118	0,65	0,30			
3	72	0,67	0,30	68	0,68	0,27
	72	0,62	0,29			

A seguir considera-se tráfego de vídeo CBR à taxa de 64 kbps. Os resultados mostrados na Tab. 5.7 expressam que ao se limitar o tempo máximo de permanência de um pacote de vídeo no “buffer”, a perda de pacotes pode atingir valores da ordem de 10^{-4} para um atraso de acesso máximo de 40 ms (incluindo o entrelaçamento). Verifica-se que a alocação de recursos que permite transmitir uma taxa líquida máxima de 80 kbps (10 slots x 8 kbps/slot) não é suficiente para a transmissão com baixas perdas de tráfego CBR com taxa média de 64 kbps. Isto se deve à necessidade de se retransmitir os pacotes corrompidos (fator preponderante), bem como à variância do processo de geração de pacotes.

Tabela 5.7 – Número de EMs de voz para $P_{perda}=1\%$, e a taxa de pacotes de vídeo descartados em função do atraso máximo permitido para pacotes de vídeo (CBR a 64 kps). CP perfeito com EE de 2 quadros (20 ms). Configuração: TDDGp16Tq10N10D20. Utiliza-se (5.8) com $K_{ot}=19$ para determinação da permissão de acesso para as EMs de voz.

M_{vd}	CDMA/PRMA			CDMA/ALOHA		
	1 s	60ms	40 ms	1 s	60ms	40 ms
1	393			298		
	$<1 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-4}$	$<1E-6$	$3,9 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-4}$
2	374			282		
	$<1 \times 10^{-6}$	$8,55 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$<1 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-4}$
3	351			266		
	$<1 \times 10^{-6}$	$9,11 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$<1E-6$	$3,1 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-4}$

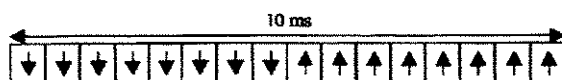
Analisando-se a Tab. 5.8, verifica-se o aumento do desempenho propiciado pelo entrelaçamento, bem como a

diminuição da capacidade do entrelaçamento “quebrar a memória” do canal (vide Subseção 4.6.3). Estes resultados se referenciam a um sistema TDD, onde a potência da EM de vídeo permanece constante em todos os slots de um dado quadro. Isto porque é assumido: (i) um sistema configurado para operar com um único ponto de chaveamento entre o enlace direto e o enlace reverso (vide Fig. 5.4a); (ii) que o canal não varia significativamente durante o quadro do enlace reverso.

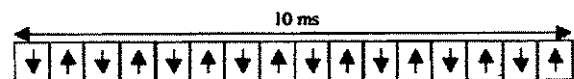
No caso do sistema operar com múltiplos pontos de chaveamento entre o enlace direto e o enlace reverso (vide Fig. 5.4b), então a ação da malha fechada do CP faz com que a potência da EM varie de slot para slot dentro de um mesmo quadro. Assumindo-se que o erro no CP é uma VA log-normal independente em cada slot, obteve-se os seguintes resultados para o número de EMs de voz (taxa de perda de pacotes de vídeo) para o protocolo CDMA/PRMA: (i) $\sigma_{cp}=1$ dB: 270 ($5,2 \times 10^{-6}$) para $a=0$, 260 ($3,2 \times 10^{-5}$) para $a=0,5$ e 244 ($1,14 \times 10^{-5}$) para $a=0,9$; (ii) $\sigma_{cp}=2$ dB: 155 ($7,0 \times 10^{-6}$) para $a=0$, 130 ($< 1 \times 10^{-6}$) para $a=0,5$; 120 ($8,77 \times 10^{-6}$) para $a=0,9$. Comparando estes resultados com os mostrados na Tab. 5.8, verifica-se que a ausência de sinalização da ERB durante o período de um quadro não acarreta perda de capacidade no subsistema de voz. Contudo, as perdas de pacotes de vídeo diminuem significativamente para $\sigma_{cp}=2$ dB com $a \geq 0,5$. Basicamente, isto se deve ao aumento da efetividade do EE com o diminuição da correlação da potência recebida nos diferentes quadros. Este efeito é notadamente observado para tráfego de vídeo, em decorrência do fato de que estas EMs transmitirão pacotes em praticamente todos os slots. Ressalta-se a utilização da Eq. 5.8 para obter as permissões de acesso para as EMs de voz, onde o número de ótimo de usuários de voz no canal é de 19 para $\sigma_{pc}=0$ dB, 15 para $\sigma_{pc}=1$ dB e 10 para $\sigma_{pc}=2$ dB.

Tabela 5.8 – Capacidade do protocolo CDMA/PRMA em um canal com CP imperfeito correlacionado (vide Subseção 4.6.3). Número de EMs de voz, $P_{perda}=1\%$ (1ª linha), e a taxa de pacotes de vídeo descartados para um atraso máximo de 60 ms em um sistema com 3 EMs de vídeo (CBR a 64 kps). Configuração: TDDGp16Tq10N10D20 com EE de 2 quadros (20 ms).

σ_{cp}	a	CDMA/PRMA			CDMA/ALOHA		
		0	0,5	0,9	0	0,5	0,9
0 dB		351			266		
		$9,1 \times 10^{-6}$			$3,1 \times 10^{-5}$		
1 dB		270	260	244	213	200	191
		$4,8 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$9,1 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-4}$
2 dB		155	130	120	120	100	87
		$4,3 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-4}$



(a)



(b)

Figura 5.4 – Estrutura de quadro de um sistema TDD simétrico (número de slots do enlace direto é igual ao número de slots do enlace reverso): (a) único ponto de chaveamento; (b) múltiplos pontos de chaveamento [ERC98, p. 81].

A Tab. 5.9 mostra resultados para o protocolo CDMA/PRMA ao se utilizar a alocação de recursos por meio de múltiplos códigos, onde cada EM tem seus recursos alocados em distintos slots. Utiliza-se uma abordagem conservadora, na medida que não é permitida a entrada de EMs de voz nos slots alocados para as EMs de vídeo. Esta estratégia permite a separação dos subsistemas de voz e de vídeo às custas de um número menor de EMs de voz no sistema. Comparando estes resultados com os mostrados nas duas tabelas anteriores, verifica-se um substancial ganho de desempenho para as EMs de vídeo quando o CP é imperfeito. Isto se deve à eliminação do *near-far effect*, tendo em vista que todos os pacotes simultaneamente transmitidos por uma dada EM chegam com potência idêntica na ERB. Nota-se que um dos problemas da aplicação desta técnica é a necessidade de amplificadores lineares devido à maior faixa dinâmica do sinal composto por múltiplos códigos. É amplamente conhecido que em amplificadores classe C o aumento da faixa dinâmica da amplitude pode causar efeitos na fase do sinal. Outro fator a ser considerado, diz respeito à necessidade de receptores com recursos suficientes para detectar múltiplos códigos. É importante observar que não estamos falando de receptores de detecção conjunta, os quais são bastante adequados para este tipo de aplicação, mas que exigem uma demanda computacional ainda mais intensa.

Tabela 5.9 – Desempenho do protocolo CDMA/PRMA, número de EMs de voz para uma taxa de perda de pacotes de 1% (1ª linha) e taxa pacotes de vídeo descartados para um atraso máximo de 60 ms, ao se utilizar o esquema de múltiplos códigos para as EMs de vídeo Configuração: vide Tab. 5.8.

M_{vd}	σ_{pc}	CBR (64 kbps)		
		0 dB	1 dB	2 dB
1		388	314	194
		$3,7 \times 10^{-5}$	$3,7 \times 10^{-5}$	$<10^{-6}$
2		362	290	170
		$1,1 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$<10^{-6}$
3		342	269	149
		$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$

5.4.2 – Taxa de Vídeo Variável

Utiliza-se aqui o modelo de tráfego descrito na subseção 5.2.2. Os sistemas analisados fazem uso da mesma configuração explicitada na Tab. 5.7. É somente considerado o uso de DAV de dois estados.

Ao se comparar as tabelas 5.7 e 5.10, verifica-se que a dinâmica do tráfego VBR acarreta um aumento da taxa de perda de pacotes de vídeo em relação aos valores observados para tráfego CBR. Contudo, nota-se que praticamente a mesma capacidade é obtida para o subsistema de voz. O aumento da perda de pacotes de vídeo é ocasionado pelos eventuais surtos de pacotes, característica do processo de Poisson, que não encontram recursos suficientes para sua transmissão no tempo requerido. Com efeito, a perda de pacotes é da ordem de 10^{-3} , mesmo para um atraso máximo de 1 s. Portanto, conclui-se que tráfego do tipo VBR necessita de uma alocação de recursos bem acima do necessário para a transmissão da sua taxa média. Nota-se que isto acarretaria em um aumento de tarifas, o que é um fator que dificulta demasiadamente a obtenção de um mercado de massas. Configura-se aqui um campo aberto de pesquisa referente à determinação de políticas de alocação de recursos, simultaneamente elástica e com um tempo de resposta reduzido, de tal forma a absorver

os surtos de pacotes de vídeo. Isto evitaria o excesso de alocação de recursos (os quais ficam sem utilização na maior parte do tempo). Deve ser ressaltado que, em virtude dos pesados interesses econômicos envolvidos, grande parte destes algoritmos de alocação dinâmica de recursos é do tipo proprietária.

Tabela 5.10 - Número de EMs de voz, $P_{\text{perda}}=1\%$, e taxa de pacotes de vídeo descartados em função do atraso máximo permitido para pacotes de vídeo (VBR a 64 kps). Alocação de recursos por meio de múltiplos slots, onde cada pacote de vídeo pode carregar 80 bits de informação. CP perfeito.

M_{vd}	CDMA/PRMA			CDMA/ALOHA		
	1 s	60ms	40 ms	1 s	60ms	40 ms
1	392			298		
	$1,1 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-2}$
2	374			282		
	$2,6 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$
3	355			268		
	$3,9 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$4,9 \times 10^{-2}$

Os efeitos da alocação de recursos acima da média na perda de pacotes de vídeo podem ser observados ao se comparar as tabelas 5.10 e 5.11. Os resultados mostrados na Tab. 5.11a desconsideram os bits de “overhead” de tal forma que cada pacote de vídeo pode carregar 115 bits de informação (código BCH(255,115,21)) ao invés dos 80 bits considerados nos demais casos (80 bits de informação+35 bits de overhead=115 bits). Isto ilustra de forma indireta, comparando as tabelas 5.11a e 5.10, o ganho de capacidade no subsistema de vídeo ao se alocar mais recursos para o tráfego VBR. Note que 2 células com 90 bytes de vídeo são mapeados em 9 pacotes nas tabelas 5.10 e 5.11b e, na média, em 6,3 pacotes na Tab. 5.11a.

Tabela 5.11 – Capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em um canal com CP imperfeito. Número de EM de voz, $P_{\text{perda}}=1\%$, e a taxa de pacotes de vídeo descartados para um atraso máximo de 60 ms em um sistema com tráfego de vídeo VBR (64 kps). Configuração: TDDGp16T₁10N10D20 com EE de 2 quadros (20 ms).

Tabela 5.11a – Alocação de recursos pelo esquema “múltiplos slots” (1 código em cada slot=10 códigos por quadro). 1 pacote de vídeo pode carregar 115 bits de informação. $1E \times 10^x$.

M_{vd}	σ_{cp}	CDMA/PRMA			CDMA/ALOHA		
		0 dB	1 dB	2 dB	0 dB	1 dB	2 dB
1		398	316	200	302	252	158
		1,1E-3	9,1E-4	1,2E-3	1,5E-3	6,5E-4	1,5E-3
2		380	297	181	290	238	142
		1,7E-3	1,2E-3	1,0E-3	1,2E-3	1,3E-3	1,1E-3
3		360	278	161	273	224	129
		1,9E-3	8,9E-4	1,5E-3	1,5E-3	1,4E-3	8,4E-4

Tabela 5.11b – Alocação de recursos pelo esquema “múltiplos códigos” (cada EM de vídeo aloca 18 códigos em um único slot; distintas EM utilizam distintos slots). Protocolo CDMA/PRMA. 1 pacote de vídeo pode carregar 80 bits de informação. $1E \times 10^x$.

M_{vd}	σ_{cp}	VBR		
		0 dB	1 dB	2 dB
1		365	303	195
		7,1E-5	5,7E-5	6,2E-5
2		323	266	170
		6,5E-5	5,3E-5	6,4E-5
3		281	231	149
		6,0E-5	5,8E-5	5,6E-5

Estes resultados ratificam a superioridade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Nota-se também a maior capacidade do subsistema de vídeo ao se utilizar o esquema de

múltiplos códigos em detrimento da alocação por múltiplos slots, decorrente da redução do near-far effect (conforme explicado na subseção anterior). A perda de capacidade de voz observada nos sistemas com múltiplos códigos em relação à sistemas com múltiplos slots (compare as tabelas 5.10 e 5.11b) se deve à não permissão de entrada de EMs de voz nos slots em que uma dada EM de vídeo está transmitindo múltiplos pacotes com distintos códigos.

5.5 DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA COM TRÁFEGO MISTO VOZ/DADOS

Os pacotes gerados pelos terminais de dados são armazenados em um estrutura de dados do tipo FIFO com capacidade de armazenamento de B_d pacotes de dados. Os pacotes corrompidos são transmitidos de acordo com a política SARQ. Um sistema é dito estável se nenhuma EM exceder sua capacidade de armazenamento de pacotes.

5.5.1 Tráfego de dados ON/OFF

Este modelo de tráfego permite a investigação da capacidade da política de acesso lidar, eficientemente, com tráfego do tipo aleatório. Nesta Seção, é considerado que os terminais de dados transmitem à taxa média de 3400 bps.

Basicamente, investiga-se duas estratégias para o acesso das EMs no canal. Na primeira, a permissão de acesso utilizada pelas EMs de voz para acessarem o i -ésimo slot, $p_{v,i}$, é calculada, ou de acordo com o esquema descrito na Seção 2.3 (funções de acesso), ou de acordo com o proposto na Seção 2.20 (critério a-posteriori implementável). A permissão de acesso para as EMs de dados é obtida por $p_{d,i} = c_p p_{v,i}$, onde c_p é uma constante ($0 < c_p < 1$), que define o nível de prioridade do tráfego de voz em relação ao tráfego de dados [Bra96]. Com efeito, um valor elevado de c_p aumenta a aleatoriedade do tráfego de dados no canal, enquanto que valores pequenos tornam o tráfego de voz dominante às custas do aumento do atraso observado pelas EMs de dados.

Na segunda estratégia a ser investigada, as permissões de acesso para as EMs de voz são calculadas de acordo com o critério a-posteriori implementável. Quando este valor é menor que 1, indicando que há mais EMs de voz no estado de acesso do que recursos disponíveis, a permissão de acesso para as EMs de dados é negada (ou seja, a probabilidade de permissão é zero). Caso contrário, a permissão de acesso para o i -ésimo slot é calculada como

$$p_{d,i} = \frac{K_{ot} - K_{res,i} - (M - \sum_{i=1}^N K_{res,i})P_{SF}}{M_d} \quad (5.10)$$

onde M_d é o número de EMs de dados no sistema, e P_{SF} é a probabilidade que uma EM de voz passe do estado de silêncio para o estado de fala em um período de tempo que equivale ao máximo retardo admissível

$\frac{D\tau}{t^2}$ para os pacotes de voz, ou seja, $P_{SF} = 1 - e^{-\frac{D\tau}{t^2}}$. O numerador estima o número médio de recursos que não serão utilizados pelos terminais de voz no i -ésimo slot. Assim, esta política de acesso permitirá que, na média, $M_d p_{d,i}$ EMs de dados acessem o i -ésimo slot, caso seja estimada a existência de recursos que não

serão utilizados pelas EMs de voz no i -ésimo slot.

A Fig. 5.5a mostra, para um tempo de comunicação de 100 s, o número de conversações simultâneas em função do número de terminais de dados. Estes valores são parametrizados pelo tempo de acesso dos terminais de dados, ou seja, pelo tempo decorrido entre a chegada do pacote no buffer e o acesso no canal. A carga e o perfil (razão voz/dados) do tráfego suportado pelo sistema devem satisfazer às restrições de estabilidade do buffer, bem como à obtenção de uma taxa de perda de pacotes de voz menor que 2 %. Para $\sigma_{cp}=0$ dB, o número de EMs de voz suportado para uma alta carga de tráfego de dados é limitado pela taxa de perda de pacotes de voz. Para baixo tráfego de dados e $\sigma_{cp}=0$ dB, o número das EMs de dados é limitado pela restrição de estabilidade do sistema. Este fenômeno se deve a prioridade do tráfego de voz em relação ao tráfego de dados. Para os demais valores de σ_{cp} , a restrição dominante é a taxa de perda de pacotes de voz. Nestes casos, o número de terminais de dados é mantido constante, e o número de terminais de voz que satisfaz as restrições de contorno é então determinado. Os resultados para $\sigma_{cp}=0$ estão de acordo com os mostrados em [Bra96], enquanto os demais foram originalmente obtidos em [Hoe98c].

Para tráfego misto voz/dados ON/OFF, o efeito médio da interferência externa pode ser modelado como

$$\frac{I}{P_0} = f \left(v_f \frac{M_v}{N} + K_d \frac{R_d}{NR_v} \right) \quad (5.11)$$

onde M_v é o número de terminais de voz no sistema, K_d é o número de EMs de dados e R_d a taxa de fonte dos terminais de dados. Os demais termos foram definidos na Seção 2.5. O segundo termo modela o número médio de terminais de dados que acessam o slot. Embora este valor dentro da célula seja uma VA com uma variância elevada, a aplicação do teorema central do limite permite utilizar o valor médio para o cômputo da interferência externa. A Fig. 5.5b mostra o desempenho do sistema CDMA/PRMA em um sistema celular com $f=0,37$. A dinâmica observada no parágrafo anterior segue válida.

A Fig. 2.11a mostra que foi obtida a seguinte capacidade para o protocolo CDMA/PRMA no caso de uma perda de pacotes de voz de 2% e CP perfeito: $M_v=380$ para $f=0$ e $M_v=275$ para $f=0,37$. A Fig. 5.5a mostra que $M_v=355$ para $M_d=30$ e $M_v=144$ para $M_d=100$. A Fig. 5.5b mostra que $M_v=230$ para $M_d=30$ e $M_v=50$ para $M_d=100$. Isto indica que a aleatoriedade do tráfego no canal causa uma significativa perda de capacidade. Este é o motivo que está por trás do mecanismo de acesso expresso por 5.10. Finalmente, observa-se que a utilização de EE e funções de acesso otimizadas para cada valor de σ_{cp} permitem, como visto anteriormente para tráfego de vídeo, atenuar as perdas devidas ao CP imperfeito. Contudo, os efeitos da aleatoriedade na capacidade continuarão presentes, embora o desempenho ocupe um patamar mais elevado.

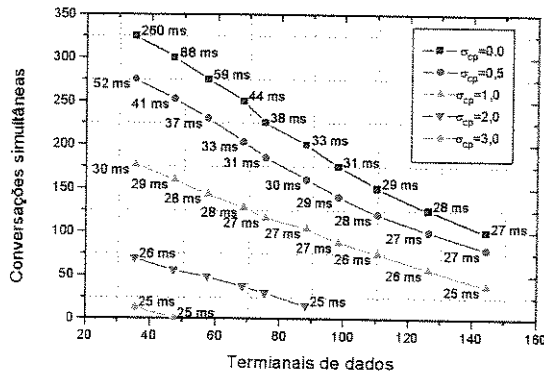


Figura 5.5a – Sistema unicolor.

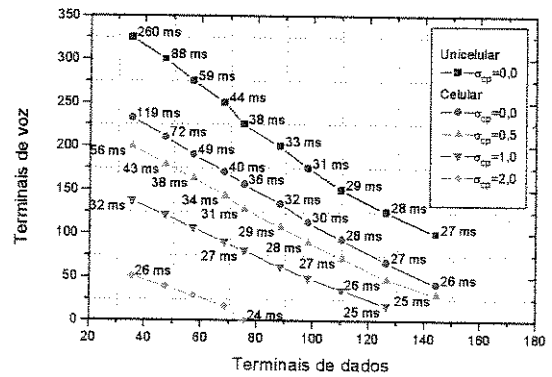


Figura 5.5b – Sistema celular com $f=0,37$.

Figura 5.5 – Desempenho do protocolo CDMA/PRMA para tráfego misto voz/dados ON/OFF. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20 sem EE, $B_d=200$ pacotes. DAV de dois estados. Função de acesso otimizada para $\sigma_{cp}=0$ dB e perda de pacotes de 1 % (Tab. 2.4). A constante c_p é igual a 0,2.

O melhor desempenho, aumento do número de EMs de voz e menor atraso no acesso da EMs de dados, advindo do uso de DAV de três estados é evidenciado na Fig. 5.6. Esta figura utiliza as mesmas restrições e a mesma configuração empregada na figura anterior. O tráfego de voz suportado satisfaz as restrições de estabilidade do buffer (canto inferior direito) e perda de pacotes de voz menor que 2% (canto superior esquerdo). São mostrados resultados para o canal AWGN e Rayleigh (todos os caminhos com a mesma potência e receptor RAKE casado com a diversidade do canal, L_c).

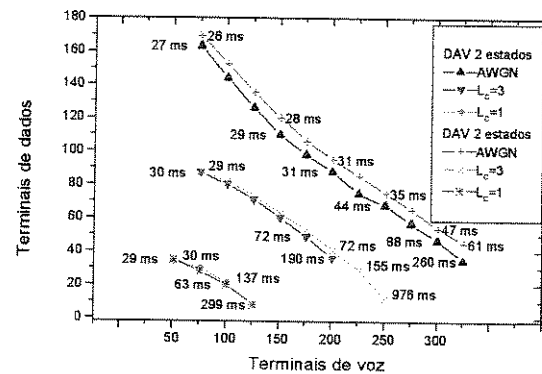


Figura 5.6 – Desempenho do protocolo CDMA/PRMA para tráfego misto voz/dados ON/OFF. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20 sem EE, $B_d=200$ pacotes.

Analisando-se a Fig 5.7, pode-se concluir que a utilização da eq. 5.10 para o cálculo das permissões de acesso propicia um ganho de desempenho quando o tráfego de dados é predominante em relação ao tráfego de voz. Caso contrário, verifica-se que a alta prioridade das EMs de voz leva à instabilidade do sistema.

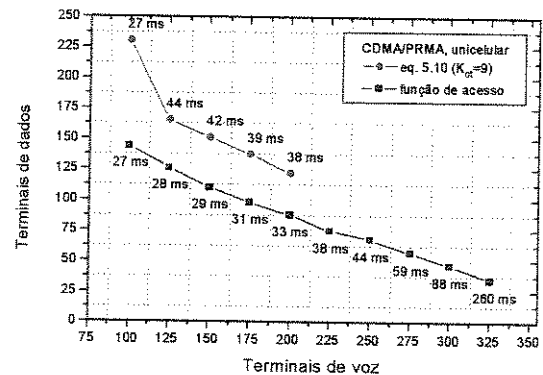


Figura 5.7 – Comparação entre dois métodos para determinação das permissões de acesso para as EM de dados no protocolo CDMA/PRMA. Tráfego misto voz/dados ON/OFF. Configuração: vide Fig. 5.5.

5.5.2 Tráfego de dados do tipo WWW

Aqui, as permissões de acesso são calculadas de acordo com 5.10. As EMs obtêm uma reserva, com um ciclo de alocação máximo, de 100 quadros quando o primeiro pacote do ciclo for corretamente recebido na ERB. Os recursos são liberados antes do fim do ciclo de alocação caso não haja mais pacotes de dados no buffer para serem transmitidos. Este ciclo equivale ao número médio de quadros utilizados em um surto de atividade de voz com DAV de dois estados em um sistema com período de quadro de 10 ms. As EMs WWW podem alocar um único código em qualquer slot do quadro, isto é, o número máximo de recursos alocados é igual ao número de slots do quadro do enlace reverso. Uma EM obtém sua reserva, um código em um dado slot, se os seguintes eventos independentes ocorrerem: (i) sucesso no experimento de Bernoulli que regula o acesso ao canal; (ii) o pacote transmitido para obtenção da reserva for recebido com sucesso na ERB. A busca de reservas em distintos slots se processa de maneira independente.

Os resultados mostrados consideram um buffer com tamanho infinito. Pode ser encontrado em [Wan99] resultados de simulações de uma versão simplificada do protocolo CDMA/PRMA (1 slot por quadro) para tráfego de dados (sem voz) com distribuição entre chegada de pacotes modelada por uma VA de Pareto. Neste trabalho, é mostrado que a intensidade do fator de Noah da VA de Pareto pode acarretar na diminuição do ganho de armazenamento do buffer. Isto faz com que o aumento substancial do tamanho do buffer não se traduza na redução da perda de pacotes devido ao transbordo da capacidade de armazenamento da estrutura de dados.

A taxa de perda de pacotes de voz para os protocolos CDMA/PRMA versus a carga média do canal, G , é mostrada na Fig. 5.8a [Hoe00a]. Com esta configuração, a capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em um canal AWGN é de 415 ($\sim 0,425 \times 415 / 10 \approx 17,6$ usuários/slot) e 315, respectivamente, para uma perda de pacotes de 1%. A carga do canal inclui todos os pacotes de voz e de dados recebidos na ERB em um dado slot. O atraso total é o tempo definido entre a chegada do pacote no buffer e a sua correta recepção pela ERB. Os pacotes não são descartados por excesso de atraso. Os pacotes corrompidos são retransmitidos segundo o esquema SARQ. O atraso de acesso é definido como aquele que ocorre entre a chegada da requisição na camada de controle de acesso ao meio (MAC do inglês *Medium Access Control*) da EM e a sua transmissão no canal. Foi observado, para ambos protocolos, um atraso de $\sim 4,5$ ms na faixa de carga de dados considerada. Este atraso é explicado pelo fato de que a programação do tempo de acesso, efetuada pela MAC, faz com que a transmissão do pacote seja postergada para o início do próximo quadro. O atraso total observado no protocolo CDMA/ALOHA (para todas as cargas) e no protocolo CDMA/PRMA (para baixa carga de usuário de dados) indica que é imperativo alocar, dinamicamente, uma maior banda de passagem para a obtenção de uma elevada QoS. Os atrasos observados quando do alto tráfego de dados no protocolo CDMA/PRMA constituem uma superposição de atrasos, donde o primeiro decorre do tempo gasto para obter uma reserva, e o segundo, do tempo utilizado para transmitir o surto de pacotes WWW.

A Fig. 5.8b mostra o desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA quando é permitido a uma EM WWW alocar até 20 códigos por quadro. Neste ponto, o sistema é projetado para ter 20 slots por quadro (ao invés de 10 como na Fig. 5.8a) com a finalidade de implementar este esquema de alocação por múltiplos slots. Foi mostrado no Cap. 2 que o protocolo CDMA/PRMA tem um relação praticamente linear entre a capacidade de terminais de voz, o número de slots por quadro e o ganho de processamento. Ressalta-se, que o

mesmo raciocínio não é válido para o protocolo CDMA/ALOHA. Deste modo, o ganho de processamento é reduzido de 16 para 8, a fim de manter similar a capacidade de voz (considerando somente tráfego de voz) obtida com a configuração empregada na Fig. 5.8a. De fato, a capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em um canal AWGN é de 430 e 257, respectivamente, para uma perda de pacotes de 1%. Comparando-se as figuras 5.8a e a 5.8b, verifica-se que, embora ainda elevado, a estratégia empregada na Fig. 5.8b permite a redução do atraso observado para o tráfego WWW.

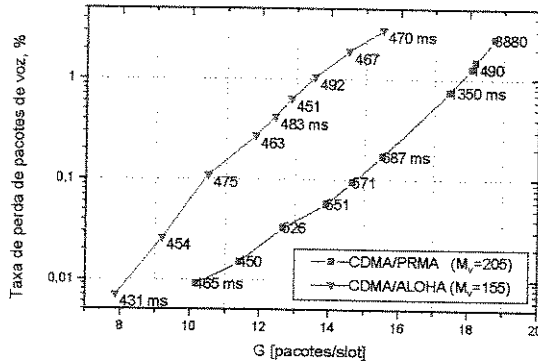


Figura 5.8a – As EMs WW podem alocar 1 código em cada um dos 10 slots do quadro. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20 sem EE. $K_{ot}=19$.

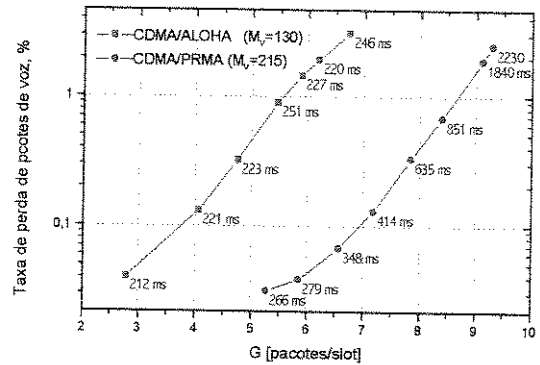


Figura 5.8b – As EMs WW podem alocar 1 código em cada um dos 20 slots do quadro. Configuração: TDDGp8T_q10N20D40 sem EE. $K_{ot}=10$.

Figura 5.8 – Desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA para tráfego misto voz/WWW em um canal AWGN. Detetores de atividade de voz de dois estados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

6.1 RETROSPECTIVA

No Cap. 2 foi proposto um modelo de terminal de voz que, além de ter possibilitado a descrição qualitativa do protocolo CDMA/PRMA, levou à obtenção de expressões numéricas, as quais permitem avaliar o seu desempenho. Foi verificado, através de extensiva comparação entre resultados numéricos e de simulação, que estas expressões podem ser utilizadas para quantificar, com adequada precisão, o desempenho do protocolo CDMA/PRMA. Baseado na análise do ponto de equilíbrio foi proposto um modelo de terminal de voz para o protocolo CDMA/ALOHA. A confrontação dos resultados numéricos com os obtidos via simulação permitiu a validação do simulador desenvolvido.

Após terem sido validados os simuladores, realizou-se uma investigação comparativa do desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA para tráfego de voz. Foram consideradas distintas condições operacionais (nível de interferência interna e externa, efeitos do ruído térmico, etc.) e configurações do sistema (tipo de detetor de atividade de voz, valor do ganho de processamento, tipo de código corretor de erros, etc.). Em linhas gerais, foi constatado que o acesso controlado do protocolo CDMA/PRMA permite obter ganhos de desempenho em relação ao protocolo de acesso irrestrito CDMA/ALOHA. Esta melhor performance traduz-se em uma maior capacidade para uma dada perda de pacotes de voz, bem como numa menor variação da perda de pacotes em relação ao seu valor nominal.

Foi mostrado que a interferência externa determina uma maior perda de capacidade no protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA.

Explicou-se porque o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA diminui com o aumento do ganho de processamento.

Foi analisado uma variante do protocolo CDMA/PRMA, denominada de CDMA/FRMA, que permite obter praticamente o mesmo desempenho, porém com uma menor sinalização entre a estação rádio base (ERB) e as estações móveis (EMs).

Constatou-se que o protocolo CDMA/PRMA é bastante flexível em relação à escolha do período de quadro e do número de slots por quadro.

Resultados numéricos e de simulações para os sistemas CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA mostraram que é possível obter um significativo aumento da capacidade pela utilização do detetor de atividade de voz de três estados ao invés de detetores de dois estados. Além da imediata implementação, verificou-se que esta troca permite manter as características do desempenho dos protocolos, porém em um patamar mais elevado.

Concluiu-se que os mesmos resultados são obtidos ao se utilizar a aproximação Gaussiana padrão e a aproximação Gaussiana incrementada no cálculo da probabilidade de erro de bit.

Foi apresentado um algoritmo para o cálculo das permissões de acesso que emula a implementação do

mecanismo de cálculo a-posteriori.

O Cap. 2 foi encerrado com uma investigação sobre o desempenho do protocolo CDMA/PRMA com códigos convolucionais. Estes resultados mostraram que a flexibilidade deste tipo de código (escolha do tamanho da palavra código, por exemplo) é muito adequada para sistemas de transmissão de pacotes.

No Cap. 3 foi desenvolvido um simulador genérico de rede celular de pacotes DS-CDMA, com a especificidade de que os resultados apresentados fossem particularizados para os protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA. Os efeitos da interferência externa no desempenho dos protocolos citados foi o aspecto primordial da investigação.

Foram analisados sistemas com células circulares (círculo inscrito no hexágono e hexágono inscrito no círculo) e células hexagonais. Constatou-se que a maior concentração de usuários nas extremidades da célula pode causar expressivos efeitos na capacidade.

Foram investigados sistemas com antenas omnidirecionais, antenas diretivas idealizadas e antenas diretivas com diagrama de radiação real. Isto permitiu constatar que no mundo real, o ganho de setorização é de aproximadamente 2,5 ao se considerar sistemas DS-CDMA com três setores por célula.

Estudou-se os efeitos do expoente da perda de percurso na interferência externa. Verificou-se que o número de camadas de células a ser considerado, para que haja a convergência da média e da variância da interferência externa, depende fortemente do coeficiente da perda de percurso.

Foi dada especial atenção ao estudo dos efeitos do sombreamento log-normal na capacidade de sistemas DS-CDMA. Pode-se concluir sobre a extrema necessidade de se implementar algoritmos robustos de pesquisa de sinal piloto e de "soft-handoff", a fim de que a EM transmita a menor potência possível no maior período de tempo possível. Dada esta condição, verificou-se que os efeitos do sombreamento log-normal na capacidade do sistema são plenamente administráveis. Partindo-se desta suposição, foi concluído que é adequado modelar os efeitos da interferência externa por meio de uma variável aleatória chi-quadrada.

A confrontação dos resultados numéricos com os obtidos via simulação constitui o suporte para as conclusões efetuadas ao longo deste capítulo.

No Cap. 4 objetivou-se tipificar e quantificar os efeitos do desvanecimento rápido, do desvanecimento lento e do controle de potência (CP) imperfeito no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA.

Primeiramente, foi constatado que o tráfego adicional gerado pelo entrelaçamento entre quadros (EE) não acarreta a diminuição da capacidade do protocolo CDMA/PRMA em um canal AWGN.

Em seguida, foram desenvolvidas expressões numéricas para determinar a probabilidade de erro de bit e a probabilidade de erro de pacotes em canais com desvanecimento Rayleigh. Considerou-se desvanecimento plano e seletivo em frequência. Para este último foram considerados sistemas com múltiplas antenas, sistemas com o receptor RAKE (foram particularizados casos onde o receptor é casado ou descasado com a com receptor RAKE (foram particularizados casos onde o receptor é casado ou descasado com diversidade do canal) e distintos perfis de potência do canal. Foram também apresentadas duas modelagens para a interferência de múltiplo acesso (IMA): (i) interferência modelada como uma densidade espectral de potência

plana; (ii) interferência modelada como uma soma de variáveis aleatórias (VAs). Os casos referidos foram também analisados quando do desvanecimento lento e rápido em relação à duração do slot.

Chegou-se à conclusão que as distintas modelagens da IMA, ou como uma densidade espectral de potência plana ou como uma soma de VAs aleatórias, levam a resultados bastante semelhantes.

Fundamentado em resultados numéricos e de simulação dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA, constatou-se que um esquema de diversidade bem projetado combate adequadamente o desvanecimento rápido Rayleigh.

Concluiu-se ser de fundamental importância a implementação do EE, além de diversidade, para atenuar a perda de capacidade dos sistemas TD-CDMA quando confrontados com canais com desvanecimento lento. Mostrou-se também que o casamento do número de braços do receptor RAKE com a diversidade do canal é de fundamental importância para que os efeitos do multipercurso na capacidade não sejam catastróficos. Nota-se que a implementação deste receptor não é uma tarefa trivial na medida em que demanda um elevado custo computacional.

Pode-se concluir que sistemas com perfil de potência não-plano exigem diversidade espacial, além da diversidade intrínseca implementada pelo receptor RAKE.

Os diversos estudos efetuados em canais Rayleigh, ratificaram a enorme superioridade do protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA. Verificou-se que a implementação de permissões de acesso casadas com o tipo de canal e a qualidade de serviço desejada permitem aumentar, significativamente, o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA, em relação ao protocolo CDMA/ALOHA.

Foi proposto um método para geração da VA Nakagami-m. Investigou-se o desempenho de ambos protocolos para distintas figuras de desvanecimento da VA Nakagami-m.

Investigou-se também o desempenho de ambos protocolos em canais com desvanecimento Weibull rápido.

As imperfeições no CP podem ser modeladas ao se assumir que a potência recebida na ERB é uma VA log-normal (LN).

Constatou-se que também neste caso se mantém válidas as conclusões efetuadas na análise de canais com desvanecimento Rayleigh, ou seja, as distintas modelagens da IMA, ou como uma densidade espectral de potência plana ou como uma soma de VAs aleatórias, levam a resultados bastante semelhantes.

Foi concluído que aspectos práticos, implementação de algoritmos de CP factíveis, levam à implementação de sistemas TD-CDMA no modo TDD. Verificou-se que as perdas de capacidade devido ao CP podem ser minoradas por meio de EE e do uso de permissões de acesso casadas com o canal.

No Cap. 5 foi investigado o desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com tráfego misto voz/vídeo CBR, voz/vídeo VBR, voz/dados ON/OFF e voz/dados WWW. Os modelos de tráfego teóricos foram positivamente confrontados com os modelos implementados no simulador.

Os resultados numéricos obtidos para o protocolo CDMA/PRMA para tráfego voz/vídeo CBR validam o simulador desenvolvido. Estas análises também indicam a adequação do uso de uma política de ~~re~~transmissão

de pacotes do tipo SARQ. Foram também obtidos resultados concernentes aos efeitos do CP imperfeito, os quais mostraram que o sistema CDMA/PRMA funciona adequadamente na configuração TDD com um único ponto de chaveamento. Quanto à interferência externa no sistema CDMA/PRMA, verificou-se a mesma perda de capacidade percentual para tráfego misto voz/vídeo e tráfego de voz.

Resultados para tráfego misto voz/vídeo VBR e voz/dados WWW indicam a necessidade de políticas de alocação de recursos sofisticadas, ou seja, que contenham elasticidade capaz de comportar a rápida variação da taxa de fonte num pequeno espaço de tempo.

A confrontação das políticas de alocação de recursos por múltiplos slots e por múltiplos códigos mostrou que esta última permite a redução do efeito “próximo-distante”.

6.2 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Utilizando os conceitos desenvolvidos ao longo deste trabalho, apresenta-se, do ponto de vista do autor, temas que submetidos à elaborações poderão se constituir em futuras atividades de pesquisa.

- Desenvolvimento de mecanismos de acesso que aliem alta eficiência espectral e qualidade de serviço para o tráfego dominante das redes sem fio do futuro próximo, ou seja, tráfego WWW.
- Evolução do simulador de redes de pacotes DS-CDMA, ao considerar aspectos como: macrodiversidade, “soft-handoff”, “softer-handoff”, “hard-handoff”, desvanecimento log-normal correlacionado, mobilidade dos terminais, etc. Implementação de valores práticos para a sensibilidade do receptor, potência máxima transmitida, ou seja, a introdução no simulador de aspetos concernentes ao “link budget”.
- Utilização de modelos de canal de Markov na investigação dos efeitos do desvanecimento no desempenho sistemas TD-CDMA no modo TDD.
- Investigação do desempenho de sistemas TD-CDMA com códigos corretores de erro projetados para canais que apresentem erros em surtos.
- Desenvolvimento de algoritmos para a obtenção do sincronismo de chip em sistemas de pacotes TD-CDMA.
- Projeto de mecanismos de acesso ao meio que utilizem codificação e modulação de canal adaptativa.
- Projeto integrado de mecanismos de acesso ao meio com técnicas avançadas de processamento de sinais: detecção conjunta (vide anexo E), antenas inteligentes, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Ari93] ARIYAVISITAKUL, S., CHANG, L. F.: "Signal and interference statistics of a CDMA system with feedback power control", *IEEE Trans. Commun.*, v. 41, n. 11, p. 1626-1634, Nov. 1993.
- [Alm98] de ALMEIDA, C., HOEFEL, R. P. F.: "On the interference of cellular CDMA systems", *Proc. of SBT/IEEE International Telecommunications Symposium (ITS'98)*, São Paulo, Brasil, v.1, p. 166-171, 1998.
- [Ami94] AMITAY, N., NANDA, S.: "Resource auction multiple access (RAMA) for statistical multiplexing of speech in wireless PCS", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, v. 43, n. 3, p. 584-595, Ago. 1994.
- [Bra96] BRAND, A. E., AGHVAMI A. H.: "Performance of a joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, v. 14, n. 9, p. 1698-1707, Dez. 1996.
- [Bra98] BRAND, A. E., AGHVAMI A. H.: "Multidimensional PRMA prioritized Bayesian broadcast – a MAC strategy for multiservice traffic over UMTS", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 47, n. 4, p. 1148-1161, Nov. 1998.
- [Cam92] CAMERON, R., WORNER, B.: "An analysis of CDMA with imperfect power control," *Conf. Rec of VTC'92, Texas, Denver*, p. 737-735, 1992.
- [Con84] CONAN, J.: "The Weight Spectra of Some Short Low-Rate Convolutional Codes", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 32, p. 1050-1053, Set. 1984.
- [Cor98] CORRAZA, G. E., DE MAIO, G., e VATALARO, F.: "CDMA cellular systems performance with fading, shadowing and imperfect power control", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 47, n. 2, p. 450-459, Maio 1998.
- [Dev86] DEVROYE, Luc: "Non-uniform random variate generation", New York: Springer-Verlag, 1986.
- [ERC98] ERICSSON: "Wideband packet-CDMA RTT proposal", <http://www.itu.int/imt>.
- [ETSI98] EUROPEAN TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION INSTITUTE: "The ETSI UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA) ITU-R RTT Candidate Submission", <http://www.itu.int/imt>.
- [Foe97] FOERSTER, J. R., MILSTEIN, L.: "Analysis of hybrid, coherent FDMA/CDMA systems in Rician multipath fading", *IEEE Trans. Commun.*, v. 45, n.1, p. 15-18, Jan. 1997.
- [Fro94] FROST, V. S., MELAMED, B.: "Traffic modeling for telecommunications networks", *IEEE Communications Magazine*, Mar. 1994.
- [Gan94] GANESH, R., JOSEPH, N. K., WILSON, D., RAYCHAUDHURI, D.: "Performance of a cellular packet CDMA in an integrated voice/data network", *International Journal on Wireless Information Network*, v. 1, n. 3, p. 199-221, 1994.
- [Gil91] GILHOUSEN, K. S. et al.: "On the capacity of a cellular CDMA system", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, v. 40, n. 2, p. 303-311, Maio 1991.

- [Goo89] GOODMAN, D. J., VALENZUELA, A., GAYLARD, K. T. e RAMARURTHI, B.: "Packet reservation multiple access for local wireless communications", *IEEE Trans. on Communication*, v. 37, no. 8, p. 885-890, Ago. 1989.
- [Goo90] GOODMAN, D. J.: "Cellular Packet Communications", *IEEE Trans. on Communication*, v. 38, no. 8, p. 1272-1280, Ago. 1990.
- [Goo91] GOODMAN, D. J., WEI, S. X.: "Efficiency of packet reservation multiple access", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, v. 40, n. 1, p. 170-176, Fev. 1991.
- [Gud91] GUDMUNDSON, M.: "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems", *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2145-2146, Nov. 1991.
- [Gud92] GUDMUNDSON, B., SKÖLD, J., e UGLAND, J. K., "A comparison of CDMA and TDMA systems", *Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference '92 (VTC '92)*, Denver, Texas, p. 977-980, 1992.
- [Hea92] HEATH, M. R., NEWSON, P.: "On the capacity of spread spectrum CDMA for mobile radio", *Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference '92 (VTC '92)*, Denver, Texas, p. 732-735, 1992.
- [Hoe98a] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Capacity loss of CDMA/PRMA systems with imperfect power control loop", *Electronics Letters*, v.34, n.10, p.1020-1022, Maio 1998.
- [Hoe98b] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "On the capacity of CDMA/PRMA systems", *Proc. of 8th Virginia Tech/MPRG Symposium on Wireless Personal Communications*, 1998, Blacksburg, Virginia, p. 349-360.
- [Hoe98c] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Capacity loss of CDMA/PRMA protocol with imperfect power control for multimedia traffic", *Proc. of SBT/IEEE International Symposium*, São Paulo, Brasil, 1998, p. 66-71.
- [Hoe98d] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "The fading effects on the performance of CDMA/PRMA", *Anais do VIII Seminario Nacional y 2º Congreso Internacional en Telecomunicaciones*, 1998, Valdivia, Chile, p. 51-56.
- [Hoe99a] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "The performance of CDMA/PRMA for Nakagami-m frequency selective fading channel", *Electronics Letters*, v.35, n.1, p.28-29, Jan. 1999.
- [Hoe99b] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "The fading effects on the CDMA/PRMA network performance", *Proc. of the Vehicular Technology Conference '99 Spring (VTC '99)*, Houston, Texas, 1999.
- [Hoe99c] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Avaliação de desempenho do protocolo CDMA/PRMA fundamentada na análise de ponto de equilíbrio", *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT '99)*, Vitória, ES, p. 105-110, 1999.
- [Hoe99d]¹ HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "On the capacity of CDMA/PRMA systems", em *Wireless Personal Communications: Emerging Technologies for Enhanced Communications*, Rappaport, T. S. et al (eds), Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999, p.315-326.

¹ Este artigo originalmente publicado em [Hoe98b] foi selecionado pelos editores para publicação neste livro.

- [Hoe99e] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Numerical analysis of a joint CDMA/PRMA protocol based on equilibrium point analysis", *Electronics Letters*, vol. 35, n. 24, p.2093-2095, 25th Nov 1999.
- [Hoe00a] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Comparative analysis of CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA medium access schemes for packet transmission for third generation mobile communication systems", in the *Proc. of IEEE 3Gwireless'2000*, June 14-16, 2000, San Francisco, USA.
- [Hoe00b] HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Estudo comparativo do desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com receptor convencional e com receptor de detecção conjunta descorrelacionadora", submetido para o XIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT'2000).
- [Hol92] HOLTZMAM, J. M.: "A simple accurate method to calculate spread-spectrum multiple-access error probabilities", *IEEE Trans. on Communication*, v. 40, no. 3, p. 461-464, Mar. 1992.
- [HP95] HEWLETT PACKARD: "GSM basics, an introduction, " em *Cellular radio e personal communications: volume 2*, Rappaport, T. S. (editor), 1996, p. 107-129.
- [Kle75] KLEINROCK, L.: "*Queueing system – Volume 1: theory*", New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [Kle96] M., KLEINROCK, ALWAN, A., BARGODIA, R., BAMBOS, N., GERLA, L. , SHORT, J., VILLASENOR, J.: "Adaptive mobile multimedia networks, " *IEEE Personal Communications*, p. 34-51. April 1996.
- [Kud92] KUDOK, E., MATSUMOTO, T.: "Effects of power control error on system user capacity of DS/CDMA cellular mobile radios", *IEICE Trans. on Communication*, v. E75-B,n. 6, p. 524-529, Jun. 1992.
- [Jak74] JAKES, W. C.: "*Microwave mobile communications*", Piscataway, New Jersey: IEEE Press.
- [Jal90] JALLOUL, L., NANDA, S., e GOODMAN, D.J.: "Packet reservation multiple access over slow and fast fading channels", *Proceedings of the 40th Vehicular Technology Conference (VTC'90)*, Orlando, Florida, Houston, Maio 1990, p. 354-359.
- [Jan95] JANSEN, M. G., PRASDA, R. "Capacity, throughput, and delay analysis of a cellular DS CDMA system with imperfect power control and imperfect sectorization." *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, v. 44, n. 1, p. 67-74, Fev. 1995.
- [Law91] LAW, A. M., KELTON, W. D.: "*Simulation modeling & analysis*" , New York: McGraw-Hill International Editions, 1991, 2^a edição.
- [LeeJ98] LEE, J. S., MILLER, L. E.: "*CDMA systems engineering handbook*", Boston: Artech House, 1998.
- [LeeW86] LEE, W. C. Y.: "Elements of cellular mobile radio system", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, v. 35, n. 2, p. 48-56, Maio. 1986.
- [LeeW89] LEE, W. C. Y.: "Spectrum efficiency in cellular", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, v. 38, n. 2, p. 69-75, Maio. 1989.
- [LeeW91] LEE, W. C. Y.: "Overview of cellular CDMA", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, v. 40, n. 2, p. 291-302, Maio. 1991.

- [LeeW98] LEE, W. C. Y.: "*Mobile communications engineering: theory and applications*", New York: McGraw-Hill, 1998. 2ª edição.
- [Lin83] LIN, S., COSTELLO, D.J.: "*Error control coding: fundamentals and applications*", Londres: Prentice-Hall International, 1983.
- [Lit96] LITVA, J., KWOH-YEUNG LO, T.: "*Digital beamforming in wireless communications*", Boston: Artech House, 1996.
- [Lup90] LUPAS, R., VERDU S.: "Near-Far Resistance of Multiusers Detector in Assynchronous Channels", *IEEE Trans. Commun*, v. 38, n. 4, p. 496-508, Abril 1990.
- [Mor89] MORROW Jr., R. K., LEHNERT, J. S.: "Bit-to-bit error dependence in slotted DS/SSMA packet systems with random signatures sequence", *IEEE Trans. Commun*, v. 37, n. 10, p. 1052-1061, Out. 1989.
- [Mor99] MORROW Jr., R. K.: "A peek into Pandora's box: direct sequence vs frequency hopped spread spectrum", em *Wireless Personal Communications: Emerging Technologies for Enhanced Communications*, Rappaport, T. S. et al (eds), Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999, p.305-314.
- [Nan91] NANDA, S., GOODMAN, D. TIMOR, U.: "Performance of PRMA: a packet voice protocol for cellular system", *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, v. 40, n. 3, p. 584-598, Ago. 1991.
- [New94] NEWSON, P., e HEATH, M. R.: "The capacity of spread-spectrum CDMA system for cellular mobile radio with consideration of system imperfections", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, v. 12, no. 4, p. 673-684, Maio 1994.
- [Oja98] OJANPERÄ, T., PRASAD, R.: "*Wideband CDMA for third generation mobile communications*", Boston: Artech House, 1998.
- [Pad94] PADOVANI, R.: "Reverse link performance of IS-95 based cellular systems", *IEEE Personal Communications*, v. 1, no. 3, p. 28-34, 3º quadrimestre 1994.
- [Pah95] PAHLAVAN, K., LEVESQUE, A. H., "*Wireless information networks*," New York: Wiley, 1995.
- [PAI99] PAIVA, A. P, de MARCA, J. R. B.: "Desempenho de Receptores de Detecção Conjunta em Sistemas TD/CDMA", *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Vitória, 1999, p. 586-591.
- [Pap62] PAPOULIS, A.: "*The Fourier integral and its applications*", New York: McGraw-Hill, 1962.
- [Pap91] PAPOULIS, A., "*Probability, random variables and stochastic processes*", New York: McGraw-Hill, 1991 (3ª edição).
- [Pax95] PAXSON, V., FLOYD, S.: "Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 3, n.3, p. 226-255, Jun. 1995.
- [Peeb93] PEEBLES, P. Z. JR.: "*Probability, random variables and random signals principles*", New York: McGraw-Hill, 1993 (3ª edição).
- [Pic96] PICHNA, R., WANG, Q., "Power control", in *The mobile communication handbook*, Gibson, J. (editor), p. 370-80, Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995.

- [Pra93] PRASAD, R., JANSEN, M. G., KEGEL, A., "Capacity analysis of a cellular direct sequence code division multiple access system with imperfect power control", *IEICE Trans. Commun.*, v. E76-B, pp. 894-904, Ago. 1993.
- [Pra98] PRASAD, R., *Universal wireless personal communications*, Boston: Artech House, 1998.
- [Pra00] PRASAD, R., MOHR, W., KONHÄUSER, W.: "Third generation mobile communication systems," Boston: Artech House, 2000.
- [Pro95] PROAKIS, J. G. *Digital communications*, New York: McGraw-Hill, 1995.
- [Pur77] PURSLEY, M. B.: "Performance evaluation for phase-coded spread spectrum multiple-access communication", *IEEE Trans. Commun.*, v. 25, n. 8, p. 795-799, Ago. 1977.
- [Pur87] PURSLEY, M. B., TAIPALE, D. J.: "Error Probabilities for Spread-Spectrum Packet Radio with Convolutional Codes and Viterbi Decoding", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 35, n. 1, p. 1-12, Jan. 1987.
- [Rap92] RAPPAPORT, T. S., MILSTEIN, L. B.: "Effects of radio propagation path loss on DS-CDMA cellular frequency reuse efficiency for reverse channel", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, v. 41, n. 3, p. 231-242, Ago. 1991.
- [Rap96] RAPPAPORT, T. S.: "*Wireless communications: principles and practice*", Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [Rap99] RAPPAPORT, T. S., e LIBERTI, J. C.: "*Smart antennas for wireless communication*", Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
- [Rhe98] RHEE, M. Y.: "*CDMA Cellular Mobile Communications: Network & Security*", New York: Prentice-Hall, 1998.
- [Rom90] ROM, R., SIDI, M.: "*Multiple access protocols: performance and analysis*", New York: Springer-Verlag, 1991.
- [San97] SANTIVÁÑES, J., de MARCA, R. B.: "D-RAMA: um novo protocolo de acesso determinístico para comunicação sem fio", *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT'87)*, Recife, PE, p. 353-356, 1997.
- [Ske93] SKELLY P., SCHEWARTZ, M., DIXI M.: "A Histogram-Based Model for Video Traffic Behavior in a ATM multiplexer", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 1, no. 4, pp. 446-459, Ago. 1993.
- [Skl97a] SKLAR, B.: "Rayleigh fading channels in mobile digital communication. Part I: characterisation", *IEEE Communication Magazine*, v. 35, n. 9, p. 136-146, Set. 1997.
- [Skl97b] SKLAR, B.: "Rayleigh fading channels in mobile digital communication. Part II: mitigation", *IEEE Communication Magazine*, v. 35, n. 9, p. 136-146, Set. 1997.
- [Sob74] SOBOL, I. M.: "*The Monte Carlo method*", Chicago: The University of Chicago Press, 1974.
- [Sol92] SOLIMAN, S., WHEATLEY, C., e PADOVANI, R. "CDMA reverse link open loop power control", *Proceedings of GLOBECOM 1992 IEEE*, p. 69-73, 1992.
- [Ste96] STEELE, R., LEE, C. C.: "Closed-loop power control in CDMA systems", *IEE Proceedings-Communication*, v. 143, n. 4, p. 231-239, Ago. 1996.

- [Tas83] TASAKA, S.: "Stability and performance of the R_ALOHA packet broadcast system", *IEEE Trans. on Comp.*, v.32, p.717-726, Ago. 1983.
- [Tas86] TASAKA, S.: "Performance analysis of multiple access protocols", Massachusetts: MIT Press, 1986.
- [Tat98] TATIPAULA, M., KHASNABISH, B.: "Multimedia communications networks: technologies and services", Boston: Artech House, 1998.
- [Tra94] TRANTER, W. H, KOSBAR, K. L.: "Simulation of communication systems", *IEEE Communication Magazine*, v. 32, n.7, p. 26-35, Jul. 1994.
- [Uzi97] UZIEL, A., TUMMALA, M.: "Modeling of Low Data Rate Services for mobile ATM", *Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC'97)*, Helsinki, 1997, v.1, p. 194-198.
- [VER95] VERDU, S.: "Adaptive Multiuser Detection", in *CDMA Communications*, Glisic, S. G, Leppänen, P. A. (editores), Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995, p. 97-116.
- [VER98] VERDU, S.: "Multiuser Detection", Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- [Vit79] VITERBI, A. J., OMURA, J. K.: "Principles of digital communication and coding", New York: McGraw-Hill, 1979.
- [Vit92] VITERBI, A. J., PADOVANI, R.: "Implications of mobile cellular CDMA", *IEEE Communication Magazine*, v. 30, n. 12, p. 38-41, Dez. 1992.
- [Vit94a] VITERBI, A. J., VITERBI, A. M., ZEHAVALI, E.: "Other-cell interference in cellular power-controlled CDMA", *IEEE Trans. Commun.*, v. 42, n. 2/3/4, p. 1501-1504, Feb./Mar./Abril 1994.
- [Vit94b] VITERBI, A. J.: "The orthogonal-random waveform dichotomy for digital mobile personal communication", *IEEE Personal Communications*, v. 1, no. 1, p. 18-24, 1^o quadrimestre 1994.
- [Vit95] VITERBI, A. J.: "CDMA: principles of spread spectrum communication", Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1995.
- [Yac99] YACOUB, M. D et al.: "On the high order statistics of the Nakagami-m distribution", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, v. 48, n. 3, p. 790-794, Maio 1999.
- [Yac93] YACOUB, M. D.: "Foundations of mobile radio engineering, " Boca Raton, Florida: CRC Press, 1993.
- [Wan93] WANG, S. W., WANG, I.: "Effects of soft handoff, frequency reuse and non-ideal antenna sectorization on CDMA system capacity", *Proceedings of 43rd Vehicular Technology Conference (VTC'93)*, p. 850-854, Maio 1993.
- [Wan98] WANG, L., WU J., AGHVAMI A. H.: "Performance of CDMA/PRMA protocol with adaptive permission probability control in packet radio networks", *Proceedings of the Vehicular Technology Conference '99 Spring (VTC'99)*, Houston, Texas, 1999.
- [Wan99] WANG, M., WANG, Z. S., LU, W., CHEN, D. R.: "Performance of a joint CDMA/PRMA protocol with heavy-tailed ON/OFF source, " *Wireless Networks*, n. 5, p. 157-162, 1999.

- [Wes98] WESEL, E. H.: *"Wireless multimedia communications: networking video, voice, and data,"* Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1998.
- [Wil93] WILSON, N. D. et al.: "Packet CDMA versus dynamic TDMA for multiple access in a integrated voice/data PCN", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, v. 11, n. 6, p. 870-883, Ago. 1993.
- [Won92] STEELE, R.: "Channel coding" in *Mobile Radio Handbook*, Raymond Steele (ed.), New York: John-Wiley & Sons, 1992.

ANEXO A

CONFIGURAÇÕES DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA

Neste anexo são apresentadas as configurações dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA utilizadas ao longo deste trabalho. Assim, o leitor pode associar de maneira rápida e inequívoca os resultados apresentados com os parâmetros de projeto empregados.

Explica-se a nomenclatura empregada utilizando como exemplo as configurações rotuladas como *FDDG_p7T_q20N20D20* e *TDDG_p7T_q20N20D20*. O primeiro sistema tem as seguintes características: opera em esquema FDD; ganho de processamento (G_p) de 7; período de quadro (T_q) de 20 ms; número de slots por quadro (N) igual a 20; atraso máximo em slots (D) de 20 slots. A segunda configuração possui as seguintes propriedades: opera em esquema TDD; $G_p=7$; $T_q=20$ ms (engloba os enlaces direto e reverso); $N=20$ slots do enlace reverso; $D=20$ slots do enlace reverso. Nota-se que o tipo de detetor de atividade de voz empregado, de dois ou três estados, não influencia nos parâmetros explicitados das configurações descritas neste anexo.

A.1 – Configuração Básica FDDG_p7T_q20N20D20

Duplexação	FDD
Taxa da fonte (terminais de voz)	8 kbps
Período de quadro	20 ms
Número de slots por quadro	20
Atraso máximo dos pacotes de voz	20 slots (20 ms)
Bits de informação por pacote	160 bits
Bits de “overhead” por pacote	69 bits
Código corretor de erro	BCH($n=511, k=229, t=38$)
Ganho de processamento	7
Taxa do canal antes da codificação	229 kbps
Taxa do canal após a codificação	511 ksps
Taxa de chip	3,577 Mcps

Observação: A partir desta configuração básica torna-se possível se definir uma série de configurações, bastando para isso empregar distintos valores para o ganho de processamento, número de slots por quadro e o atraso máximo dos pacotes de voz em slots. Assim, *FDDG_pxT_q20N_yD_z* designa uma configuração que mantém o período de quadro, o código da configuração básica *FDDG_p7T_q20N20D20*. Porém, o ganho de processamento assume o valor de x , enquanto que número de slots por quadro e o atraso máximo dos pacotes de voz em slots podem assumir os valores de y e z slots, respectivamente.

Nota-se que estes comentários são válidos para as demais configurações explicitadas neste anexo.

A.2 – Configuração Básica FDDGp7T_q10N20D20

Duplexação	FDD
Taxa da fonte (terminais de voz)	8 kbps
Período de quadro	10 ms
Número de slots por quadro	20
Atraso máximo dos pacotes de voz	20 slots (10 ms)
Bits de informação por pacote	80 bits
Bits de “overhead” por pacote	35 bits
Código corretor de erros	BCH(n=255,k=115, t=21)
Ganho de processamento	7

A.3 – Configuração Básica FDDGp7T_q5N20D20

Duplexação	FDD
Taxa da fonte (terminais de voz)	8 kbps
Período de quadro	5 ms
Número de slots por quadro	20
Atraso máximo dos pacotes de voz	20 slots (5 ms)
Bits de informação por pacote	40
Bits de “overhead” por pacote	17
Código corretor de erros	BCH(n=127,k=57,t=11)
Ganho de processamento	7

A.4 – Configuração Básica FDDGp7T_q4,6N20D20

Duplexação	FDD
Taxa da fonte (terminais de voz)	8 kbps
Período de quadro	4,615 ms
Número de slots por quadro	20
Atraso máximo dos pacotes de voz	20 slots (4,615 ms)
Bits de informação por pacote	37
Bits de “overhead” por pacote	20
Código corretor de erros	BCH(n=127,k=57, t=11)
Ganho de processamento	7

A.5 Configuração Básica TDDGp7T_q20N20D40

Duplexação	TDD
Taxa da fonte (terminais de voz)	8 kbps
Período de quadro	20 ms
Período do enlace direto (reverso)	10 ms
Número de slots no enlace direto (reverso)	20
Atraso máximo	40 ms
Atraso máximo dos pacotes de voz em slots	40 slots do enlace reverso
Bits de informação por pacote	160 bits
Bits de “overhead” por pacote	69 bits
Código corretor de erros	BCH(n=511,k=229, t=38)
Ganho de processamento	7

A.6 Configuração Básica TDDGp7T_q10N20D40

Taxa da fonte (terminais de voz)	8 kbps
Período de quadro	10 ms
Período do enlace direto (reverso)	5 ms
Número de slots no enlace direto (reverso)	20
Atraso máximo	20 ms
Atraso máximo dos pacotes de voz em slots	40 slots do enlace reverso
Bits de informação por pacote	80 bits
Bits de “overhead” por pacote	35 bits
Código corretor de erros	BCH(n=255,k=115, t=21)
Ganho de processamento	7

A.7 Configuração Básica TDDGp7T_q4,6N20D40

Taxa da fonte (terminais de voz)	8 kbps
Período de quadro	4,615 ms
Período do enlace direto (reverso)	2,3075 ms
Número de slots no enlace direto (reverso)	20
Atraso máximo	9,23 ms
Atraso máximo dos pacotes de voz em slots	40 slots do enlace reverso
Bits de informação por pacote	37 bits
Bits de “overhead” por pacote	20
Código corretor de erros	BCH(n=127,k=57, t=11)
Ganho de processamento	7

A.8 Configuração Básica TDDGp16T_q10N10D20

Duplexação	TDD
Taxa da fonte (terminais de voz)	8 kbps
Período de quadro	10 ms
Período do enlace direto (reverso)	5 ms
Número de slots no enlace direto (reverso)	10
Atraso máximo	20 ms
Atraso máximo dos pacotes de voz em slots	20 slots do enlace reverso
Bits de informação de voz por pacote	80 bits
Bits de “overhead” por pacote de voz	35 bits
Código corretor de erros para pacotes de voz	BCH(n=255,k=115, t=21)
Ganho de processamento para pacotes de voz	16

Observação: Quando se utiliza entrelaçamento entre quadros, o código corretor de erros dos pacotes para transmissão de informação de controle dos terminais de voz é do tipo BCH(n=127,k=50, t=13). Assim, o ganho de processamento destes pacotes é de aproximadamente 32 quando o ganho de processamento dos pacotes de voz é de 16.

ANEXO B

PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE ACESSO PARA O PROTOCOLO CDMA/PRMA

B.1 Introdução

Este anexo contém as funções de acesso do protocolo CDMA/PRMA utilizadas ao longo deste trabalho. Conforme descrito na Seção 2.3, a função de acesso é composta de dois segmentos de reta. Logo, pode ser definida pelos seguintes parâmetros: (i) probabilidade inicial p_{fi} ; (i) a inclinação do primeiro segmento de reta Δ_1 ; (ii) o primeiro ponto de quebra δ_1 ; (iii) a inclinação do segundo segmento de reta Δ_2 ; (iv) segundo ponto de quebra δ_2 .

B.2 Funções de acesso utilizadas no Capítulo 2

Tabela B.2.1 - Funções de acesso para o protocolo CDMA/PRMA com detetor de atividade de voz (DAV) de dois estados: parâmetros otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1,0 e 0,1 %. Valores parametrizados pelo fator de interferência das células vizinhas. Configuração: FDDGp15Tq20N20D20.

Parâmetros	1 %			0,1 %		
	f=0	f=0,37	f=0,749	f=0	f=0,37	f=0,749
Δ_1	0,04/15	0,04/11	0,04/8	0	0,03/10	0,04/8
δ_1	15	11	8	14	10	8
Δ_2	0,1	0,12	0,09	0,095	0,12	0,12
δ_2	17	13	10	16	11	10
M	775	572	450	681	493	390
M _{ot}	786	580	452	700	516	414

Tabela B.2.2 - Funções de acesso para o protocolo CDMA/PRMA com DAV de dois estados: parâmetros otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1,0 e 0,1 %. Valores discriminados pelo fator de interferência das células vizinhas. Configuração: FDDGp31Tq20N20D20.

Parâmetros	P _{perda} =1,0 %			P _{perda} =0,1 %		
	f=0	f=0,37	f=0,749	f=0	f=0,37	f=0,749
$p_{fi}=0,3$						
Δ_1	0,04/33	0,05/24	0,05/19	0,04/31	0,05/24	0,04/18
δ_1	33	24	19	31	24	18
Δ_2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12
δ_2	35	26	21	33	26	20
M	1607	1180	932	1430	1053	831
M _{ot}	1620	1195	936	1460	1085	860

Tabela B.2.3 - Funções de acesso para o protocolo CDMA/PRMA com DAV de dois estados: parâmetros otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1%. Valores parametrizados pelo ganho de processamento, pelo fator de interferências das células vizinhas e pelo número de slots por quadro.

Tabela B.2.3a - Configurações: FDDG $p \times T_q 20N_y D_y$, onde x pode assumir de 7 ou 31; y pode assumir 4, 10, 16 ou 20 slots.

	$G_p=7, f=0$				$G_p=31, f=0$			
N	4	10	16	20	4	10	16	20
P_{ff}	0,6	0,5	0,375	0,3	0,6	0,5	0,3	0,3
Δ_1	0,0	0,1/6	0,075/6	0,007	0,1/33	0,1/33	0,04/33	0,04/33
δ_1	6	6	6	6	33	33	33	33
Δ_2	0,1	0,12	0,11	0,1	0,1	0,14	0,11	0,11
δ_2	8	8	8	8	35	35	35	35
M	65	176	286	358	308	797	1280	1607
M_{ot}	68	180	290	362	315	808	1300	1620
$\Delta = M_{ot} - M$	3	4	4	4	7	11	20	13
Δ / M_{ot}	4,42 %	2,22 %	1,40 %	1,10 %	2,22 %	1,36 %	1,54 %	0,80 %

Tabela B.2.3b - Configurações: FDDG $p15T_q 20N_y D_y$, onde y pode assumir 4, 10, 16 ou 20 slots.

	$G_p=15, f=0$				$G_p=15, f=0,749$			
N	4	10	16	20	4	10	16	20
P_{ff}	0,6	0,5	0,375	0,3	0,6	0,5	0,3	0,3
Δ_1	0,1/15	0,1/15	0,075/15	0,0027	0,1/8	0,1/8	0,04/8	0,005
δ_1	15	15	15	15	8	8	8	8
Δ_2	0,1	0,14	0,1	0,1	0,1	0,14	0,1	0,09
δ_2	17	17	17	17	10	10	10	10
M	146	381	619	775	85	221	355	450
M_{ot}	150	390	629	786	87	225	360	452

Tabela B.2.4 – Parâmetros da função de acesso para o sistema CDMA/PRMA com DAV de dois estados. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1% e discriminados pelo número de slots por quadro e pelo atraso máximo permissível para os pacotes de voz.

Tabela B.2.4a - Configurações: FDDG $p7T_q 20N_y D_z$, onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 20, 30 ou 60 slots.

	$G_p=7, f=0, N=20$			$G_p=7, f=0, N=10$		
Atraso	20 ms	30 ms	60 ms	20 ms	30 ms	60 ms
D	20 slots	30 slots	120 slots	10 slots	15 slots	60 slots
P_{ff}	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
Δ_1	0,007	0,05/6	0,1/6	0,1/6	0,1/6	0,1/6
δ_1	6	6	6	6	6	6
Δ_2	0,1	0,11	0,09	0,12	0,12	0,13
δ_2	8	8	8	8	8	8
M	358	364	368	176	178	181
M_{ot}	362	366	372	180	182	182

Tabela B.2.4b - Configurações: FDDGp15T_q20NyDz, onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 20, 30 ou 60 slots.

<i>Atraso</i>	<i>G_p=15, f=0, N=20</i>			<i>G_p=15, f=0, N=10</i>		
	<i>20 ms</i>	<i>30 ms</i>	<i>60 ms</i>	<i>20 ms</i>	<i>30 ms</i>	<i>60 ms</i>
<i>D</i>	<i>20 slots</i>	<i>30 slots</i>	<i>120 slots</i>	<i>10 slots</i>	<i>15 slots</i>	<i>60 slots</i>
<i>p_f</i>	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
<i>Δ₁</i>	0,04/33	0,07/33	0,07/33	0,1/33	0,1/33	0,1/33
<i>δ₁</i>	33	33	33	33	33	33
<i>Δ₂</i>	0,11	0,11	0,11	0,14	0,15	0,2
<i>δ₂</i>	35	35	35	35	35	35
<i>M</i>	1607	1611	1627	797	800	806
<i>M_{ot}</i>	1620	1622	1633	808	812	813

Tabela B.2.5 – Parâmetros da função de acesso para o sistema CDMA/PRMA com DAV de três estados. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1% e parametrizados pelo ganho de processamento e pelo fator de interferência das células vizinhas.

Tabela B.2.5a – Configurações: FDDGp7T_q20N20D20, onde x pode assumir 7 ou 15 (*p_f*=0,3).

<i>Parâmetros</i>	<i>G_p=7</i>			<i>G_p=15</i>		
	<i>f=0</i>	<i>f=0,37</i>	<i>f=0,749</i>	<i>f=0</i>	<i>f=0,37</i>	<i>f=0,749</i>
<i>Δ₁</i>	0,007	0,008	0,009	0,04/15	0,05/11	0,03/8
<i>δ₁</i>	6	4	3	15	10	8
<i>Δ₂</i>	0,09	0,09	0,1	0,1	0,09	0,09
<i>δ₂</i>	8	6	5	17	12	10
<i>M</i>	385	289	229	863	635	504
<i>M_{ot}</i>	414	309	248	894	665	521

Tabela B.2.5b – Configurações: FDDGp31T_q20N20D20 (*p_f*=0,3).

<i>Parâmetros</i>	<i>f=0</i>	<i>f=0,37</i>	<i>f=0,749</i>
<i>Δ₁</i>	0,04/33	0,04/24	0,04/18
<i>δ₁</i>	33	24	18
<i>Δ₂</i>	0,11	0,12	0,09
<i>δ₂</i>	35	26	20
<i>M</i>	1798	1336	1050
<i>M_{ot}</i>	1885	1368	1077

Tabela B.2.6 - Parâmetros das funções de acesso otimizadas para uma taxa de perda de pacotes de 1% em um sistema CDMA/PRMA unicolor com DAV de três estados. Valores parametrizados pelo ganho de processamento e pelo número de slots por quadro. Configurações: FDDGp T_q 20NyDy, onde y pode assumir 4, 10, 16 ou 20 slots.

$f=0$	$G_p=7$				$G_p=15$			
N	4	10	16	20	4	10	16	20
p_{β}	0,7	0,5	0,375	0,3	0,7	0,45	0,375	0,3
Δ_1	0,0	0,05/6,0	0,05/6,0	0,007	0,1/15	0,045/15	0,075/15	0,04/15
δ_1	6	6	6	6	15	15	15	15
Δ_2	1	0,1	0,11	0,09	0,1	0,11	0,1	0,1
δ_2	8	8	8	8	17	17	17	17
M	69	185	310	385	158	422	687	863
M_{ot}	75	197	325	414	168	438	707	894

Tabela B.2.7 – Parâmetros da função de acesso otimizada para uma taxa de perda de pacotes de 1% em um sistema CDMA/PRMA unicolor com DAV de três estados. Valores discriminados pelo número de slots por quadro e pelo atraso máximo permissível para os pacotes de voz.

Tabela B.2.7a – Configurações: FDDGp7 T_q 20NyDz, onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 10, 15 ou 30 slots para y=10 e 20, 30 ou 60 slots para y=20.

$f=0$	$N=20$			$N=10$		
Atraso (ms)	20 ms	30 ms	60 ms	20 ms	30 ms	60 ms
D (slots)	20 slots	30 slots	60 slots	10 slots	15 slots	30 slots
p_{β}	0,3	0,3	0,3	0,5	0,35	0,3
Δ_1	0,007	0,05/6,0	0,05/6,0	0,05/6,0	0,05/6	0,04/6,0
δ_1	6	6	6	6	6	6
Δ_2	0,09	0,1	0,11	0,1	0,11	0,1
δ_2	8	8	8	8	8	8
M	385	400	408	185	191	199
M_{ot}	414	412	420	197	202	208

Tabela B.2.7b – Configurações: FDDGp15 T_q 20NyDz, onde y pode assumir 10 ou 20 slots; z pode assumir 10, 15 ou 30 slots para y=10 slots e 20, 30 ou 60 slots para y=20 slots.

	$N=20$			$N=10$		
Atraso	20 ms	30 ms	60 ms	20 ms	30 ms	60 ms
D	20 slots	30 slots	60 slots	10 slots	15 slots	30 slots
p_{β}	0,3	0,3	0,3	0,45	0,45	0,3
Δ_1	0,04/15	0,04/15	0,05/15	0,045/15	0,045/15	0,05/15
δ_1	15	15	15	15	15	15
Δ_2	0,1	0,1	0,1	0,11	0,15	0,1
δ_2	17	17	17	17	17	17
M	863	875	879	422	430	440
M_{ot}	894	892	905	438	438	448

Tabela B.2.8 – Funções de acesso para o sistema CDMA/PRMA unicelular com DAV de dois estados. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1% e discriminados pelo período do quadro.

Tabela B.2.8a - Atraso máximo permissível igual ao período de quadro.
Configurações: FDDGp7T_qxN20D20, onde x pode assumir 4,615, 10 ou 20 ms.

<i>Detetor</i>	<i>Dois estados</i>			<i>Três estados</i>		
	<i>4,615 ms</i>	<i>10 ms</i>	<i>20 ms</i>	<i>4,615 ms</i>	<i>10 ms</i>	<i>20 ms</i>
<i>T_q</i>						
<i>P_f</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,05/6	0,04/6	0,007	0,04/6	0,04/6	0,007
<i>δ₁</i>	6	6	6	6	6	6
<i>Δ₂</i>	0,11	0,1	0,1	0,1	0,09	0,09
<i>δ₂</i>	8	8	8	8	8	8
<i>M</i>	350	369	363	388	405	385
<i>M_{ot}</i>	355	367	362	410	416	414

Tabela B.2.8b - Atraso máximo permissível de 20 ms. Configurações: FDDGp7T_qxN20Dy, onde x pode assumir 4,615, 10 ou 20 ms; y pode assumir 87 slots para T_q=4,615 ms, 40 slots para T_q=10 ms ou 20 slots para T_q=20 ms.

<i>Detetor</i>	<i>Dois estados</i>		<i>Três estados</i>	
	<i>4,615 ms</i>	<i>10 ms</i>	<i>4,615 ms</i>	<i>10 ms</i>
<i>T_q</i>				
<i>P_f</i>	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,06/6	0,05/6	0,05/6	0,05/6
<i>δ₁</i>	6	6	6	6
<i>Δ₂</i>	0,11	0,11	0,12	0,11
<i>δ₂</i>	8	8	8	8
<i>M</i>	358	373	410	421
<i>M_{ot}</i>	363	368	418	424

Tabela B.2.9 – Parâmetros da função de acesso do sistema CDMA/PRMA unicelular em função de E_b/N₀. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de ~1%. Configuração: FDDGp7T_q20N20D20, com DAV de dois estados.

<i>E_b/N₀</i>	<i>SGA (IGA)</i>		
	<i>20 dB</i>	<i>16 dB</i>	<i>10 dB</i>
<i>P_f</i>	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,007	0,007	0,05/5
<i>δ₁</i>	6	6	5
<i>Δ₂</i>	0,1	0,11	0,1
<i>δ₂</i>	8	8	7
<i>M</i>	357	350	313
<i>M_{ot}</i>	360	358	315

B.3 Funções de acesso utilizadas no Capítulo 3

Tabela B.3.1 – Valor de K_{α} , otimizado para uma taxa de perda de pacotes de 1%, utilizado na determinação das permissões de acesso pelo critério a-posteriori. Configuração: FDDG_p7T_q20N20D20.

σ_{dB}	0 dB	8 dB			12 dB		
	$N_c=4,9,19$	$N_c=4$	$N_c=9$	$N_c=19$	$N_c=4$	$N_c=9$	$N_c=19$
1 setor	6	4	5	5	1	4	5
3 setores ideal	6	4	5	5	1	4	5
3 setores real	5	3	4	4	1	3	4

Tabela B.3.2 – Parâmetros das funções de acesso para o sistema CDMA/PRMA com DAV de dois estados. Valores otimizados para uma taxa de perda de pacotes de 1% em função de N_c e σ_{dB} . Configuração: FDDG_p15T_q20N20D20.

Tabela B.3.2a – Rede com 19 células.

σ_{dB}	0 dB	5,67 dB		8 dB	
	$N_c=4,9,19$	$N_c=4$	$N_c=9,19$	$N_c=4$	$N_c=9,19$
P_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,00373	0,04/9	0,04/9	0,04/6	0,0041
δ_1	10	9	9	6	9
Δ_2	0,1	0,11	0,105	0,1	0,1
δ_2	12	11	11	8	11
M	533	477	486	317	462
M_{ot}	535	485	491	323	462

Tabela B.3.2b – Interferência externa modelada por um VA chi-quadrada. São também mostrados a média e a variância da VA chi-quadrada, onde os valores estão normalizados pelo número médio de usuários por célula.

σ_{dB}	0 dB	5,67 dB		8 dB	
	$N_c=4,9,19$	$N_c=4$	$N_c=9, 19$	$N_c=4$	$N_c=9, 19$
média	0,416	0,532	0,522	0,788	0,601
variância	0,134	0,198	0,167	2,67	0,198
P_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/10	0,04/9	0,04/9	0,04/4	0,04/9
δ_1	10	9	9	4	9
Δ_2	0,11	0,11	0,105	0,11	0,11
δ_2	12	11	11	6	11
M	529	479	487	228	461
M_{ot}	535	485	491	232	466

Tabela B.3.2c – Interferência externa modelada pelo valor médio. É mostrada a média da interferência externa, onde os valores estão normalizados pelo número médio de usuários por célula.

σ_{dB}	0 dB	5,67 dB		8 dB	
	$N_c=4,9,19$	$N_c=4$	$N_c=9,19$	$N_c=4$	$N_c=9,19$
fator f	0,416	0,532	0,522	0,788	0,601
P_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/11	0,04/9	0,04/9	0,04/8	0,04/9
δ_1	11	10	10	8	9
Δ_2	0,11	0,115	0,115	0,1	0,09
δ_2	13	12	12	10	11
M	554	518	519	442	493
M_{ot}	560	525	526	447	496

Tabela B.3.3 – Parâmetros da função de acesso para o sistema CDMA/PRMA com DAV de dois estados. Valores otimizado para uma taxa de perda de pacotes de 1% em função de N_c e σ_{dB} . Interferência externa modelada por um VA chi-quadrada. São também mostrados a média e a variância da VA chi-quadrada, onde os valores estão normalizados pelo número médio de usuários por célula.

Tabela B.3.3a – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=3$.

σ_{dB}	0 dB		8 dB		12 dB	
	1 setor	3 setores	1 setor	3 setores	1 setor	3 setores
média	0,791	1,054	1,198	1,51	1,150	1,455
variância	0,171	0,244	0,345	0,52	0,371	0,595
P_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,05/8	0,04/7	0,04/6	0,04/5	0,04/6	0,04/5
δ_1	8	7	6	5	6	5
Δ_2	0,11	0,11	0,11	0,1	0,1	0,11
δ_2	11	9	8	7	8	7
M	420	361	333	284	336	286
M_{ot}	425	365	338	290	343	290

Tabela B.3.3b – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=4$.

σ_{dB}	0 dB		8 dB		12 dB	
	1 setor	3 setores	1 setor	3 setores	1 setor	3 setores
média	0,416	0,612	0,629	0,858	0,710	0,945
variância	0,134	0,192	0,201	0,333	0,249	0,408
P_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/10	0,04/9	0,04/9	0,04/7	0,05/8	0,04/7
δ_1	10	9	9	7	8	7
Δ_2	0,11	0,12	0,12	0,1	0,1	0,11
δ_2	12	11	11	9	10	9
M	529	458	453	388	427	365
M_{ot}	535	462	457	392	434	369

Tabela B.3.3c – Expoente da perda de percurso: $\Gamma=5$.

σ_{dB}	0 dB		8 dB		12 dB	
	1 setor	3 setores	1 setor	3 setores	1 setor	3 setores
média	0,290	0,453	0,392	0,586	0,483	0,682
variância	0,111	0,183	0,135	0,245	0,172	0,301
P_f	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/12	0,04/10	0,04/11	0,04/9	0,04/10	0,04/8
δ_1	12	10	11	9	10	8
Δ_2	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11
δ_2	14	12	13	11	12	10
M	573	505	530	457	496	428
M_{ot}	578	514	538	463	500	433

B.4 Funções de acesso utilizadas no Capítulo 4

Tabela B.4.1 – Parâmetros das funções de acesso para sistemas uncelulares CDMA/PRMA configurados para estudar os efeitos do entrelaçamento entre quadros na capacidade. Taxa de perda de pacotes alvo de 1%.

Tabela B.4.1a – Configuração TDDGp7T_qxN20D20 sem entrelaçamento entre quadros.

VAD	2 estados			3 estados		
T_q (ms)	4,615 ms	10 ms	20 ms	4,615 ms	10 ms	20 ms
P_f	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/6	0,04/6	0,04/6	0,05/6	0,05/6	0,04/6
δ_1	6	6	6	6	6	6
Δ_2	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
δ_2	8	8	8	8	8	8
M	349	368	360	389	405	381
M_{ot}	355	364	360	402	421	402

Tabela B.4.1b – Configuração FDDGp7T_qxN20D40 com entrelaçamento entre dois quadros.

Detetor	2 estados			3 estados		
T_q	4,615 ms	10 ms	20 ms	4,615 ms	10 ms	20 ms
P_f	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/6	0,04/6	0,04/6	0,05/6	0,04/6	0,04/6
δ_1	6	6	6	6	6	6
Δ_2	0,12	0,1	0,11	0,12	0,12	0,11
δ_2	8	8	8	8	8	8
M	352	371	361	395	404	368
M_{ot}	356	368	361	404	407	378

Tabela B.4.1c – Configuração TDDGp7T_qxN20D40 com entrelaçamento entre dois quadros.

<i>VAD</i>	<i>2 estados</i>			<i>3 estados</i>		
<i>T_q</i>	<i>4,615 ms</i>	<i>10 ms</i>	<i>20 ms</i>	<i>4,615 ms</i>	<i>10 ms</i>	<i>20 ms</i>
<i>p_f</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,04/6	0,04/6	0,04/6	0,05/6	0,04/6	0,05/6
<i>δ₁</i>	6	6	6	6	6	6
<i>Δ₂</i>	0,12	0,1	0,11	0,12	0,12	0,11
<i>δ₂</i>	8	8	8	8	8	8
<i>M</i>	353	371	360	395	404	366
<i>M_{ot}</i>	357	371	359	397	407	378

Tabela B.4.2 – Parâmetros da função de acesso para sistemas CDMA/PRMA unicelular. Valores otimizados para cada valor do nível de diversidade do canal com desvanecimento Rayleigh. Sistema equipado com DAV de 2 estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1%. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20.**Tabela B.4.2a** - Canal com desvanecimento Rayleigh rápido.

<i>Interferência</i>	<i>Densidade Espectral de Potência</i>				<i>Soma de VAs</i>		
	<i>AWGN</i>	<i>L_c=1</i>	<i>L_c=3</i>	<i>L_c=6</i>	<i>L_c=1</i>	<i>L_c=3</i>	<i>L_c=6</i>
<i>p_f</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,04/17	0,04/4	0,04/11	0,04/13	0,04/5	0,04/11	0,04/14
<i>δ₁</i>	17	4	11	13	4	11	14
<i>Δ₂</i>	0,11	0,11	0,11	0,1	0,11	0,1	0,12
<i>δ₂</i>	19	6	13	15	6	13	16
<i>M</i>	410	128	268	322	133	280	332
<i>M_{ot}</i>	413	129	270	325	131	280	335

Tabela B.4.2b - Canal com desvanecimento Rayleigh lento sem entrelaçamento entre quadros.

<i>Interferência</i>	<i>Densidade Espectral de Potência</i>			<i>Soma de VAs</i>		
	<i>L_c=1</i>	<i>L_c=3</i>	<i>L_c=6</i>	<i>L_c=1</i>	<i>L_c=3</i>	<i>L_c=6</i>
<i>p_f</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,3	0,04/2	0,04/6	0,3	0,05/2	0,04/6
<i>δ₁</i>	1	2	6	1	2	6
<i>Δ₂</i>	—	0,1	0,11	—	0,1	0,11
<i>δ₂</i>	1	4	8	1	4	8
<i>M</i>	8	69	143	9	77	153
<i>M_{ot}</i>	10	71	146	10	78	153

Tabela B.4.2c - Canal com desvanecimento Rayleigh lento com entrelaçamento entre dois quadros.

<i>Interferência</i>	<i>Densidade Espectral de Potência</i>			<i>Soma de VAs</i>		
	$L_c=1$	$L_c=3$	$L_c=6$	$L_c=1$	$L_c=3$	$L_c=6$
P_{β}	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3
Δ_1	0,4	0,05/3	0,04/7	0,4	0,05/4	0,05/8
δ_1	1	3	7	1	4	8
Δ_2	—	0,1	0,09	—	0,11	0,11
δ_2	1	5	9	1	6	10
M	11	100	196	12	104	203
M_{ot}	12	100	193	12	104	203

Tabela B.4.2d - Canal com desvanecimento Rayleigh lento com entrelaçamento entre três quadros.

<i>Interferência</i>	<i>Densidade Espectral de Potência</i>			<i>Soma de VAs</i>		
	$L_c=1$	$L_c=3$	$L_c=6$	$L_c=1$	$L_c=3$	$L_c=6$
P_{β}	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3
Δ_1	0,4	0,04/4	0,05	0,4	0,05/5	0,04/9
δ_1	1	4	9	1	5	9
Δ_2	—	0,1	0,11	—	0,1	0,1
δ_2	1	6	11	1	7	11
M	15	126	222	14	135	233
M_{otm}	16	128	221	15	137	233

Tabela B.4.3 – Parâmetros da função de acesso para sistemas CDMA/PRMA celular ($\Gamma=4$, $\sigma_{dB}=8$). Os valores são otimizados para cada valor do entrelaçamento entre quadros empregado. Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal desvanecimento Rayleigh lento com seis percursos independentes. Interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada com média e variância dados por 0,63 e 0,2, respectivamente. Sistema equipado com DAV de 2 estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1%. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20 ($p_{\beta}=0,3$).

<i>Entrelaçamento</i>	<i>1 quadro</i>	<i>2 quadros</i>	<i>3 quadros</i>
Δ_1	0,04/3	0,04/4	0,04/5
δ_1	3	4	5
Δ_2	0,1	0,1	0,1
δ_2	5	6	7
M	97	127	145
M_{ot}	99	127	146

Tabela B.4.4 – Parâmetros da função de acesso para o protocolo CDMA/PRMA, cujos valores são otimizados para cada número de antenas da ERB. Ambiente unicelular; canal com desvanecimento Rayleigh lento com perfil de potência dado pelo modelo de canal ATDMA. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20 com EE de dois quadros.

Tabela B.4.4a – Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal.

<i>Número de antena na ERB</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
p_{fr}	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,05/2	0,04/6	0,04/7
δ_1	2	6	7
Δ_2	0,1	0,1	0,1
δ_2	4	8	9
M	80	156	198
M_{otm}	79	156	198

Tabela B.4.4b – Número de ramos do receptor RAKE descasado com a diversidade do canal. Sistema com três antenas na ERB.

<i>Diversidade do RAKE de cada antena</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
p_{fr}	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,05	0,05/5	0,04/6	0,04/9
δ_1	1	5	6	7
Δ_2	0,11	0,1	0,1	0,1
δ_2	3	7	8	9
M	51	148	175	190
M_{otm}	55	150	175	190

Tabela B.4.5 – Parâmetros da função de acesso para o protocolo CDMA/PRMA, cujos valores são otimizados para cada valor da figura de desvanecimento m . Ambiente unicelular; canal com desvanecimento Nakagami- m lento com potência média idêntica em todos os seis caminhos. Receptor RAKE casado com a diversidade do canal. Configuração: TDDGp16T_q10N10D20 com EE de dois quadros.

<i>m</i>	<i>0,5</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
p_{fr}	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,05/4	0,05/8	0,05/11	0,04/12
δ_1	4	8	11	12
Δ_2	0,11	0,11	0,11	0,11
δ_2	6	10	13	14
M	105	203	278	310
M_{ot}	105	204	275	308

Tabela B.4.6 – Parâmetros da função de acesso para o protocolo CDMA/PRMA, cujos valores são otimizados para cada canal Rice com desvanecimento lento (perfil de potência de acordo com o modelo ATDMA para pico-células). Ambiente celular, onde a interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada (média e variância normalizadas de 0,63 e 0,2, respectivamente). Configuração: TDDGp32T_q10N10D20 com EE dois quadros. É também mostrada a função de acesso para o canal AWGN.

Tabela B.4.6a – Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal.

	<i>AWGN</i>	<i>L_{ant}=1</i>	<i>L_{ant}=2</i>	<i>L_{ant}=3</i>
<i>P_f</i>	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,04/21	0,05/4	0,05/8	0,05/8
<i>δ₁</i>	21	4	8	8
<i>Δ₂</i>	0,1	0,11	0,11	0,11
<i>δ₂</i>	23	6	10	10
<i>M</i>	548	113	213	270
<i>M_{ot}</i>	555	113	213	270

Tabela B.4.6b – Número de ramos do receptor RAKE diferente da diversidade do canal. ERB com três antenas.

	<i>L_{mrc}=1</i>	<i>L_{mrc}=2</i>	<i>L_{mrc}=3</i>	<i>L_{mrc}=4</i>
<i>P_f</i>	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,05/1	0,05/8	0,05/10	0,05/11
<i>δ₁</i>	1	8	10	11
<i>Δ₂</i>	0,11	0,11	0,11	0,11
<i>δ₂</i>	3	10	12	13
<i>M</i>	57	205	251	266
<i>M_{ot}</i>	58	205	251	264

Tabela B.4.7 – Parâmetros da função de acesso para o protocolo CDMA/PRMA, cujos valores são otimizados para cada canal Rice com desvanecimento lento. O perfil de potência adotado está de acordo com o modelo ATDMA para pico-células, Tab. 4.10. Isto exceto pelo fator K do primeiro caminho, que é modificado com o intuito de se analisar o efeito da potência da linha de visada no desempenho do protocolo. Ambiente celular, onde a interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada (média e variância normalizadas de 0,63 e 0,2, respectivamente). Configuração: TDDGp32T_q10N10D20 com EE de dois quadros.

Tabela B.4.7a – Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal. Fator K da VA Rice igual a +3 dB.

	<i>L_{ant}=1</i>	<i>L_{ant}=2</i>	<i>L_{ant}=3</i>
<i>P_f</i>	0,3	0,3	0,3
<i>Δ₁</i>	0,04/6	0,05/11	0,04/13
<i>δ₁</i>	6	11	13
<i>Δ₂</i>	0,11	0,11	0,11
<i>δ₂</i>	8,0	13	15
<i>M</i>	164	270	319
<i>M_{ot}</i>	164	270	318

Tabela B.4.7b – Número de ramos do receptor RAKE diferente da diversidade do canal. ERB com duas antenas. Fator K da VA Rice igual a +3 dB

	$L_{mrc}=1$	$L_{mrc}=3$	$L_{mrc}=4$
p_{fi}	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/2	0,05/10	0,05/11
δ_1	2	10	11
Δ_2	0,11	0,11	0,11
δ_2	4	12	13
M	80	250	265
M_{ot}	80	249	265

Tabela B.4.7c – Número de ramos do receptor RAKE casado com a diversidade do canal. Fator K da VA Rice igual a +10 dB.

	$L_{ant}=1$	$L_{ant}=2$	$L_{ant}=3$
p_{fi}	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/11	0,04/14	0,04/16
δ_1	11	14	16
Δ_2	0,11	0,11	0,11
δ_2	13	16	18
M	279	354	384
M_{ot}	278	353	384

Tabela B.4.7d – Número de ramos do receptor RAKE diferente da diversidade do canal. ERB com duas antenas. Fator K da VA Rice igual a +10 dB

	$L_{mrc}=1$	$L_{mrc}=2$	$L_{mrc}=3$	$L_{mrc}=4$
p_{fi}	0,3	0,3	3,0	0,3
Δ_1	0,05/7	0,05/12	0,05/14	0,04/14
δ_1	7	12	14	14
Δ_2	0,11	0,11	0,11	0,11
δ_2	9	14,0	16	16
M	187	297	335	350
M_{ot}	187	287	336	348

Tabela B.4.8 – Parâmetros da função de acesso para sistemas CDMA/PRMA unicelular, os quais são otimizados para cada valor do nível de diversidade do canal com desvanecimento plano do tipo Weibull rápido. Sistema equipado com detetores de atividade de voz de 2 estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1%. Configuração: FDDGp7Tq20N20D20.

	$s=1$	$s=2$	$s=3$	$s=4$
p_{fi}	0,4	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,0	0,007	0,001	0,007
δ_1	0,0	2,0	3,0	4,0
Δ_2	—	—	0,15	0,135
δ_2	0,0	2,0	4,0	6,0
M	33	119	205	250
M_{ot}	37	127	220	267

Tabela B.4.9 – Parâmetros das funções de acesso para sistemas unicelular CDMA/PRMA, os quais foram otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não-idealidade no CP. Sistemas equipados com DAV de dois estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1% em sistemas que não empregam entrelaçamento entre quadros.

<i>Configuração</i>	<i>TDDG_p16T_q10N10D20</i>				<i>TDDG_p32T_q10N10D20</i>			
σ_{pc}	0 dB	1 dB	2 dB	3 dB	0 dB	1 dB	2 dB	3 dB
p_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Δ_1	0,04/17	0,04/12	0,04/6	0,04/3	0,04/35	0,04/26	0,04/14	0,04/7
δ_1	17	12	6	3	35	26	14	7
Δ_2	0,11	0,09	0,09	0,11	0,1	0,1	0,1	0,1
δ_2	19	14	8	5	37	28	16	9
M	410	300	166	80	820	596	338	169
M_{ot}	413	301	167	81	820	596	340	170

Tabela B.4.10 – Parâmetros das funções de acesso para sistemas celulares CDMA/PRMA, os quais foram otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não idealidade no CP. Interferência externa modelada por uma VA chi-quadrada com média e variância normalizada fornecidas por 0,63 e 0,2, respectivamente. Sistema equipado com DAV de dois estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1% em sistemas que não empregam entrelaçamento entre quadros.

Tab. B.4.10a – Dez slots por quadro.

<i>Configuração</i>	<i>TDDG_p16T_q10N10D20</i>				<i>TDDG_p32T_q10N10D20</i>			
σ_{pc}	0 dB	1 dB	2 dB	3 dB	0 dB	1 dB	2 dB	3 dB
p_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/9	0,04/7	0,04/4	0,04/1	0,04/21	0,0	0,04/9	0,04/6
δ_1	9	7	4	1	21	15	9	4
Δ_2	0,09	0,1	0,11	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
δ_2	11	9	6	3	23	17	11	6
M	244	184	110	58	499	370	218	118
M_{ot}	246	183	107	58	499	370	220	120

Tab. B.4.10b – Cinco slots por quadro.

<i>Configuração</i>	<i>TDDG_p32T_q10N5D10</i>			
σ_{pc}	0 dB	1 dB	2 dB	3 dB
p_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/21	0,04/16	0,04/9	0,04/5
δ_1	21	16	9	5
Δ_2	0,1	0,1	0,1	0,1
δ_2	23	18	11	7
M	244	181	105	57
M_{om}	246	182	106	55

Tabela B.4.11 – Parâmetros das funções de acesso para sistemas unicelular CDMA/PRMA, os quais foram otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não-idealidade no CP. Sistemas equipados com DAV de dois estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1% em sistemas que empregam entrelaçamento entre quadros.

Tabela B.4.11a – Configuração TDDG_p16T_q10N10D20.

<i>Entrelaçamento</i>	<i>2 quadros</i>			<i>3 quadros</i>		
σ_{pc}	<i>1 dB</i>	<i>2 dB</i>	<i>3 dB</i>	<i>1 dB</i>	<i>2 dB</i>	<i>3 dB</i>
p_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/13	0,04/8	0,04/4	0,04/14	0,04/9	0,04/5
δ_1	13	8	4	14	9	5
Δ_2	0,1	0,1	0,11	0,1	0,1	0,11
δ_2	15	10	6	16	11	7
M	335	214	117	350	240	143
M_{ot}	335	214	119	350	240	145

Tabela B.4.11b – Configuração TDDG_p32T_q10N10D20.

<i>Entrelaçamento</i>	<i>2 quadros</i>			<i>3 quadros</i>		
σ_{pc}	<i>1 dB</i>	<i>2 dB</i>	<i>3 dB</i>	<i>1 dB</i>	<i>2 dB</i>	<i>3 dB</i>
p_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/28	0,04/18	0,04/9	0,04/29	0,05/20	0,05/12
δ_1	28	18	9	29	20	12
Δ_2	0,1	0,11	0,1	0,1	0,11	0,11
δ_2	30	20	11	31	22	14
M	666	430	237	699	483	288
M_{ot}	665	429	240	695	481	288

Tabela B.4.12 – Parâmetros da função de acesso do sistema unicelular CDMA/PRMA otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não-idealidade no CP. Sistema equipado com DAV de dois estados.

Tabela B.4.12a – Taxa de perda de pacotes alvo de 1%.

<i>Configuração</i>	<i>TDDGp16T_q10N10D20</i>				<i>TDDGp32T_q10N10D20</i>			
σ_{pc}	<i>0 dB</i>	<i>1 dB</i>	<i>2 dB</i>	<i>3 dB</i>	<i>0 dB</i>	<i>1 dB</i>	<i>2 dB</i>	<i>3 dB</i>
p_{fi}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/17	0,04/12	0,04/6	0,04/3	0,04/35	0,04/26	0,04/14	0,04/7
δ_1	17	12	6	3	35	26	14	7
Δ_2	0,11	0,1	0,11	0,09	0,1	0,1	0,1	0,1
δ_2	19	14	8	5	37	28	16	9
M	410	300	175	95	820	601	345	185
M_{ot}	413	303	177	97	820	601	345	188

Tabela B.4.12b – Taxa de perda de pacotes alvo de 0,1%.

<i>Configuração</i>	<i>TDDGp16T_q10N10D20</i>				<i>TDDGp32T_q10N10D20</i>			
σ_{pc}	0 dB	1 dB	2 dB	3 dB	0 dB	1 dB	2 dB	3 dB
p_{β}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/15	0,03/10	0,04/4	0	0,04/31	0,04/21	0,04/10	0,04/4
δ_1	15	10	4	1	31	21	10	4
Δ_2	0,1	0,09	0,11	0,09	0,1	0,11	0,11	0,1
δ_2	17	12	6	3	33	23	12	6
M	345	226	105	46	707	475	220	95
M_{ot}	355	240	113	51	715	465	230	107

Tabela B.4.13 – Parâmetros da função de acesso do sistema unicelular CDMA/PRMA otimizados para cada valor do desvio padrão da VA log-normal correlacionada que modela a não-idealidade no CP. Sistema equipado com DAV de voz de dois estados. Taxa de perda de pacotes alvo de 1% em um sistema TDDGp16T_q10N10D20, onde o entrelaçamento têm profundidade de dois quadros. O parâmetro a denota o nível de correlação do modelo de Gudmundson [Gud91].

σ_{pc}	1 dB				2 dB			
a	0,1	0,25	0,5	0,9	0,1	0,25	0,5	0,9
p_{β}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,04/13	0,05/15	0,05/12	0,05/12	0,05/8	0,04/7	0,05/5	0,04/6,0
δ_1	13	13	12	12	8	7	7	6
Δ_2	0,1	0,1	0,1	0,11	0,11	0,1	0,1	0,1
δ_2	15	15	14	14	10	9	9	8
M	333	325	313	300	210	200	190	170
M_{ot}	331	324	310	298	209	198	183	170

B.5 Funções de acesso utilizadas no Capítulo 5

Tabela B.5.1 – Parâmetros da função de acesso do sistema CDMA/PRMA unicelular otimizado para cada valor do desvio padrão da VA log-normal que modela a não-idealidade no controle de potência. Sistema equipado com DAV de dois estados. Configuração: FDDG_p7T_q20N20D20.

σ_{pc}	0 dB	0,5 dB	1 dB	2 dB
p_{β}	0,3	0,3	0,3	0,3
Δ_1	0,007	0,007	0,007	0,007
δ_1	6	5	4	2
Δ_2	0,1	0,1	0,1	0,1
δ_2	8	7	5	3

ANEXO C

CÓDIGOS BCH GERADOS POR ELEMENTOS PRIMITIVOS COM ORDEM MENOR DO QUE 2⁹

Tabela C.1 - Lista de códigos *Bose-Chadhuri-Hocquenghem* (BCH) gerados por elementos primitivos com ordem menor do que 2⁹. Notação: n (tamanho do código); k (número de bits de informação); t (capacidade de correção do código); r (taxa do código).

<i>n</i>	<i>k</i>	<i>t</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>t</i>	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>t</i>	<i>r</i>
7	4	1	0,571	127	29	21	0,228	255	29	47	0,114
15	11	1	0,733		22	23	0,173		21	55	0,0823
	7	2	0,466		15	27	0,118		13	59	0,0510
	5	3	0,333		8	31	0,0630		9	63	0,0353
31	26	1	0,839	255	247	1	0,969	511	502	1	0,982
	21	2	0,677		239	2	0,937		493	2	0,965
	16	3	0,516		231	3	0,906		484	3	0,947
	11	5	0,355		223	4	0,874		475	4	0,929
	6	7	0,193		215	5	0,843		466	5	0,912
63	57	1	0,905		207	6	0,812		457	6	0,894
	51	2	0,809		199	7	0,780		448	7	0,877
	45	3	0,714		191	8	0,749		439	8	0,859
	39	4	0,619		187	9	0,733		430	9	0,841
	36	5	0,571		179	10	0,702		421	10	0,824
	30	6	0,476		171	11	0,671		412	11	0,806
	24	7	0,381		163	12	0,639		403	12	0,789
	18	10	0,285		155	13	0,608		394	13	0,771
	16	11	0,254		147	14	0,576		385	14	0,753
	10	13	0,159		139	15	0,545		376	15	0,736
	7	15	0,111		131	18	0,514		367	16	0,718
					123	19	0,482		358	18	0,701
127	120	1	0,945		115	21	0,451		349	19	0,690
	113	2	0,890		107	22	0,420		340	20	0,665
	106	3	0,835		99	23	0,388		331	21	0,648
	99	4	0,779		91	25	0,357		322	22	0,630
	92	5	0,724		87	26	0,341		313	23	0,612
	85	6	0,669		79	27	0,310		304	25	0,595
	78	7	0,614		71	29	0,278		295	26	0,577
	71	9	0,559		63	30	0,247		286	27	0,560
	64	10	0,504		55	31	0,216		277	28	0,542
	57	11	0,449		47	42	0,184		268	29	0,524
	50	13	0,394		45	43	0,176		259	30	0,507
	43	14	0,339		37	45	0,145		250	31	0,489
	36	15	0,283								

Tabela C.1 – Continuação da lista de códigos *Bose-Chadhuri-Hocquenghem (BCH)* gerados por elementos primitivos com ordem menor do que 2^9 .

<i>n</i>	<i>k</i>	<i>t</i>	<i>r</i>
511	241	36	0,472
	238	37	0,466
	229	38	0,448
	220	39	0,430
	211	41	0,413
	202	42	0,395
	193	43	0,378
	184	45	0,360
	175	46	0,342
	166	47	0,325
	157	51	0,307
	148	53	0,290
	139	54	0,272
	130	55	0,254
	121	58	0,237
	112	59	0,219
	103	61	0,202
	94	62	0,184
	85	63	0,166
	76	85	0,149
	67	87	0,131
	58	91	0,113
	49	93	0,0959
	40	95	0,0783
	31	109	0,0607
	28	111	0,0548
	19	119	0,0372
	10	121	0,0196

ANEXO D

ARTIGOS PUBLICADOS

Durante o transcorrer desta Tese foram publicados onze artigos em revistas internacionais, livros editados, congressos internacionais e simpósios nacionais. Este anexo apresenta alguns destes artigos, selecionados de maneira a permitir uma visão global da problemática elaborada ao longo deste trabalho de Tese:

- HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Capacity loss of CDMA/PRMA systems with imperfect power control loop," *Electronics Letters*, v.34, n.10, p.1020-1022, Maio 1998.
- HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "The performance of CDMA/PRMA for Nakagami-m frequency selective fading channel," *Electronics Letters*, v.35, n.1, p.28-29, Jan. 1999.
- HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Numerical analysis of a joint CDMA/PRMA protocol based on equilibrium point analysis," *Electronics Letters*, vol. 35, n. 24, p.2093-2095, 25th Nov 1999.
- HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "On the capacity of CDMA/PRMA systems," em *Wireless Personal Communications: Emerging Technologies for Enhanced Communications*, Rappaport, T. S. et al (eds), Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999, p.315-326.
- HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "The fading effects on the CDMA/PRMA network performance", *Proc. of the Vehicular Technology Conference '99 Spring (VTC'99)*, Houston, Texas, 1999.
- HOEFEL, R. P. F., de ALMEIDA, C.: "Comparative analysis of CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA medium access schemes for packet transmission for third generation mobile communication systems," in the *Proc. of IEEE 3Gwireless'2000*, Jun. 14-16, 2000, San Francisco, EUA.

CAPACITY LOSS OF CDMA/PRMA SYSTEMS WITH IMPERFECT POWER CONTROL LOOP

Roger Pierre Fabris Hoefel and Celso de Almeida

Departamento de Comunicações

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Universidade Estadual de Campinas

C.P. 6.101 - Campinas - 13.081-970 - S.P. - Brasil

e-mail: roger@decom.fee.unicamp.br, celso@decom.fee.unicamp.br

Indexing Terms: CDMA/PRMA, Packet Radio, Simulation.

We obtain the capacity loss of the joint CDMA/PRMA protocol due to imperfections in the power control loop. We show that the capacity loss percentile is similar to the one observed in switched-circuit DS-CDMA systems. We also show that 3-state vocoders present gain in relation to 2-state vocoders.

Introduction: In this communication we obtain the capacity loss of the direct sequence code-division multiple-access/packet-reservation multiple-access DS-CDMA/PRMA protocol with imperfection in the power control loop. Brand and Aghvami [1] proposed this protocol for the reverse link for third generation mobile communication systems. The capacity loss was obtained using Monte Carlo simulation method for 2 and 3-state vocoders. A subtle modification is suggested for 3-state vocoders access scheme in order to obtain a capacity improvement. Only speech users were considered.

Description of CDMA/PRMA protocol [1]: We are going to use the same parameters as [1]. Time is divided into frames with period of 20 ms and these into slots with 1 ms of duration. The mobile station (MS) channel access is determined by the permission access probabilities that are used to perform a Bernoulli experiment. The base station (BS), obtaining information from the packet headers, calculates the permission access probabilities for the i -th slot in the next frame as a function of the number of users in reservation in the i -th slot of the current frame. When the access is successful, speech users go from the contention to the reservation state. They will stay in this state until the current talkspurt is transmitted. The figure of merit used to analyse this protocol is the number of users supported by the system as a function of the packet loss rate. The packet loss rate is the sum of the packet dropped rate by excessive delay (20 ms) and the packet corrupted rate by excessive multiple-access interference. The processing gain is set to 7. A BCH error-correcting code with parameters (511,229,38) is used, resulting in blocklength equal to 511 bits, 229 information bits, and error-correcting capability of 38 bits. When the speech activity is modelled by a 2-state Markov machine, talkspurts and gaps are assumed to have exponentially distributed mean duration of 1.00 s and 1.35 s, respectively. This yields an approximate voice activity factor α_s of 0.43. When the speech is modelled by a Markov 3-state machine, talkspurts, gaps and minigaps are assumed to have exponentially distributed mean duration of 0.275, 1.35 s, and 0.05, respectively. This results in a voice activity factor of approximately 0.375[2].

Mathematical formulation: The reverse channel interference resulting from the multiple access of a DS-CDMA system is modelled using a Binary Symmetric Channel. Assuming that the interference is Gaussian, the mean bit error probability can be expressed as [1]:

$$P_e \approx Q(\sqrt{\text{SNR}_i}) \quad (1)$$

where $\overline{\text{SNR}_i}$ is the mean signal-to-noise ratio of the i -th user, and $Q(x)$ is the Q -function.

The received power at the BS due to a given MS, when the power control loop is imperfect, can be modelled by a log-normal random variable times the deterministic power P_0 , which is the power received at the BS with perfect power control loop. The standard deviation σ_{dB} of the log-normal variable is in the range of 1 to 2 dB [3].

Neglecting the additive white Gaussian noise, the mean signal-to-noise ratio of the i -th user in a multiple cell system with K distinct users in a given slot can be expressed as:

$$\overline{\text{SNR}_i} = \frac{3G_p P_i}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K P_k + \frac{I}{P_0}} \quad (2)$$

where P_i is the log-normal random variable of the i -th user, G_p is the processing gain, I is the other-cell interference. Brand and Aghvami [1] modelled the ratio of other-cell interference to the nominal power received at the BS as

$$\frac{I}{P_0} = \alpha_s \frac{M}{O} f \quad (3)$$

where α_s denotes the voice activity factor, M is the number of users in the system, O is the number of slots in a frame, and f the mean other-cell interference fraction. We have considered $f=0.37$ for equally loaded cells, and for a path-loss exponent of $\gamma=4$.

The success packet decoding probability is given by

$$Q_E = \sum_{i=0}^t \binom{L}{i} (P_e)^i (1-P_e)^{L-i} \quad (4)$$

where L is blocklength, t is the error correcting capability, and P_e is given by (1)

Simulations: We have obtained the mean number of the packet loss rate as a function of the number of simultaneous conversations using a simulation run of 1000 s. We considered at the central cell, a slot by slot simulation. The estimated number of errors is a random variable with binomial probability density function, where L is the number of independent Bernoulli trials and P_e is the success probability on each trial.

Fig.1 shows the mean number of packet loss rate as a function of the number of simultaneous conversations for 2-state vocoders. This figure is parameterised by the distinct levels of inaccuracies in power control loop. For 0 dB the packet loss rate is in total agreement with [1]. Fig.2 plots the same parameters as Fig.1, but for 3-state vocoders [2]. Just replacing 2-state by 3-state vocoders in the PRMA/CDMA protocol results in capacity loss, although 3-state vocoders present lesser voice activity factor. This is a consequence of the frequent reservation loss in minigap states. Therefore, a change in the protocol must be provided, i.e. a user

must maintain its reservation during minigap states. Indeed, using this approach we can observe a capacity gain, as can be noticed from Fig. 1 and 2, of approximately 8% for $\sigma_{dB}=0$.

The access function parameters control the permission access probability. We used, for the 2-state vocoders, the same parameters as [1]. For the 3-state vocoders, these parameters were heuristically determined for 1% packet loss rate, according to the optimized a-posteriori expectation access criteria applied to 2-state vocoders [1].

Tab. 1 summarizes the capacity loss due to imperfect power control loop in CDMA/PRMA systems for 2 and 3-state vocoders. This Table, for the sake of comparison, also presents the capacity loss analytically determined by Prasad [3] for circuit-switched DS-CDMA systems.

Conclusions: The capacity loss in CDMA/PRMA systems due to inaccuracies in power control loop was investigated. We have concluded, considering only speech users, that the capacity loss is similar to that observed for circuit-switched DS-CDMA systems. We have also concluded that 3-state vocoders allow capacity gain in relation to 2-state vocoders.

Acknowledgments: This work was supported in part by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, and by Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

References

- [1] Brand, A. E. and Aghvami A. H.: 'Performance of a joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication', *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1996, **14**, pp. 1698-1707
- [2] Goodman, D. J. and Wei, X. W.: 'Efficiency of packet reservation multiple access', *IEEE Trans. on Vehic. Technology*, 1991, **40**, pp. 170-176
- [3] Prasad, R., Jansen, M. G. and Kegel, A.: 'Capacity analysis of a cellular direct sequence code division multiple access system with imperfect power control', *IEICE Trans. Commun.*, 1993, **E76-B**, pp. 894-904

Table 1. Capacity loss due imperfection in power control loop, $P_{loss}=1\%$.

σ_{dB}	2-state vocoders		3-state vocoders		Prasad [3]
	M	Capacity Loss [%]	M	Capacity Loss [%]	Capacity Loss [%]
0	263	0.0	284	0.00	0.00
0.5	229	12.92	251	11.61	---
1.0	161	38.78	180	36.61	38.00
2.0	69	73.76	80	70.80	65.00
3.0	28	89.35	33	88.38	80.00

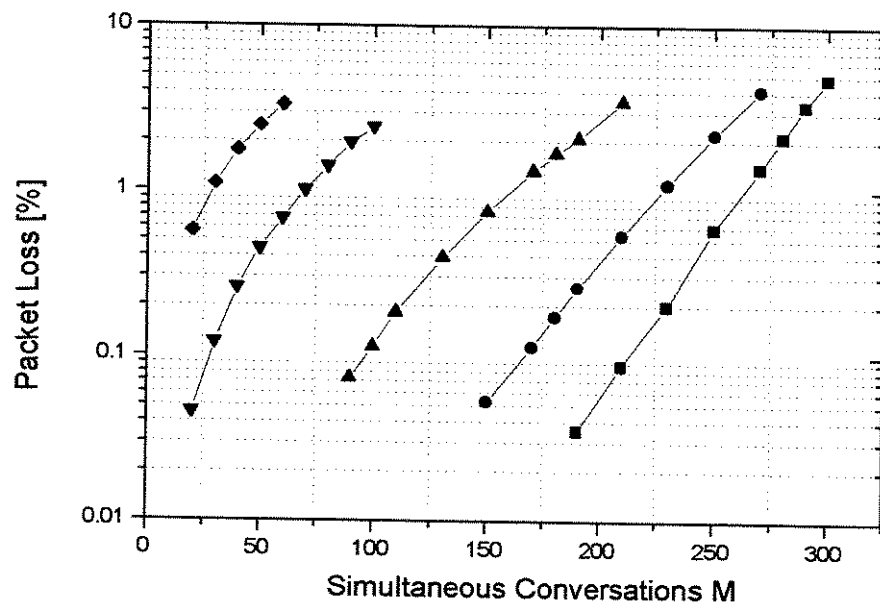


Figure 1. Packet loss rate as a function of the number of simultaneous conversation. Multiple-cell systems with $f=0.37$. Two-state vocoders.

■ $\sigma=0$ dB ● $\sigma=0.5$ dB ▲ $\sigma=1$ dB ▼ $\sigma=2$ dB ◆ $\sigma=3$ dB

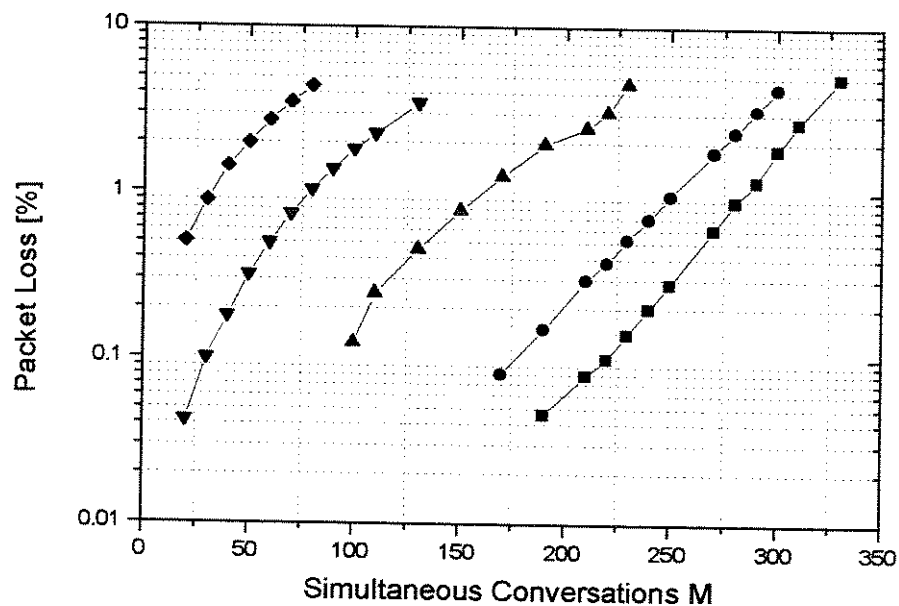


Figure 2. Packet loss rate as a function of the number of simultaneous conversation. Multiple-cell systems with $f=0.37$. Three-state vocoders.

■ $\sigma=0$ dB ● $\sigma=0.5$ dB ▲ $\sigma=1$ dB ▼ $\sigma=2$ dB ◆ $\sigma=3$ dB

THE PERFORMANCE OF CDMA/PRMA PROTOCOL ON NAKAGAMI-m FREQUENCY SELECTIVE FADING CHANNEL

Roger Pierre Fabris Hoefel and Celso de Almeida

Departamento de Comunicações

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Universidade Estadual de Campinas

C.P. 6.101 - Campinas - 13.081-970 - S.P. - Brasil

E-mails: {roger,celso}@decom.fee.unicamp.br

Indexing Terms: CDMA/PRMA, Cellular Packet Radio, Nakagami-m Fading

The performance of the Code-Division Multiple-Access/Packet-Reservation Multiple-Access (CDMA/PRMA) protocol on Nakagami-m frequency selective fading channel is obtained by simulation for mixed voice/data traffic.

Introduction: In the Slotted Random-Access (RA)/CDMA protocol a mobile station (MS) accesses a slot as soon as it has packets to transmit. CDMA systems are interference limited. Therefore, if the channel access is controlled, such that the users variance on the channel is reduced, larger capacity is obtained. Considering this conceptual question, Brand and Aghvami have presented a joint CDMA/PRMA protocol for the reverse link of cellular systems [1].

Fundamentally, the objective is to load the channel with the optimum number of users per slot that satisfies a given required voice packet loss rate, $(P_{\text{loss}})_{\text{req}}$. Pragmatically, the channel access function concept was introduced in [1]. It is a function that maps the MSs number on the channel to the permission access probabilities. At each slot, a new access permission probability is calculated, and broadcasted to the MSs on the direct control channel at the end of the current frame.

In the following analysis, we employ direct-sequence spread spectrum and binary phase shift-keying modulation.

Channel modelling: The multipath radio propagation model considered in this Letter assume that: (a) the errors in successive bits are independent and they occur with same probability; (b) all users have the same number of paths with equal power; (c) a maximum ratio combiner (MRC) receiver matched to the channel diversity is used; (d) the path loss and the slow lognormal shadowing effects are compensated by the power control loop [2].

Modelling Multiple-Access Interference (MAI) as a Flat Power Spectrum Density: The signal-to-interference ratio (SIR) at the j th output branch of a MRC receiver is given by [2]

$$\gamma_{b,j} = \frac{\alpha_j^2 \frac{E_b}{L N_0}}{\frac{K L - 1}{1.5 G_p} \alpha_j^2 \frac{E_b}{L N_0} + 1}, \quad j = 1, 2, \dots, L$$

(1)
UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

where α is supposed to be a Nakagami- m random variable (RV), E_b is the signal energy per bit, N_0 is the one-sided noise spectral density, L is the number of resolvable paths, and G_p is the processing gain.

The SIR characteristic function at the j th output branch of a MRC receiver is given by

$$\Psi_{\gamma_{b,j}}(i\omega) = \left(1 - i\omega \frac{\overline{\gamma_{b,j}}}{m} \right)^{-m}, \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (2)$$

where m is the fading figure and $i = \sqrt{-1}$. If $\gamma_{b,j}$ ($j=1, 2, \dots, L$) are all independent identical distributed RVs, then the SIR probability density function (pdf) at the output of a MRC receiver is of gamma kind, i.e.

$$p(\gamma_b) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(Lm)} \left(\frac{m}{\gamma_b} \right)^{Lm} (\gamma_b)^{Lm-1} \exp\left(-\frac{m\gamma_b}{\overline{\gamma_b}}\right) & \text{if } \gamma_b > 0, m \geq 0.5 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3)$$

where $\Gamma(z)$ is the gamma function.

The mean bit error rate (BER) is obtained by the numerical solution of

$$\overline{P_e} = \int_0^\infty Q(\sqrt{2\gamma_b}) p(\gamma_b) d\gamma_b \quad (4)$$

where $\gamma_b = \sum_{j=1}^L \gamma_{b,j}$, and $Q(x)$ is the Q-function.

Modelling MAI as a Sum of RVs: Using the concept of conditional expected value as a RV, then the instantaneous SIR per bit at each branch of a MRC receiver is given by

$$E[\gamma_{bi,j} / \alpha_{1,1}, \dots, \alpha_{1,L}, \dots, \alpha_{K,L}] = \frac{\alpha_{i,j}^2 \frac{E_b}{L N_0}}{\frac{1}{1.5G_p} \sum_{k=1}^K \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^L \alpha_{k,n}^2 \frac{E_b}{L N_0} + 1}, \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

The average BER can be obtained using the Monte Carlo method in the solution of

$$\overline{P_e} = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty Q\left(\sqrt{2 \cdot \sum_{j=1}^L E[\gamma_{bi,j} / \alpha_1, \dots, \alpha_K]}\right) p(\alpha_1, \dots, \alpha_K) d\alpha_1 \dots d\alpha_K \quad (6)$$

Simulation: The same parameters are used as in [1]. The frame period, comprising of 20 slots, is equal to 20 ms. The processing gain is set to 7. A BCH block code with parameters (511,229,38) is used. The voice activity is modelled by a 2 or 3-state Markov machine with activity factor of approximately 0.43 and 0.38, respectively. Random data terminals transmit at the rate of 3400 bps, which is the net rate of 2-state vocoders. The E_b/N_0 was set to 20 dB, that is, the thermal noise can be neglected. We considered a slot by slot simulation with a communication time of 1000 s. The packet loss rate is equal to the sum of the dropped packet rate due to excessive delay (20 ms), and the corrupted packet rate. The estimated number of errors is a RV with binomial pdf, i.e.

$$b(n, N, \overline{P_e}) = \sum_{k=0}^N \binom{N}{n} \left(\overline{P_e} \right)^n \left(1 - \overline{P_e} \right)^{N-n} \delta(n-k), \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (7)$$

where N is blocklength, $\overline{P_e}$ is the success probability on each Bernoulli trial, and $\delta(x)$ is the Dirac delta function. The mean BER can be obtained using a table look-up procedure, where a table maps the number of the users on the channel with the mean BER. This table can be obtained using (4) or (6).

Tab. 1 shows comparative results about the performance of CDMA/PRMA and RA/CDMA systems for voice-only traffic. A model that considers the MAI as a density spectral (labelled model I), and a model that uses the concept of conditional expected value as a RV (labelled model II) were used. The access permission probabilities were determined employing the a-posteriori criteria [1] applied to each channel with $(P_{\text{loss}})_{\text{req}}=1\%$. As a consequence of the central limit theorem both models converge to the same capacity loss, when the fading is less severe. The CDMA/PRMA and RA/CDMA systems support 362 users and 202, respectively, for the AWGN channel [1].

In the following analysis, the access function was heuristically optimized for each case, using the a-posteriori criteria as a benchmark, with $(P_{\text{loss}})_{\text{req}}=1\%$. In spite of higher complexity, the mean BER was obtained using model II. Fig. 1 shows for voice-only traffic the CDMA/PRMA and RA/CDMA performance on Rayleigh frequency selective fading channels ($m=1$). Fig. 2 shows the number of voice users, for 2 and 3-state vocoders [3], versus the number of data terminals for the CDMA/PRMA protocol. The same figure also shows the mean access time of data packets. The traffic load supported by the system had to satisfy the restrictions on buffer stability (lower-right corner) and voice packet loss rate less than 2% (upper-left corner). A 200-packet size first-in first-out buffer and the selective automatic repeated request retransmission police are used. The results for 2-state vocoders on AWGN channel are in agreement with the ones presented in [1]. *Conclusions:* First, we have presented and compared distinct models for the selective frequency selective fading channel. Then, we have investigated the performance of CDMA/PRMA and RA/CDMA protocols on this channel. It was shown that CDMA/PRMA allows significant capacity gain in relation to RA/CDMA.

7 October 1998

Acknowledgments: This work was supported in part by Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

References

- 1 BRAND, A. E. and AGHVAMI A. H.: 'Performance of a joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication', IEEE J. Select. Areas Commun., 1996, vol.14, 9, pp. 1698-1707
- 2 PAHLAVAN, K., and LEVESQUE, A. H.: 'Wireless information networks' (Wiley Interscience, New York, 1995)
- 3 HOEFEL, R. P. F. and de ALMEIDA, C.: 'Capacity loss of CDMA/PRMA systems with imperfect power control loop', Eletronics Letters, vol. 34, 10, May 1998, pp. 1020-1022

Table 1: Capacity loss due to Nakagami-m frequency selective fading channel with $L=3$.

m	Capacity Loss (%), $P_{\text{loss}}=1\%$			
	CDMA/PRMA		RA/CDMA	
	Model I	Model II	Model I	Model II
0.5	55.0	51.6	70.3	63.9
1.0	35.3	29.3	45.5	40.1
2.0	22.1	18.5	30.7	26.7
2.5	17.1	15.5	25.7	24.8

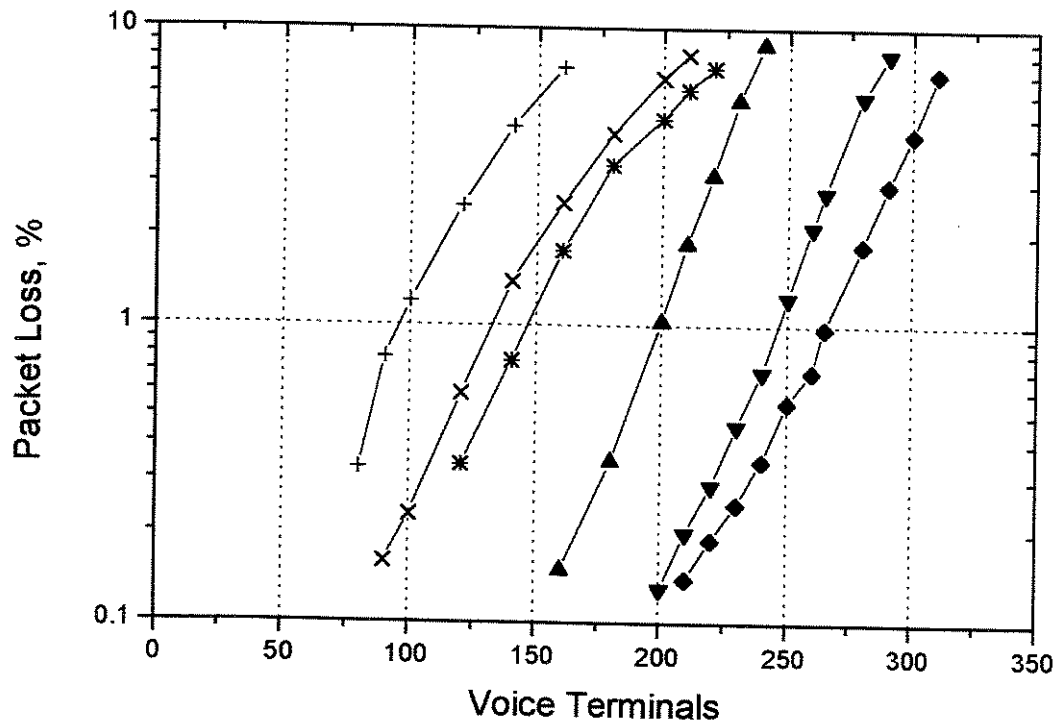


Fig. 1 Packet loss rate versus voice terminals for CDMA/PRMA and RA/CDMA on Rayleigh fading.

+ RA/CDMA: $L=2$ X RA/CDMA: $L=4$ * RA/CDMA: $L=6$ ▲ CDMA/PRMA: $L=2$ ▼ CDMA/PRMA: $L=4$ ◆ CDMA/PRMA: $L=6$

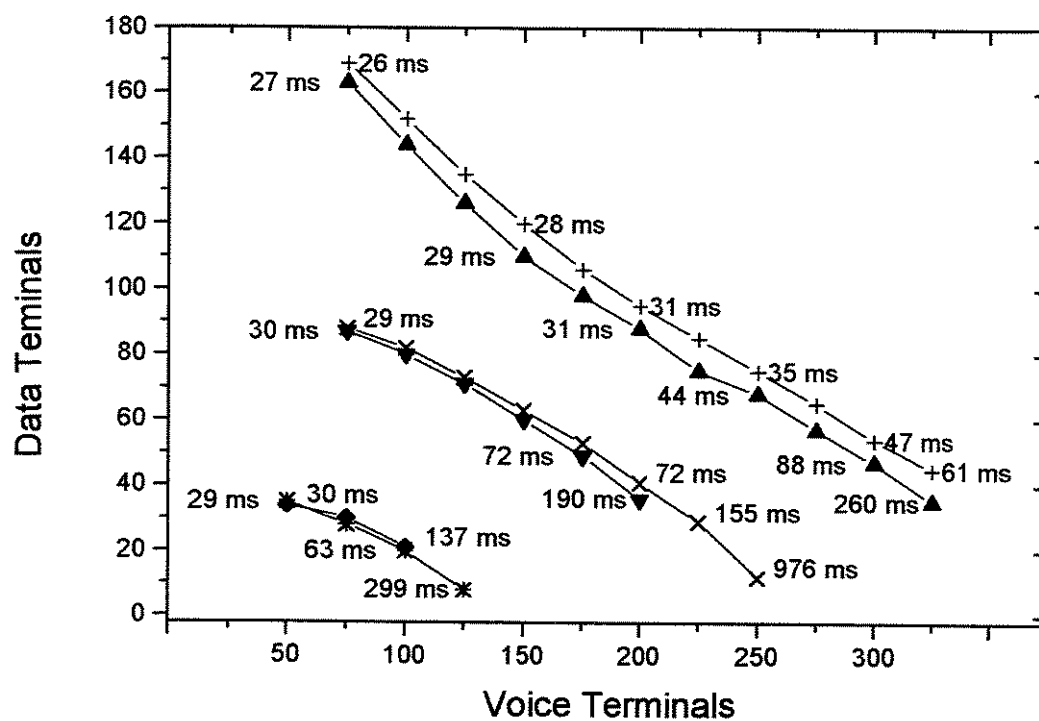


Fig. 2 Data terminals versus voice terminals for CDMA/PRMA system.

2-state vocoders:

▲ AWGN channel

▼ $m=1, L=3$

◆ $m=1, L=1$

3-state vocoders:

+ AWGN channel

X $m=1, L=3$

* $m=1, L=1$

Numerical analysis of a joint CDMA/PRMA protocol based on equilibrium point analysis

Roger Pierre Fabris Hoefel and Celso de Almeida

Departamento de Comunicações

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Universidade Estadual de Campinas

C.P. 6.101 - Campinas - 13.081-970 - S.P. - Brasil

E-mails: {roger,celso}@decom.fee.unicamp.br

Indexing Terms: CDMA/PRMA, slotted ALOHA CDMA, PRMA, CDMA Cellular Packets

Numerical expressions to assess the performance of a joint direct sequence Code Division Multiple Access/Packet Reservation Multiple Access (CDMA/PRMA) protocol are presented. Simulation of CDMA/PRMA systems with narrowbeam antennas is also applied to support the proposed technique.

Introduction: CDMA/PRMA protocol is a hybrid multiple-access technique that combines time-division, code-division and ALOHA reservation concepts [1]. Simulation analysis for distinct operational conditions have shown superior performance in relation to the slotted CDMA/ALOHA protocol [1-3], where terminals access the channel independently of its state. In this letter a speech terminal model is proposed based on equilibrium point analysis (EPA). This leads to numerical expressions for performance evaluation of the CDMA/PRMA protocol.

CDMA/PRMA Speech Terminal Model: The medium access time slot has a duration of τ seconds. The speech detector output is modelled by a 2-state (talk and silent) Markov machine [1]. The transition probability from talk to silent, and vice-versa, is given by $\gamma=1-\exp(-\tau/t_1)$ and $\sigma=1-\exp(-\tau/t_2)$, respectively. It is assumed that talkspurts, t_1 , and gaps, t_2 , have mean duration of 1 and 1.35 s, respectively.

The CDMA/PRMA speech terminal state machine is shown in Fig. 1. The transition to the access state, ACS, from the silent state, SIL, occurs with probability σ . The terminal returns to the state SIL if its talkspurts ends before obtaining a reservation. It goes to the state CON, when it gets permission to access the channel. It is supposed that the acknowledgement from the base station is available to the mobile stations (MSs) prior to the next slot. Therefore, a MS that receives an acknowledgement goes to the reservation state, RES. Otherwise, it returns to the state ACS in next slot. Terminals that do not obtain a reservation in a pre-established time period have their packets dropped. Notice that a MS in the state RES transmits one fixed length packet per frame. So the chain of RES states models one frame period, T_f , which is composed of N time slots. The MS in the state RES_0 goes to the state SIL if its talkspurt ends in the last frame. This flow occurs with probability $\gamma_f=1-(1-\gamma)^N$. The following equations can be obtained from the state diagram:

$$r\gamma_f + a\gamma = s\sigma \quad (1)$$

$$a(1-\gamma)p_s(r) = c \quad (2)$$

$$cQ_E(r+c) = r\gamma_f \quad (3)$$

$$s + a + c + rN = M \quad (4)$$

$$r_0 = r_1 = \dots = r_{N-1} = r \quad (5)$$

where s , a , c , r are real numbers that denote the equilibrium value of the state variables SIL, ACS, CON and RES, respectively, and M is the number of MSs. The channel access function, $p_s(r)$, maps the number of users in state RES to the permission access probabilities to be used in the next frame. The shape of $p_s(r)$ consists of two line segments defined by the initial probability p_i and the inclination and breakpoint of the first and second line segment Δ_1 , δ_1 , Δ_2 and δ_2 , respectively [1]. Assuming hard-decision decoding, then the packet success probability is given by

$$Q_E(r+c) = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (P_e)^i (1-P_e)^{n-i} \quad (6)$$

where n is the linear block code length and t is the error-correcting capability. Supposing perfect power control in a multipath-free environment, it can be shown that the average bit error rate for the uplink of a BPSK CDMA interference limited system employing a directive beam antenna is given by [4]

$$P_e \approx Q \left(\sqrt{\frac{3 G_p D_{ant}}{(r+c)(1+f)}} \right) \quad (7)$$

where $Q(x)$ is the Gaussian Q-function, G_p is the processing gain, D_{ant} is the directivity of the BS antenna ($D_{ant}=5.1$ dB for a power pattern with 30° beamwidth and a -6 dB sidelobe level [4]), and f is the normalised average intercell interference fraction ($f \approx 0.6$ for 2 tiers of hexagonal interfering cells in a log-linear path-loss environment with a propagation exponent of 4 and log-normal shadowing with standard deviation of 8 dB [2]).

Performance analysis: The packet loss rate is equal to the sum of corrupted, P_{cp} , and dropped packet rate, P_{dp} , due to multiple access interference (MAI) and excessive delay, respectively. In the nominal operation region, we observe that it is reasonable to suppose that the maximum instantaneous number of users in the state RES, R , with statistical relevance is given by δ_2+1 (the permission access probability is small for $R=\delta_2$ and zero for $R>\delta_2+1$). The terminals access the channel independently. Then, it is possible to model the instantaneous number of users per slot in the state RES by a binomial probability density function, $\theta_R(R)$, with support upper bounded by δ_2+1 and with mean given by the equilibrium value r . The mean packet loss rate due to MAI can be obtained by averaging the conditional corrupted packet loss probability with respect to $\theta_R(R)$, i.e.

$$\overline{P_{cp}} \approx \sum_{R=1}^{\delta_2+1} \binom{\delta_2+1}{R} \left(\frac{r}{\delta_2+1} \right)^R \left(1 - \frac{r}{\delta_2+1} \right)^{\delta_2+1-R} [1 - Q_E(R+c)] \quad (8)$$

where the number of users in the state CON is modelled by its equilibrium value c .

From the state diagram, the probability that a MS stays in the state ACS is given by

$$v(R) = 1 - (1-\gamma)p_s(R)Q_E(R+c) \quad (9)$$

where it is appropriate to approximate $p_s(R)$ by its mean value $c/a(1-\gamma)$ on the nominal operation region (see eqn. 2). Therefore, the conditional packet dropping probability, using the derivation procedure described in [5, eqn. 67-76], is given by

$$P_{dp}(v) = \gamma_f \left\{ \frac{v^D (1-\gamma_f)^{B-1}}{1-v^N} \left(1 - \frac{\gamma_f [1-(1-\gamma_f)v^{2N}]}{[1-(1-\gamma_f)v^N]^2} \right) + \frac{\gamma_f v^N}{[1-(1-\gamma_f)v^N]^2} \right\} \quad (10)$$

where it is assumed that a MS drops a packet after a delay longer than D slots (D is supposed to be a multiple of the buffer size B). Notice that we can use the same expression derived for the PRMA protocol [5] because, in this case, the difference between both protocols is reduced to the events needed to obtain a reservation. Finally, the mean packet dropping probability can be obtained by

$$\overline{P_{dp}} \approx \sum_{R=0}^{\delta_2+1} P_{dp}(v) \theta_R(R) \quad (11)$$

Numerical and simulation results: We use the design parameters proposed in [1], i.e. $T_f=20$ ms, $N=D=B=20$ slots, and a BCH ($n=511, k=160, t=38$) block code. We set $p_i=0.3$ and $\Delta_1=0.04/\delta_1$ in all access functions, which were optimised for a packet loss rate of 1%. Fig. 2 shows results for CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA systems with narrowbeam antennas. The access functions parameters employed are: (i) $\delta_1=24$, $\Delta_2=0.1$ and $\delta_2=26$ for $f=0$, and (ii) $\delta_1=15$, $\Delta_2=0.11$ and $\delta_2=17$ for $f=0.6$. Notice that the CDMA/PRMA access mechanism controls the intracell interference. This explain the capacity decrease in relation to the CDMA/ALOHA protocol, when intercell interference effects are considered. The first and second lines of Tab. 1 show numerical and simulation results for the conditions of Fig. 1. The other lines show results of CDMA/PRMA systems with omnidirectional antennas. In these cases we have: i) $\delta_1=3$, $\Delta_2=0.09$ and $\delta_2=5$ for $G_p=7$; ii) $\delta_1=20$, $\Delta_2=0.09$ and $\delta_2=22$ for $G_p=31$. The number of MSs supported by the CDMA/ALOHA protocol is 144 and 881 when the processing gain is set to 7 and 31, respectively. Therefore, with the increase of processing gain, the number of MSs in the slotted CDMA/ALOHA grows at a faster rate than that corresponding to the CDMA/PRMA protocol, due to the reduction on the channel load variance (consequence of the law of large numbers). Finally, we note that the simulation results support the developed numerical expressions (see Tab. 2).

September 1999.

References

- 1 BRAND, A. E. and AGHVAMI A. H.: 'Performance of a joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication', *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1996, 14, (9), pp. 1698-1707.
- 2 HOEFEL, R. P. F. and de ALMEIDA, C.: 'The fading effects on the CDMA/PRMA network performance,' in *Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC '99 Spring)*, 1999, Houston, Texas.
- 3 HOEFEL, R. P. F. and de ALMEIDA, C.: 'The performance of CDMA/PRMA for Nakagami-m frequency selective fading channel,' *Electronics Letters*, 1999, 35, (1), pp.28-29.

- 4 LIBERTI Jr., J. C., RAPPAPORT, T. S.: 'Analytical results for capacity improvements in CDMA,' *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1994, 43, (3), pp. 680-690.
- 5 NANDA, S., GOODMAN, D. J. and TIMOR, U: 'Performance of PRMA: a packet voice protocol for cellular systems,' *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1991, 40, (3), pp. 584-598.

Tab. 1: Numerical and simulation results for the CDMA/PRMA protocol: $P_{\text{loss}} \cong 1\%$.

G_p	f	D_{ant}	Numerical			Simulation		
			M	P_{cp}	P_{dp}	M	P_{cp}	P_{dp}
		<i>dB</i>	%	%	%	%	%	%
7	0	5.1	1191	0.81	0.13	1180	0.78	0.17
7	0.6	5.1	746	0.96	0.06	746	0.86	0.12
7	0.6	0	233	0.61	0.39	230	0.60	0.36
31	0.6	0	1020	0.79	0.20	1019	0.71	0.28

Table 2: Equilibrium points obtained using EPA and simulation approaches.

M	EPA				Simulation			
	s	a	c	r	s	a	c	r
233	133.25	1.12	0.10	4.92	133.95	1.06	0.10	4.87
1020	583.33	3.79	0.43	21.62	586.75	3.78	0.44	21.45

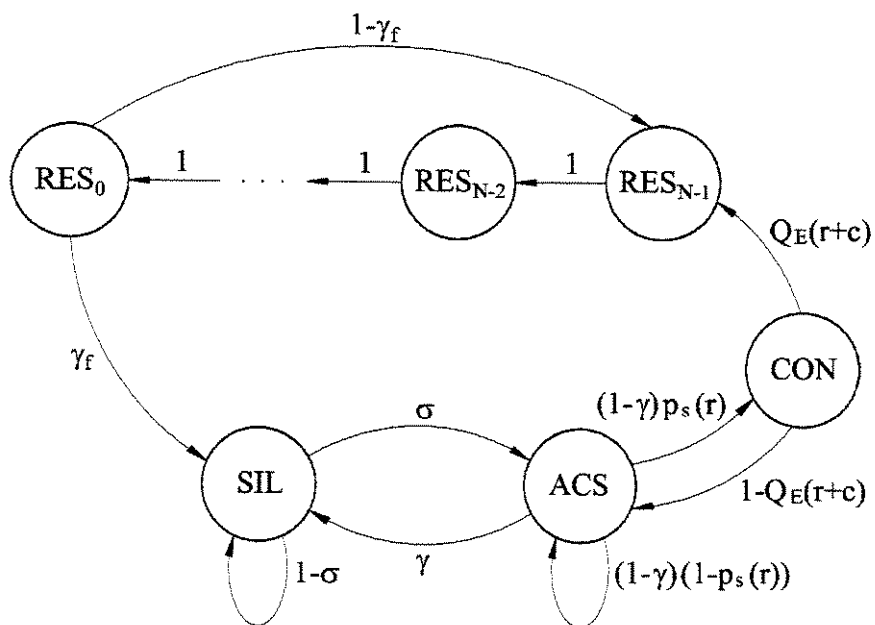


Fig. 1: CDMA/PRMA speech terminal state diagram.

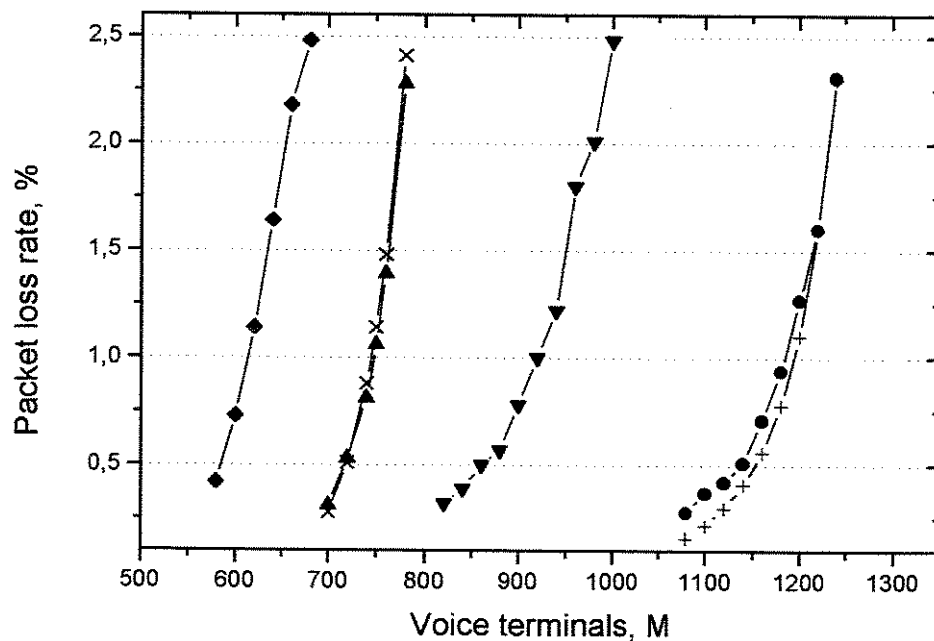


Fig. 2: Packet loss rate versus voice terminals for CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA systems with $G_p=7$ and $D_{ant}=5.1$ dB. Simulation points are indicated by geometric figures.

- $\bullet +$ CDMA/PRMA: $f=0.0$
- $\blacktriangle X$ CDMA/PRMA: $f=0.6$
- $\blacktriangledown$ CDMA/ALOHA: $f=0.0$
- $\blacklozenge$ CDMA/ALOHA: $f=0.6$

On the Capacity of CDMA/PRMA Systems

Roger Pierre Fabris Hoefel and Celso de Almeida

Departamento de Comunicações

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Universidade Estadual de Campinas

C.P. 6.101 - Campinas - 13.081-970 - S.P. - Brasil

E-mail: roger@decom.fee.unicamp.br, celso@decom.fee.unicamp.br

Abstract

In this article we are going to obtain the performance of the CDMA/PRMA protocol in circumstances not analyzed in [1]. First, we are going to analyze the capacity loss due to imperfections in the power control loop. We are going to consider single and multiple-cell environments. Second, we are going to analyze the effects of the Rayleigh fading in the system capacity. We are also going to analyze the performance of CDMA/PRMA with three-state vocoders. A subtle modification is suggested for the three-state vocoders access scheme in order to obtain a capacity improvement.

1. Introduction

Pioneer works of Goodman [2], [3] have explored the characteristics of Packet-Reservation Multiple-Access/Time-Division Multiple-Access (PRMA/TDMA) aiming voice, data and video packet transmission in the reverse link of mobile communication systems. Brand and Aghvami [1] have presented a joint Code-Division Multiple-Access/ Packet-Reservation Multiple-Access (CDMA/PRMA) protocol intended to be applied to the reverse link of third generation mobile communication systems. This approach has shown capacity gain with relation to the random access (RA) DS-CDMA (Direct Sequence-CDMA) protocol [4]. Section 2 presents a brief description of the CDMA/PRMA protocol, that is also known as Joint Control Protocol (JCP). Section 3 presents the uplink modeling. Section 4 presents the performance of CDMA/PRMA systems in distinct operational conditions, as inaccuracies in the power control loop, Rayleigh fading, single and multiple cell environments, and distinct multimedia traffic profile. Finally, section 5 presents the conclusions.

2. CDMA/PRMA Protocol Description

Speech packets are classified as periodic, once the channel access was obtained it was maintained until the end of a current talkspurt. Data packets can have periodic or random access. In the first case, they are treated as speech, while in the second they always work in the contention mode. Video packets are classified as continuous, that is, they are in the permanent reservation mode.

Time is partitioned into frames, and frames into slots. The frame period is equal to one speech segment so it is enough for a speech user to access just one slot per frame. The mobile stations (MS) access is governed

UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

SEÇÃO CIRCULANTE

by the access permission probability that is sent by the base station (BS). The BS can calculate the access permission probability of the i -th slot of the next frame based on the number of periodic users of the i -th slot of the current frame, by observing the header of the decoded packets. For each slot a new access probability is calculated, and these probabilities are broadcasted to the MSs.

The figure of merit used to measure the performance of this protocol in voice-only traffic condition is the number of speech users supported by the system, for a given packet loss rate P_{loss} . The packet loss rate is equal to the sum of the dropped packet rate by excessive delay, and the corrupted packet rate by excessive interference. Speech packets that do not have successful access in any slot in a pre-determined time interval (20 ms) are dropped. Video and data packets work in the Automatic Repeated Request mode. For mixed data/voice traffic condition the analysis is based on the number of supported users that satisfy the maximum permissible delay. In this case, the speech users have to satisfy a given restriction in the voice packet loss rate.

This paper uses the same design parameters of Brand [1], as described in Tab. 1, exactly to do a comparison with the results obtained there. The processing gain used is equal to 7 (R_c/R_{ec}). It is used a BCH error correcting code with parameters (511,229,38), that is, length equal to 511 bits, 229 information bits, and error-correcting capability of 38 bits. The speech is modeled as a Markov 2-state machine, composed of talkspurts and gaps. The talkspurts and gaps are assumed to have exponentially distributed duration with mean of 1.00 s, and 1.35 s, respectively. This yields a voice activity factor of $\alpha_s=0.43$.

Random data terminals transmit at the rate of 3400 bps, which is equal to the net rate of two-state vocoders. Video terminals transmit at rate of 144 kbps. The maximum rate in the continuous mode is of 160 kbps. Therefore, it is possible to retransmit the corrupted video packets.

Data and video terminals use first-in first-out buffers that can store up to 200 packets. The packets are discarded after the acknowledgment of the successful transmission. The system is said to be stable, if none of the terminal buffers overflow.

For comparison reasons we also implementation the Random Access protocol. In this protocol, the terminal access a slot as soon as they have packets to transmit.

Table 1. Design parameters for the joint CDMA/PRMA protocol [1].

<i>Definition</i>	<i>Notation</i>	<i>Values</i>
CDMA Channel Rate	R_c	3.577 Mbps
PRMA Channel Rate after coding	R_{ec}	511 kbps
PRMA Channel Rate before coding	R_p	229 kbps
Source Rate (Voice Terminal)	R_s	8 kbps
Mean Source Rate (Data Terminal)	R_d	3.4 kbps
Mean Source Rate (Video Terminal)	R_v	144 kbps
Frame Duration	T_f	20 ms
Slots per Frame	O	20

3 Uplink Channel Modeling

This paper deals with the medium access of the reverse link of a mobile communication system. However, it considers packets as the basic unit of transmission. Therefore, we are just interested with aspects of the link layer of the Open System Interconnection Reference Model. The medium access control is implemented by the specific protocol, that is, JCP or RA protocol. The error control is implemented by the the packet decoding success probability

$$Q_E = \sum_{i=0}^t \binom{N}{i} (P_e)^i (1 - P_e)^{N-i} \quad (1)$$

where N is the block code length, t is the error-correcting capability and P_e is the bit error probability that depends on the model used for the radio channel.

3.1 Imperfect Power Control Loop

Brand and Aghvami used the standard Gaussian approximation (SGA) to determine the bit error rate (BER) [1]. Assuming that the multiple access interference (MAI) is Gaussian, we can express the mean BER for the Binary Phase-Shift Keying (BPSK) modulation as [5]

$$P_{e,i} = Q(\sqrt{\overline{\text{SNR}}_i}) \quad (2)$$

where $Q(x)$ is the Q-function, and $\overline{\text{SNR}}_i$ is the mean signal-to-noise ratio of the i -th user. In a cellular system with K distinct users in the target cell and N_c neighbor cells with K_n active users each, the mean SNR of the i th user is given by

$$\overline{\text{SNR}}_i = \frac{P_i}{(3G_p)^{-1} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K P_k + \sum_{n=1}^{N_c} \sum_{k=1}^{K_n} P_{k,n} \right)} \quad (3)$$

where P_k is the received power at the target BS due to the k -th user, G_p is the processing gain, $P_{k,n}$ is the power arriving to the same BS due to the k -th MS of the n -th cell. Thermal noise is considered negligible.

Brand and Aghvami paper has considered perfect power control in an AWGN channel. In this article, the power received at the BS due to any user is modeled as a log-normal random variable [11]. Inaccuracies in the power control loop are modeled by a standard deviation between 1 and 2 dB. We considered that the mean power received at the BS maintains constant at each slot. It can be justified by the fact that shadowing not change significantly for distances of up to 40λ [7], where λ is the wavelength.

For voice-only traffic, the other-cell interference ratio to the nominal power received at the BS is modeled as

$$\frac{I}{P_0} = \alpha_s \frac{M_s}{O} f \quad (4)$$

where α_s denotes the voice activity factor, M_s is the number of voice terminals in the system, O is the number of slots in a frame and f the mean other-cell interference fraction. We have considered $f=0.37$ for path-loss exponent of $\gamma=4$ [4].

3.2 Flat Fading

Here, we assume that the effects of the path loss and slow lognormal shadowing are compensated, so that the average received power is controlled [8]. However, the dynamic power control is too slow to compensate for the effects of the Rayleigh fading. Assuming that the fading is flat and slow and the same average power is received from all users, then the average signal-to-interference ratio, for a single-cell system, is given by

$$\overline{\gamma} = \frac{\overline{\gamma_b}}{(1.5G_p)^{-1}(K-1)\overline{\gamma_b} + 1} \quad (5)$$

where $\overline{\gamma_b}$ is given by

$$\overline{\gamma_b} = \frac{\overline{\beta^2} E_b}{N_o} \quad (6)$$

where $\overline{\beta^2}$ is the mean squared value of the Rayleigh fading, E_b is the energy per bit, N_o is the unilateral spectrum density of the AWGN, and K is the number of active terminals at each slot.

Finally, the bit error probability P_e for BPSK is given by [9]

$$P_e = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{\gamma}}{1 + \overline{\gamma}}} \right) \quad (7)$$

3.3 Frequency Selective Fading

Assuming that the number of paths L for every user is the same and the power of all paths for K users is also the same, then the average SNR per path at all taps of a simple correlating RAKE receiver is given by [8]

$$\overline{\gamma} = \frac{(\overline{\gamma_b}/L)}{(1.5G_p)^{-1}(KL-1)(\overline{\gamma_b}/L) + 1} \quad (8)$$

For Rayleigh frequency selective fading it can be shown that the BER for maximum ratio combining with order of diversity L for BPSK is given by [9]

$$\overline{P_e} = \left[\frac{1}{2} (1 - \mu)^L \right] \sum_{k=0}^{L-1} \binom{L-1-k}{k} \left[\frac{1}{2} (1 + \mu)^L \right] \quad (9)$$

where, by definition

$$\mu = \sqrt{\frac{\gamma}{1 + \gamma}} \quad (10)$$

4. Simulation

In this section, we are going to obtain the performance of the CDMA/PRMA protocol expressed by the mean packet loss rate of all active users. The packets are considered corrupted when the number of erroneous bits is greater than the error correcting capability of the BCH code. Unless it is explained in the text, the simulation time is of 1000 s. We are going to use the method proposed in [1] to determine the channel access function in a given slot, that is, the access probabilities as a function of the number of users in the reservation mode.

First, we determine the number of MSs supported, employing the optimization a-posteriori. The access probability, in this case, is given by:

$$p_s = \frac{K_{\text{opt}} - K_{\text{res}}}{K_{\text{cont}}} \quad (11)$$

where K_{res} is the number of users in reservation, K_{cont} is the number of users in contention, and K_{opt} is the optimum number of users, that is,

$$K_{\text{opt}} = \max_{K=1,2,\dots} (K | (1 - Q_E(K)) \leq (P_{\text{loss}})_{\text{req}}) \quad (12)$$

Second, the channel access function is going to be determined heuristically, with the objective that the capacity be similar to that obtained using (11). The shape of the channel access function proposed in [1] is of two line segments defined by the following parameters: the initial probability p_s , the inclination of the first straight line segment α , the first breakpoint δ_1 , the inclination of the second straight line segment β , and the second breakpoint δ_2 . The parameters employed in this article were optimized for a packet loss rate of 1%.

4.1 Imperfect Power Control

Fig. 1 and 2 show the JCP performance for single and multiple-cells, respectively. Both figures are parameterized by the imperfection levels in the power control loop. Tab. 1 and 2 show the capacity loss corresponding to Fig. 1 and 2, respectively. The tables also show the simulation results obtained by Newson [10] for single cell systems and the analytical ones by Prasad [6] for multiple-cell systems for comparison reasons. The results obtained for $\sigma_{\text{dB}}=0$ are in agreement with the ones presented in [1]. The channel access function parameters used for the single cell case are $p_s=0.3$, $\alpha=0.007$, $\delta_1=6$, $\beta=0.1$ and $\delta_2=8$. For cellular systems $p_s=0.3$, $\alpha=0.008$, $\delta_1=4$, $\beta=0.1$ and $\delta_2=6$ [1]. Fig. 3 and 4 are analogous to Fig. 1 and 2, respectively, expect that the RA protocol was used.

Fig. 5 shows similar results to Fig. 1, except that the permission access function was optimized for each level of inaccuracy in the power control loop. Tab. 3 and 4 compare the performance of JCP and RA protocol.

The access function for the JCP is optimized for each level of inaccuracy in the power control loop. The capacity loss for the JCP is similar to that obtained for the RA protocol. Discrepancies observed are due to the heuristic determination of the access function that do not attend the capacity obtained by the a-posteriori criteria. We observe a lesser capacity gain of JCP in relation to RA protocol in the presence of the other-cell interference.

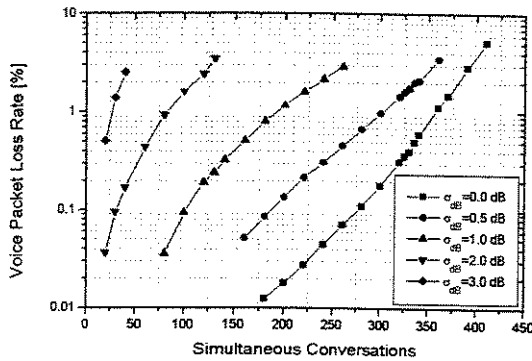


Figure 1. Voice packet loss rate for the JCP as a function of the number of voice users in the system. Single cell case.

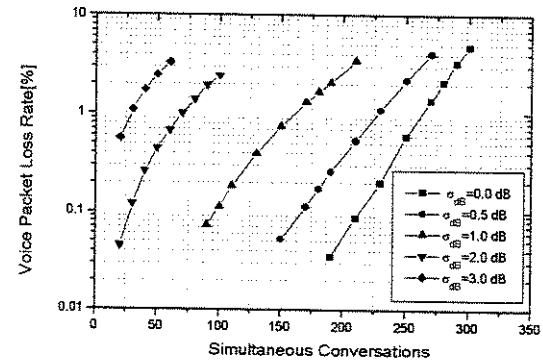


Figure 2. Voice packet loss rate for the JCP as a function of the number of voice users in the system. Cellular system with $f=0.37$.

Table 2. Capacity loss referred to Fig. 1 for $P_{\text{loss}}=2\%$. Single cell system.

σ_{dB}	M	Capacity Loss [%]	
		Simulation	Newson [10]
0	379	0.00	0.0
0.5	335	11.61	20.0
1.0	233	38.52	40.0
2.0	110	70.97	65.0
3.0	50	86.81	81.0

Table 3. Capacity loss referred to Fig. 2 for $P_{\text{loss}}=1\%$. Cellular system with $f=0.37$

σ_{dB}	M	Capacity Loss [%]	
		Simulation	Prasad [6]
0	263	0.00	0.00
0.5	230	12.92	---
1.0	161	38.78	38.00
2.0	69	73.76	65.00
3.0	28	89.35	80.00

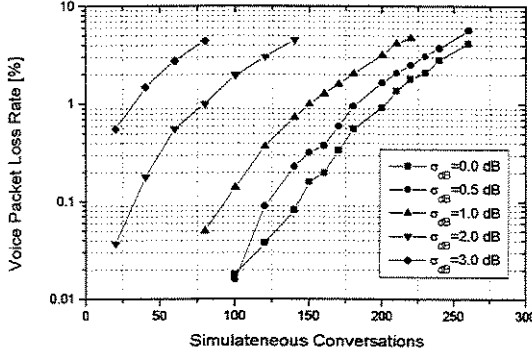


Figure 3. Voice packet loss rate for the RA protocol as a function of the number of voice users in the system. Single cell case.

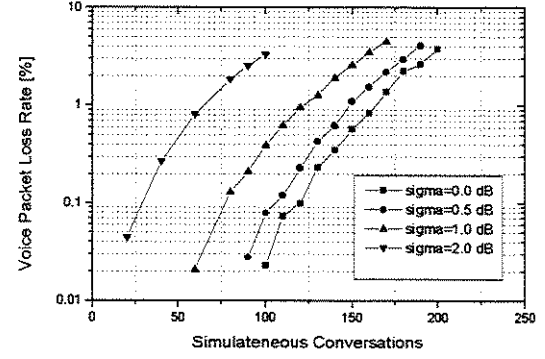


Figure 4. Voice packet loss rate for the RA protocol as a function of the number of voice users in the system. Cellular system with $f=0.37$.

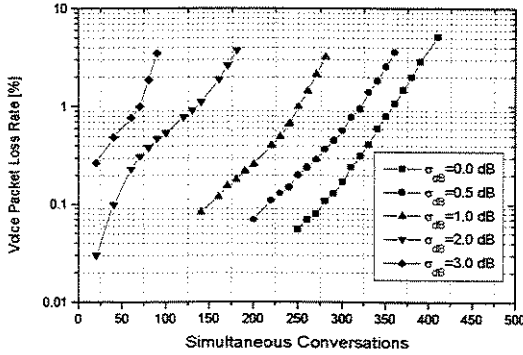


Figure 5. Voice packet loss rate for the JCP as a function of the number of voice users in the system. Single cell case. Permission access function optimized for each σ_{dB} .

Table 4. Capacity comparison of JCP and RA protocol for $P_{loss}=1\%$. Single cell case

σ_{dB}	JCP		RA		Gain [%]
	M	Capacity Loss	M	Capacity Loss	
0	359	0.0	202	0.0	77.2
0.5	320	10.63	180	10.89	77.7
1.0	250	30.36	150	25.74	66.6
2.0	130	63.78	80	60.39	62.5

Table 5. Capacity comparison of JCP and RA protocol for $P_{loss}=1\%$. Cellular system with $f=0.37$.

σ_{dB}	JCP		RA		Gain [%]
	M	Capacity Loss	M	Capacity Loss	
0	263	0.00	164	0.00	60.4
0.5	240	8.74	148	9.75	62.2
1.0	190	27.75	120	26.82	58.3
2.0	95	63.87	65	60.36	46.1

For ideal power control, a more accurate and computationally efficient way to calculate the BER was developed by Holtzman [12] and is denominated Improved Gaussian Approximation (IGA). Assuming that the AWGN is not negligible, the BER is given by:

$$P_e \approx \frac{2}{3} Q \left[\left(\frac{K-1}{3G_p} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] + \frac{1}{6} Q \left[\left(\frac{(K-1)(G_p/3) + \sqrt{3}\sigma}{G_p} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] + \frac{1}{6} Q \left[\left(\frac{(K-1)(G_p/3) - \sqrt{3}\sigma}{G_p} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] \quad (13)$$

where

$$\sigma^2 = (K-1) \left[G_p^2 \frac{23}{360} + G_p \left(\frac{1}{20} + \frac{K-2}{36} \right) - \frac{1}{20} - \frac{K-2}{36} \right] \quad (14)$$

Fig. 6 shows the number of supported voice users as a function of the SNR per bit E_b/N_0 for the JCP and RA protocol for single cell system. It was shown, see Fig. 1, that JCP supports 359 users for $P_{\text{loss}}=1\%$ and negligible thermal noise. Therefore, it is possible to conclude that IGA method presents similar results to the ones obtained by using SGA. This is not surprising, in spite of the small number of users per slot, the block-code employed permits to work with relatively high BER, and in this case the results of SGA and IGA are similar [7].

Video terminals produce packets in almost all slots. Therefore, the permission access function for voice users in the presence of video users is given by $f[k+n]$, where k denotes the number of voice users in the reservation mode, n is the number of active video users and $f[\cdot]$ is the access functions optimized for voice-only traffic.

Fig. 7 shows for one video user the performance of CDMA/PRMA. For perfect power control, the results are in full agreement with the ones shown in [1]. Tab. 6 resumes Fig. 7 for $P_{\text{loss}}=1\%$. Tab. 7 shows similar results of Tab. 6, except that the access function was optimized at each level of inaccuracy in the power control loop. Tab. 7 also shows the RA protocol performance.

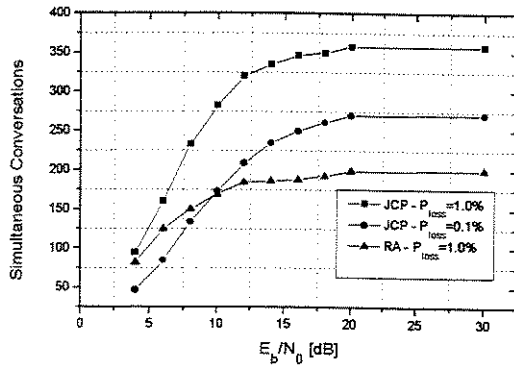


Figure 6. Simultaneous conversations supported for mean packet voice rate of 1% as a function of the SNR per bit in decibels. Single cell case.

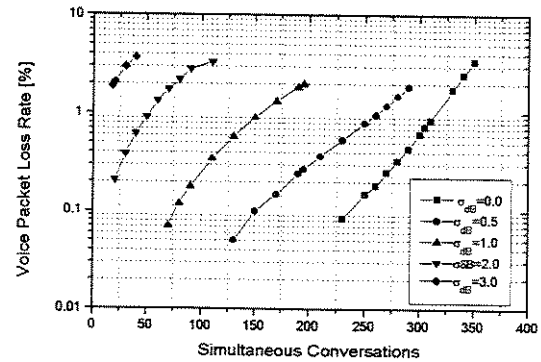


Figure 7. Voice packet loss rate for one video terminal as function of the number of the simultaneous conversations. Single cell case

Table 6. Number of voice users as a function of the number of video users for $P_{\text{loss}}=1\%$. Single cell case. Permission access function optimized for $\sigma_{\text{dB}}=0$.

σ_{dB}	Video Terminals		
	1	2	3
0.0	315	270	225
0.5	268	220	179
1.0	151	119	86
2.0	51	20	---

Table 7. Capacity comparison of JCP and RA protocol for $P_{\text{loss}}=1\%$. Single cell case. Permission access function optimized for each σ_{dB} .

σ_{dB}	JCP		RA		Gain [%]	
	Video		Video		Video	
	1	2	1	2	1	2
0	315	270	172	142	83.1	90.1
0.5	280	235	156	126	79.5	86.5
1.0	205	161	120	95	70.8	69.5
2.0	92	48	49	22	85.7	118.1

The video users generate packets in almost all slots. Therefore, the other-cell interference can be modeled by

$$\frac{I}{P_0} = f(\alpha_s \frac{M_s}{O} + n) \quad (15)$$

where n is the number of active video terminals.

Fig. 8 shows for JCP the number of voice users supported as a function of the number of video terminals for a cellular system with $f=0.37$. The capacity loss for one video user is 26.46%, where the video user is treated as equivalent voice users. For voice-only traffic, similar capacity loss was observed

For mixed voice/data traffic conditions, the permission access of data users is given by $p_d = c_p \cdot p_s$, where c_p is a constant value set to 0.2 [1].

Fig. 9 shows for JCP the number of simultaneous conversations as a function of the number of data terminals, parameterized by the mean access time of data packets, for 100s of simulation time. Traffic load and profile supported by the system must satisfy the restrictions of stability and voice packet loss rate less than 2%. For $\sigma_{dB}=0$ dB, the number of voice users supported for high data traffic is limited by the voice packet loss rate, while for low data traffic by the stability constraints. For different values of σ_{dB} the main restriction is the voice packet loss rate. In this analysis, the number of voice users is determined, for a given number of data users. The results for $\sigma_{dB}=0$, for single cell case, are in agreement with the ones shown in [1]. We modeled the average other-cell interference for mixed voice/data traffic as:

$$\frac{I}{P_0} = f\left(\alpha_s \frac{M_s}{O} + K_d \frac{R_d}{O \cdot R_s}\right) \quad (16)$$

where K_d is the number of active data users. Observe that the average number of data terminals per slot is a function of the number of active data users and the data rate.

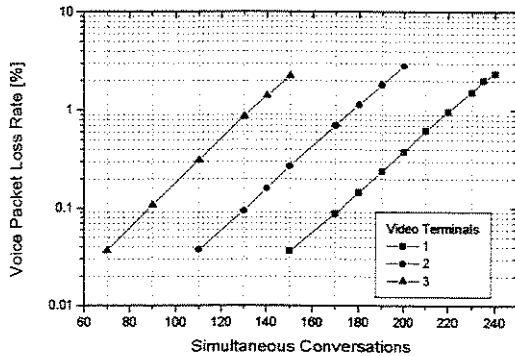


Figure 8. Voice packet loss rate as function of the number of simultaneous conversations. Parameterized by the number of video terminals. Cellular system with $f=0.37$.

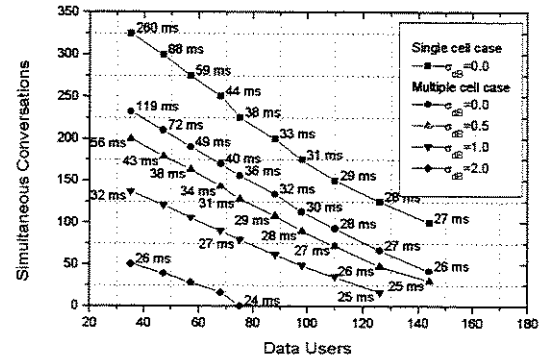


Figure 9. Number of voice users supported as a function of the number of data users.

4.2 Rayleigh Fading

Fig.10 shows the RA and JCP performance when the radio channel is imposed with a slow flat Rayleigh fading. The objective of these analysis is to verify the effects of the fading in the multiple access, so we set the SNR per bit at 20 dB, that is, the system is interference limited. The optimum number of users per slot (K_{opt}) is 3, for voice packet loss rate of 1 %. Fig. 10 also shows the voice packet loss rate determined by the a-posteriori criterion and by the heuristic permission access function. Fig. 10 also shows JCP performance when the access function was heuristically optimized for ideal power control for AWGN channel. The same figure shows the RA protocol performance.

Fig. 11 shows JCP and RA protocol performance for voice-only traffic. Slow frequency selective Rayleigh fading and maximal ratio combining receiver are considered. First, we present the JCP performance, where the access function is optimized for different diversity degrees. Then, we show JCP performance with $L=3$ and with access function heuristically optimized for AWGN channel. Finally, the same figure presents RA protocol performance for $L=3$. Again, we verified the superior performance of JCP in relation to RA protocol.

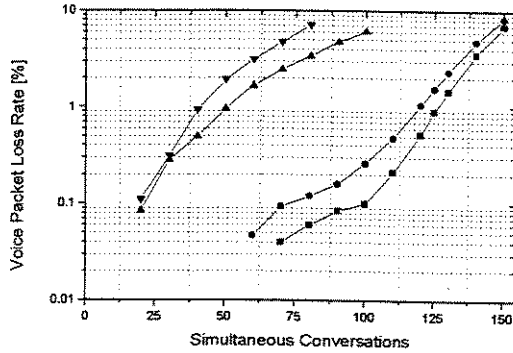


Figure 10. Voice packet loss rate as a function of the number of voice users. Single cell system with Rayleigh flat fading. ■ JCP a-posteriori criterion ● JCP heuristic access function ▲ JCP heuristic access function optimized for AWGN channel ▼ RA protocol

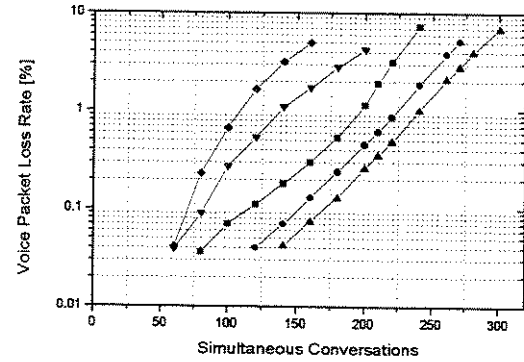


Figure 11. Voice packet loss rate as a function of the number of voice users. Single cell system with Rayleigh frequency selective fading. ◆ RA with $L=3$ ▼ JCP heuristic access function optimized for AWGN channel ■ JCP optimized for $L=2$ ● JCP optimized for $L=3$ ▲ JCP optimized for $L=4$

4.3 Three-State Vocoders

We are now going to present condensed results about the performance of a joint CDMA/PRMA protocol using three-state vocoders. In this case, the Markov process presents of talkspurts, minigaps, and gaps states. The gaps have also mean duration of 1.350 s, while the talkspurts 0.275 s, and the minigaps 0.050 s, that yields a voice activity factor of 0.375 [2]. Just replacing the two-state by a three-state vocoder, without changing the access parameters, is not efficient. In this case it was observed an increase in the number of dropped packets due to excessive delay. This increase is due to the minigap reservation loss, and as a consequence there is a contend increase in the slots. Therefore, the protocol must be modified in order the users do not loose their reservation in the minigaps. As a consequence, we have an improvement in the capacity of PRMA/CDMA systems using three-state vocoders.

Fig. 12 presents the CDMA-PRMA performance for three-state vocoders, for just one cell. The channel access function parameters for the single cell case are: $p_s=0.3$, $\alpha=0.007$, $\delta_1=6$, $\beta=0.1$ and $\delta_2=8$. It is also shown the multiple cells performance. The other-cell interference is modeled as a Gaussian variable [11]. The mean and variance are given by $\mu=0.247M/O$ and $\sigma^2=0.078M/O$, respectively, where M is the total number of active voice users in the system, disregarding sectorizing. The channel access function parameters for the multiple cell case are: $p_s=0.3$, $\alpha=0.009$, $\delta_1=3$, $\beta=0.11$ and $\delta_2=5$. Gilhousen and others have obtained due to the other-cells a capacity loss of 38.98% for an outage probability of 1%. They considered perfect power control loop for circuit switched architectures. The capacity loss obtained by JCP is 42.89%. Fig. 12 also shows the RA protocol performance, for the single-cell case. Again, for the RA protocol, a subtle modification for three-state vocoders is required. This consists in maintaining of the same slot until the occurrence of a gap. This avoids the concentration of users in the first slot due to the short duration of the minigaps. Comparing Fig. 12 and Fig. 1, we verify a capacity gain of about 6% for $P_{\text{loss}}=1\%$ by using three-state vocoders for JCP. JCP provides a capacity gain of 76% in relation to RAP. Similar results were obtained for two-state vocoders. Simulation analysis also indicates that there is also capacity gain for mixed traffic conditions for three-state vocoders. For distinct traffic profile, the capacity loss due to imperfect power control loop using three-state vocoders is similar to that verified for two-state.

Fig. 13 shows the number of active users on the channel for a 1 s. time interval for single cell case and 380 active users.

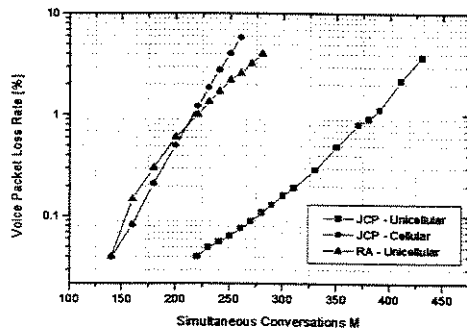


Figure 12. Voice packet loss rate as a function of the number of voice users in the system.

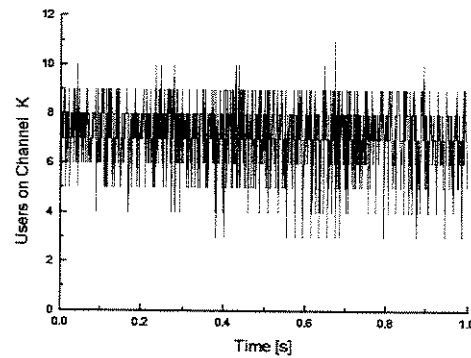


Figure 13. Users per slot on channel for a 1 s time interval. Single cell and 380 active users.

5. Conclusions

We have investigated the capacity loss of the joint CDMA/PRMA protocol and RA protocol for distinct traffic profile, due to the inaccuracy in power control loop for single and multiple cell systems, and Rayleigh fading for just one cell. We have considered two and three-state vocoders.

We can conclude that the JCP protocol presents a significant capacity gain in relation to RA protocol for distinct operational and traffic profile conditions. It is also possible to conclude that a correct choice of the JCP channel access function parameters minimizes the capacity loss due to imperfect power control and fading. This has motivated further works on dynamic optimization of the CDMA/PRMA parameters based on the status of the system and on the quality of services requested by distinct users. We have verified that subtle

modifications on the CDMA/PRMA access protocol permits to obtain a greater capacity for multimedia traffic. The three-state vocoder capacity loss due to imperfect power control loop and fading is similar to that verified for two-state vocoders.

References

- [1] A. E. Brand and A. H. Aghvami, "Performance of a joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 14, no. 9, pp. 1698-1707, Dec. 1996.
- [2] D. J. Goodman and X.W. Wei, "Efficiency of packet reservation multiple access," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 170-176, Feb. 1991.
- [3] D. J. Goodman and W. C. Wong, "A packet reservation multiple access protocol for integrated speech and data transmission," *IEEE Proceedings-I*, vol. 139, no. 6, pp. 607-612, Dec. 1992.
- [4] R. Ganesh, K. Joseph, N. D. Wilson and D. Raychaudhuri, "Performance of a cellular packet CDMA in an integrated voice/data network," *International Journal on Wireless Information Network*, vol. 1, no. 3, pp. 199-221, 1994.
- [5] M. B. Pursley, "Performance Evaluation for Phase-Coded Spread Spectrum Multiple-Access Communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 25, no. 8, pp. 795-799, Aug. 1977.
- [6] R. Prasad, M. G. Jansen and A. Kegel, "Capacity Analysis of a Cellular Direct Sequence Code Division Multiple Access System with Imperfect Power Control," *IEICE Trans. Commun.*, Tokyo, v. E76-B, n. 8, p. 894-904, Aug. 1993.
- [7] Rappaport, T. S. *Wireless Communications Principles and Practice*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.
- [8] Pahlavan, K., and Levesque, A. H. *Wireless Information Networks*, Wiley, New York, 1995.
- [9] Proakis, J. G. *Digital Communications*, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [10] M. R. Heath and P. Newson, "On the Capacity of Spread Spectrum CDMA for Mobile", Conf. Rec. of the IEEE VTC'92 (Denver), pp. 732-735, 1992.
- [11] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver and C. E. Wheatley, "On the Capacity of a Cellular CDMA System," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 303-311, May 1991.
- [12] J. M. Hotzman. "A Simple, Accurate Method to Calculate Spread-Spectrum Multiple-Access Error Probabilities", *IEEE Trans. on Communication*, vol. 40, no. 3, pp. 461-464, March 1992.

THE FADING EFFECTS ON THE CDMA/PRMA NETWORK PERFORMANCE

Roger Pierre Fabris Hoefel, Celso de Almeida

DECOM- FEEC – UNICAMP

CP 6.101 - Campinas -SP – Brasil - CEP 13081-970

e-mail: {roger,celso}@decom.fee.unicamp.br

Abstract - A system level network simulator is developed to assess and to compare some performance aspects of a joint Code Division Multiple Access/ Packet Reservation Multiple Access (CDMA/PRMA) protocol and a Random-Access (RA)/CDMA protocol over lognormal shadowing, slow and fast fading Rayleigh channels.

I. INTRODUCTION

CDMA/PRMA is a hybrid multiple-access scheme that combines the concepts of time-division (time axis is divided into frames and frames into N_{slots} time slots), code-division (different channels are multiplexed within a time slot), and random access (reservations are obtained through a contention procedure).

We have extended the analysis of (1) to take into account the effects of imperfect power control and Rayleigh fast fading on the system capacity (2). In these works, the intercell interference per slot is modeled by its average value $E[I_{\text{ext}}] = P_o E[K] f$, where $E[K]$ denotes the mean number of users per slot and P_o is the nominal power received by the BS. Abstracting the lognormal shadowing, the average intercell interference fraction f depends only on the path loss exponent γ . For uniform distributed users on equally loaded circular cells, f is found to be 0.37 for $\gamma=4$ (1).

In this work, we implement a CDMA/PRMA and a RA/CDMA system level network simulator to take into account the fading effects on the system capacity. A brief protocol and simulator description are found in Section II and III, respectively. The uplink channel modeling is done in Section IV. Section V includes the effects of lognormal shadowing on the CDMA/PRMA and RA/CDMA system performance. The effects of slow and fast Rayleigh fading are investigated in Section VI and VII, respectively. The conclusions are presented in section VIII. It is used, unless be explicit, the same design parameters and traffic models found in the original Brand and Aghvami CDMA/PRMA

protocol description (1).

II. PROTOCOL DESCRIPTION

CDMA/PRMA based systems can carry speech, video and data packets. Speech terminals, classified as periodic, are modeled by a 2-state Markov-machine composed of talkspurts and gaps. These states are assumed to have exponentially distributed duration with mean of t_1 and t_2 , respectively, yielding a voice activity factor of $\alpha_s = t_1 / (t_1 + t_2)$. Video and data traffic are modeled in the same way, i.e. they generate new packet every slot with probability σ_v and σ_d , respectively. Therefore, the mean transmission rate is given by $R_{v(d)} = \sigma_{v(d)} R_s N_{\text{slots}}$, where R_s is the source rate per frame of speech mobile stations (MSs).

A speech MS contends for reservation in each talkspurt, dropping the packets that did not obtain reservation in a pre-established time period. Once it has obtained a reservation, it transmits the talkspurt in the same slot of the following frames. Video terminals have permanent access on the channel. Data terminals always work in the contention mode; their permission access probabilities, $p_{d,i}$ is given by $c_p \cdot p_s$, where c_p is a design parameter. The base station (BS) calculates the speech users access probability, p_s , of the i th slot of the next frame based on the number of periodic and continuous users of the i th slot of the current frame. These probabilities are broadcasted to the MSs at end of frame.

In the RA/CDMA protocol, during a talkspurt the same slot is used in the subsequent frames. However, to obtain better distribution of users in the slots, the first packet is only transmitted when a Bernoulli experiment with mean $2/N_{\text{slots}}$ is positive. Video users access the channel as soon as they have packets to transmit.

III. NETWORK SIMULATOR

A system level simulator, with full interactivity between all cells, has been developed for the performance evaluation of a CDMA/PRMA packet network. The following assumptions are made:

- The network consists of a hexagonal lattice with 19 cells (N_{BS}). Omni and three-sectored cells, with ideal and realistic antenna patterns (3), were considered. The MSs are uniformly distributed.
- The paths loss is log-linear with propagation exponent γ equal to 4. The shadowing is modeled by a lognormal random variable (RV), whose standard deviation in decibels, σ_{dB} , dictates the fading intensity.
- The power control dynamics is abstracted in the sense that the MS always transmits with minimum power to arrive to the minimum loss BS participating in soft handoff. The selection diversity gain is not included, so the results are conservative (4). The power control loop (PCL) inaccuracies are modeled by a lognormal RV with standard deviation, σ_{pc} , between 1 and 2 dB.
- The frame period, comprising 20 slots, is equal to 20 ms. The speech maximum delay is set to one frame. A BCH block code with parameters (511,229,38) is used. The speech source rate (R_s) is of 8 kbps and the voice activity factor (α_s) is of 0.43. The data and video mean source rate is of 3.4 kbps and 144 kbps, respectively. A first-in first-out (FIFO) buffer and the selective automatic repeated request (ARQ) retransmission are used for data/video transmission. The performance evaluation will be done based on the mean data of the center cell.

IV. UPLINK CHANNEL MODELING

It is assumed that errors in the successive bits are independent and that they occur with same probability. So the success packet decoding probability is given by

$$Q_E = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (P_e)^i (1 - P_e)^{n-i} \quad (1)$$

where n is blocklength, t is the error correcting capability and P_e is the bit error rate (BER). Considering direct sequence spread spectrum, BPSK data modulation and a maximum ratio combiner receiver (MRC) matched to the channel diversity L , then the BER is given by

$$P_{e,i,n,m} = Q \left(\sqrt{\sum_{m=1}^L E[SIR_{i,n,m} / P_{1,1,1}, \dots, P_{1,1,L}, \dots]} \right) \quad (2)$$

where $Q(x)$ is the Gaussian Q-function. Consider the i th user connected to the n th BS, so the conditioned signal-to-interference ratio (SIR) at the m th output branch of a MRC receiver is given by

$$E[SIR_{i,n,m} / P_{1,1,1}, \dots, P_{1,1,L}, \dots] = \frac{3G_p P_{i,n,m}}{\sum_{k=1}^{K_1} \sum_{l=2}^L P_{k,n,m} + \sum_{j=2}^{N_{BS}} \sum_{k=1}^{K_j} P_{j,k}} \quad (3)$$

where $P_{i,n,m}$ is the received power at the m th path of the i th user connected with the n th BS, G_p is the processing gain, K_n is the number of MSs per slot logically connected to the n th cell. Observe that only the shadowing effects are taken into account on the other-cell interference (the second term in the denominator) and that the thermal noise was neglected. In the simulation, the estimated number of errors is a binomial RV, where the blocklength is the number of independent Bernoulli trials and P_e is the success probability on each trial.

V. LOGNORMAL SHADOWING

Consider a single-path channel and suppose that any MS can be controlled by one of N_c BSs with the strongest signal. So the SIR is given by eqn. 3 with L set to 1. The power received at the n th cell due to the i th user controlled by this same cell, $P_{i,n,1}$, is a lognormal RV that models the inaccuracies on the PCL. The PCL tries to compensate the path-loss and shadowing. Therefore, the power arriving at a BS due to any MS that is not logically connected with the target cell is modeled as

$$\min \left\{ \frac{r_I^\gamma}{z_{f,I} G_I(\theta_I)}, \frac{r_{II}^\gamma}{z_{f,II} G_{II}(\theta_{II})} \right\} d_n^{-\gamma} z_{r,n} G_c(\theta_c) \quad (4)$$

where N_c was set to 2, r_n is the distance between the MS and the n th BS, z_{fn} is the forward link shadowing between the n th BS and the MS, n is the BS that can be I, or II, d_n is the distance between the MS and the target cell, and $z_{r,n}$ is the reverse link shadowing between the MS and the target BS. $G_n(\theta_n)$ and $G_c(\theta_c)$ denote the normalized sector antenna gain to the serving and target BS, respectively. Tab. 1 shows that the normalized other-cell mean and variance of interference obtained through Monte Carlo simulation are in agreement with (5).

Table 1. Normalized mean and variance of other-cell

interference at the center cell (omni antennas, $\gamma=4$, $\alpha_s=1$).

σ_{dB}	$N_c=4$		$N_c=9$		$N_c=19$	
	mean	var.	mean	var.	mean	var.
0.0	0.42	0.14	0.42	0.14	0.42	0.14
5.66	0.53	0.19	0.52	0.17	0.52	0.16
8.0	0.79	3.77	0.60	0.20	0.60	0.20
10.0	1.58	>95.94	0.64	0.23	0.64	0.22
12.0	4.2	>8000	0.65	0.24	0.64	0.23

Fig.1 shows the voice packet loss rate for the RA/CDMA protocol, where circ. and hex denote circular and hexagonal cells, respectively. The BER for each user is obtained using eqn. 3 into eqn. 2. The results for circular cells for $\sigma_{dB}=0$ are in agreement with the ones shown in (1), where the other-cell interference was modeled by its average value.

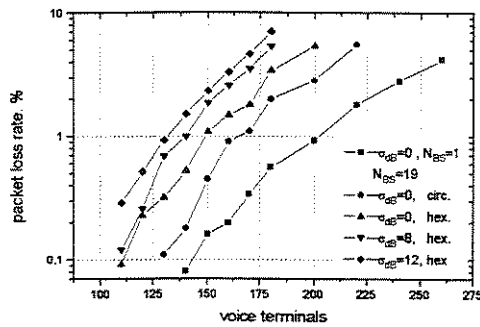


Figure 1. Packet loss rate versus voice terminals for the RA/CDMA protocol ($G_p=7$, $N_c=19$, $\sigma_{pc}=0$ dB).

In the CDMA/PRMA results shown in Tab. 2 to Tab. 4, the speech permission access probabilities (p_s) are determined through of the a-posteriori criterion (1). The objective is to load the channel with the mean optimum number of users per slot, K_{opt} , that satisfies a required packet loss rate, $(P_{loss})_{req}$. So p_s is set to $(K_{opt} - K_{res})/K_{cont}$, where K_{res} is the number of users per slot in reservation and K_{cont} is the number of users per slot in contention. Tab. 2 shows the number of voice users per sector supported by CDMA/PRMA and RA/CDMA protocol. For each case, the data are referred in descendent order to omni and three-sectored cells with ideal and realistic antenna patterns. For CDMA/PRMA (RA/CDMA) protocol the sectorization gain for real antenna pattern is of 2.67 (2.72) for $\sigma_{dB}=0.0$, and of 2.39 (2.52) for $\sigma_{dB}=8.0$ with $N_c=9$. Tab. 3 is analogous to Tab. 2, except that the processing gain is set to 15 and only the results for omni antennas are shown. The RA/CDMA protocol presents a greater trunking efficiency, see Tab. 4, in relation to CDMA/PRMA.

Table 2. Voice terminals per sector ($G_p=7$, $P_{loss}=1\%$). Single-cell: 360 (CDMA/PRMA), 202 (RA/CDMA).

σ_{dB}	N_c	CDMA/PRMA			RA/CDMA		
		4	9	19	4	9	19
0		235	235	235	149	149	149
		247	247	247	154	154	154
		209	209	209	135	135	135
8		130	210	213	89	138	140
		121	205	210	92	137	139
		111	167	170	77	116	118
12		18	144	200	10	100	133
		16	105	190	9	69	127
		13	99	161	6	62	109

Table 3. Voice terminals per cell ($G_p=15$, $P_{loss}=1\%$). Single-cell: 788 (CDMA/PRMA), 541 (RA/CDMA).

σ_{dB}	N_c	CDMA/PRMA			RA/CDMA		
		4	9	19	4	9	19
0		533	533	533	414	414	414
8		320	462	462	240	370	370
10		102	427	445	75	335	359
12		39	328	442	25	258	350

Table 4. Capacity gain of the CDMA/PRMA in relation to RA/CDMA. One-cell: 78.21 % ($G_p=7$), 45.66 % ($G_p=15$).

σ_{dB}	N_c	$G_p=7$			$G_p=15$		
		4	9	19	4	9	19
0		57.71	57.71	57.71	28.74	28.74	28.74
8		46.07	52.17	50.71	33.33	24.86	24.86
12		80.00	44.00	50.37	56.00	27.13	26.28

Hereafter, it is used a heuristic access function for the determination of the permission access probabilities in the CDMA/PRMA protocol. The shape of the channel access function is composed of two lines segments. For each channel model, the access function parameters were heuristically optimized for packet loss rate of 1%. It is used the a-posteriori expectation access criterion as benchmark. Fig. 2 shows the effects of imperfect PCL in the system capacity. The CDMA/PRMA protocol supports almost the same number of users when a heuristic access function instead of the a-posteriori criterion early defined is used. Using the causal form of the central-limit theorem, it is possible to approximate the external interference by a gamma (or chi-squared) RV (5), whose mean and variance are obtained by multiplying the values of Tab.1 by the mean number of users per slot ($\alpha_s M / N_{slots}$), where M is the number of voice terminals. Strictly speaking, this approximation is valid when the ratio of the mean to the variance of the external interference is much greater than 1(6,p.234). However, Tab. 5 shows that this approach produce accurate results, compare with Fig. 2, for $\sigma_{dB}=8$.

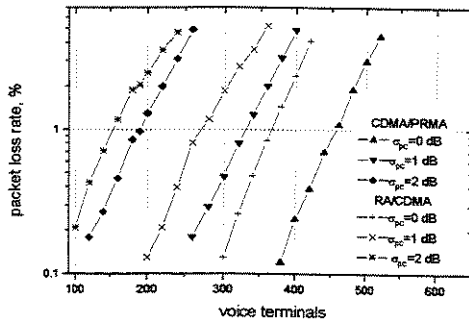


Figure 2. Packet loss rate versus voice terminals for the CDMA/PRMA protocol ($G_p=15$, $N_c=9$, $\sigma_{dB}=8$).

Table 5. Capacity loss due to inaccuracies in PCL using the chi-squared approximation ($G_p=15$, $N_c=9$, $\sigma_{dB}=8.0$, $P_{loss}=1\%$).

σ_{pc} [dB]	CDMA/PRMA		RA/CDMA		Gain %
	M	Capacity Loss, %	M	Capacity Loss, %	
0	456	—	366	—	24.86
1.0	330	27.63	273	25.41	20.88
2.0	191	58.11	154	57.92	24.03
3.0	97	78.72	75	79.51	29.33

The permission access function for voice users in the presence of video users is given by $f[r+v]$, where r denotes the number of voice users in the reservation mode, v the number of active video users and $f[\cdot]$ is the access functions optimized for voice-only traffic. Fig. 3 shows some results for CDMA/PRMA and RA/CDMA systems for mixed voice/video traffic. We can verify that 1 video terminal (144 kbps without retransmissions) is equivalent to ~ 47 voice users ($47\alpha_c x R_s \approx 161$ kbps) in the CDMA/PRMA system for $\sigma_{dB} = 8$.

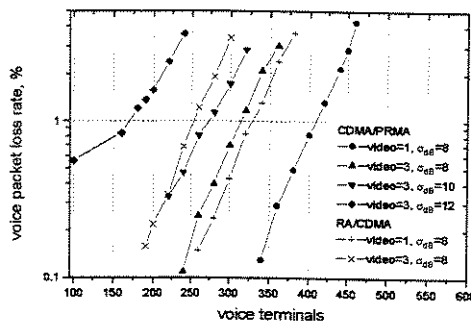


Figure 3. Voice packet loss rate for CDMA/PRMA and RA/CDMA protocols for mixed voice/video traffic ($G_p=15$, $N_c=9$, $\sigma_{pc}=0$ dB). FIFO buffer size: 1000 packets.

protocols the number of speech terminals versus the number of data terminals, parameterized by the mean access time of data packets, for 180s of communication time. The traffic load and profile supported by the system must satisfy the stability restrictions (FIFO buffer size set to 500 packets), and voice packet loss rate must be less than 1%. For the CDMA/PRMA protocol, the permission access for data users is set to $p_d=0.2 p_s$ as in (1). In the RA/CDMA the packets are transmitted when a Bernoulli experiment with mean 0.3 is positive. The backlogged packets are rescheduled to retransmission through a exponential negative RV with mean of one and half frame. Analyzing Fig. 3 and Fig. 4, we can verify that the capacity gain of CDMA/PRMA protocol in relation to the RA/CDMA is directly proportional to the number of speech users in the total traffic.

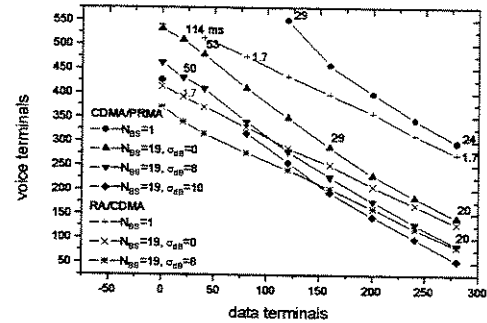


Figure 4. Performance of CDMA/PRMA and RA/CDMA protocols for mixed voice/data traffic ($G_p=15$, $N_c=9$, $\sigma_{pc}=0$).

VI. RAYLEIGH SLOW FADING

In this section, channels where the received power do not change significantly within the packet are considered. In the model labeled as I, the instantaneous SIR for the i th user is still given by eqn. 3, except that the received power for the signals logically connected to target cell is modeled by a composed lognormal, whose standard deviation models the imperfect power control, and exponential negative RV, i.e. a composed lognormal and Rayleigh fading is used for the intracell interference. In the model labeled as II, it is assumed that the PCL compensates for lognormal and Rayleigh fading with some level of inaccuracy. Therefore, for the each MS logically connected to the target cell, the power at any output finger of the RAKE receiver is a independent lognormal RV with standard deviation σ_{pc} . Fig. 5 shows some results for the CDMA/PRMA and RA/CDMA protocols.

Fig. 4 shows for the CDMA/PRMA and RA/CDMA

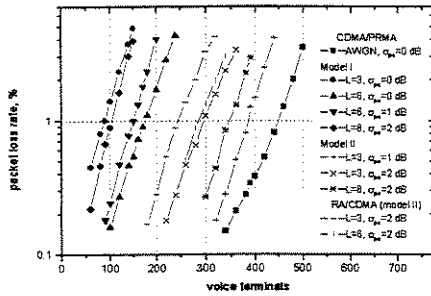


Figure 5. Voice packet loss rate for CDMA/PRMA and RA/CDMA protocols ($G_p=15$, $\sigma_{dB}=8$, $N_c=9$).

VII. RAYLEIGH FAST FADING

The Rayleigh fast fading produce significant changes in the received power within the packet. So the packet success probability depends of the average BER, that can be obtained using the Monte Carlo method in the solution of

$$\overline{P_{e_{i,n,m}}} = \int_0^\infty \int_0^\infty Q \left(\sqrt{\sum_{m=1}^L E \left[\text{SIR}_{i,n,m} / P_{L,1,1} \dots P_{N_{BS}, K_{N_{BS}}, L} \right]} \right) dP_{L,1,1} \dots dP_{L,1,L} \dots dP_{N_{BS}, K_{N_{BS}}, L} \quad (5)$$

where the instantaneous SIR per bit for the i th user at each branch of a MRC is obtained in the same way as the model I of the previous section. In the simulation, the average BER is obtained using a table look-up procedure, where the table maps the number of users on the channel with the mean BER, eqn 5 (7). It is shown in Fig. 6 that the significant power variation in same packet minimizes the effects on the system capacity due to inaccuracies in PCL. The results for perfect PCL without fast fading ($\bullet$ in Fig. 6) are in agreement with the ones shown in Fig. 2. The PCL analysis without Rayleigh fast fading ($\blacktriangle$ in Fig. 6) uses the approach described in Section V due to the slow variation of the received power. Finally, we observe that $L=1$ indicates a flat fading channel.

VIII. CONCLUSIONS

The simulation results show indicate that CDMA/PRMA protocol presents superior performance in relation to RA/CDMA protocol over distinct operational conditions. They also denote that to mitigate the effects of other-cell interference it is necessary a well-optimized pilot search mechanism such that the MSs transmits the minimum possible power. The effects of slow Rayleigh fading on the

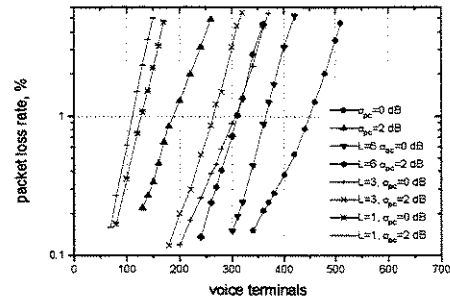


Figure 6. Packet loss rate versus number of voice terminals for CDMA/PRMA protocol ($G_p=15$, $\sigma_{dB}=8$, $N_c=9$).

system capacity is quite dramatic even with diversity scheme. Fast powerful PCL algorithms (with more performance demanding than to need for the fast fading channel) and diversity are necessary in order to map the Rayleigh RV to a better one.

REFERENCES

- (1) Brand, A. and Aghvami, A. H., "Performance of a joint CDMA/PRMA protocol for mixed voice/data transmission for third generation mobile communication," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 14, no. 9, pp. 1698-1707, Dec. 1996.
- (2) Hoefel, R. P. F. and de Almeida, C., "On the capacity of CDMA/PRMA systems", *Wireless Personal Communications: Emerging Technologies for Enhanced Communications*, Tranter, W. H. et al (eds), Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 315-326.
- (3) Newson, P. and Heath, M. R., "The capacity of spread-spectrum CDMA system for cellular mobile radio with consideration of system imperfections," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, no 4, pp. 673-684, May 1994.
- (4) Wang, S-W and Wang, L., "Effect of soft handoff, frequency reuse and non-ideal antenna sectorization on CDMA system capacity," in *Proceedings of 43rd Veh. Technol. Conf.*, pp. 850-854, May 1993.
- (5) Corraza, G. E. et al., "CDMA cellular systems performance with fading, shadowing and imperfect power control," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 47, no. 2, pp.450-459, May 1998.
- (6) Papoulis, A. *The Fourier Integral and Its Applications*. New York: McGraw-Hill, 1962.
- (7) Hoefel, R. P. F. and de Almeida, C. "The performance of CDMA/PRMA for Nakagami-m frequency selective fading channel", *Electronics Letters*, vol.35, no.1, pp. 28-29, 1999.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CDMA/PRMA AND CDMA/ALOHA MEDIUM ACCESS SCHEMES FOR PACKET TRANSMISSION IN THIRD GENERATION MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS

Roger Pierre Fabris Hoefel, Celso de Almeida

DECOM – FEEC - UNICAMP

CP 6.101 - Campinas -SP – Brasil - CEP 13081-970

E-mail: rogerhoefel@uol.com.br –celso@decom.fee.unicamp.br

Abstract

The voice-only traffic steady-state characteristics of a joint DS-CDMA/PRMA are derived. Considering voice-only, mixed voice/VBR and voice/ WWW browsing traffic models, an outstanding performance of the CDMA/PRMA protocol in relation to a slotted DS-CDMA/ALOHA medium access scheme is shown. These analysis take in account distinct design parameters, channel models, as well as multislot and multicode multirate schemes.

Introduction

Code Division Multiple Access/Packet Reservation Multiple Access (CDMA/PRMA) multiservice protocol is a hybrid system employing time division, direct sequence code division and reservation ALOHA concepts. In this access method, the uplink access permission is determined by the channel load, contrasting to the CDMA/ALOHA protocol, where the mobile stations access the channel independently of the system load. Fundamentally, the objective of this paper is to do a comparative analysis between the CDMA/PRMA and the slotted CDMA/ALOHA systems under distinct operational aspects not yet considered in the open literature. The features investigated include: (i) the duplexing mode (FDD versus TDD); (ii) the forward error correcting code parameters used; (iii) the frame period; (iv) the number of time slots per frame; (v) the maximum allowable delay for voice packets; (vii) the effects of slow fading channels in the system performance; (viii) the performance for mixed voice/video and voice/data using multislot and multicode multirate strategies.

The basic features of a CDMA/PRMA protocol for voice-only traffic is described by using equilibrium point analysis (EPA). A comparative evaluation of design parameters effects in the performance of CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA systems is also done. The performance of both protocols over slow fading channels is analyzed. The system performance for mixed

voice/video and voice/WWW browsing traffic is then evaluated.

CDMA/PRMA protocol description

Figure 1 shows a fast voice activity detector (VAD) model, i.e., a 3-state Markov machine, which states are talking (T), principal silent gap (S_P), and minisilent gap (S_M) [2]. The medium access time unit consists of a time slot with duration of τ seconds. The transition probability from S_P to the state T is given by $\sigma = 1 - \exp(-\tau/t_2)$, where t_2 is the average duration of a silent gap. The transition probability from S_M to T is given by $\sigma_M = 1 - \exp(-\tau/t_4)$, where t_4 is the average duration of a minisilent gap. The probability that a minispurt with mean t_3 ends at any time slot is given by $\gamma_M = 1 - \exp(-\tau/t_3)$. On account of the principal talkspurt having a t_1 seconds mean, then the average number of minitalkspurts in each principal talkspurt is given by $1/\alpha = t_1/(t_3+t_4)$. Therefore, the transition probability from T to S_P is $\alpha\gamma_M$ and the transition probability from T to S_M is $(1-\alpha)\gamma_M$. When $\alpha=1$ and $t_1=t_3$, no intersyllabic gaps are detected, and the three state detector reduces to a two state one. In the slow VAD model, the transition probability from talk to silent state, and vice-versa, is given by $\gamma = 1 - \exp(-\tau/t_1)$ and $\sigma = 1 - \exp(-\tau/t_2)$, respectively. We assume that $t_1=1.0$, $t_2=1.35$, $t_3=0.275$ and $t_4=0.05$ seconds. Using EPA, it is easy to show that the speech activity factor and the statistical multiplexing gain (SMG) for two and three state vocoders are given by 0.425(2.35) and 0.368(2.71), respectively [3].

Figure 2 generalizes, in the sense that the CDMA/PRMA speech terminal can be applied to slow and fast VAD, the state machine proposed in [4]. If the terminal is in the principal silent state, SIL_P , then the transition to the access state, ACS, occurs with probability σ . If the terminal is in the minor silent state, SIL_M , then the flow to state ACS occurs with probability σ_M . It goes to the reservation state if the following independent events occur: (i) to keep in voice activity; (ii) to get permission to access the channel; (iii) to be successful in the packet transmission.

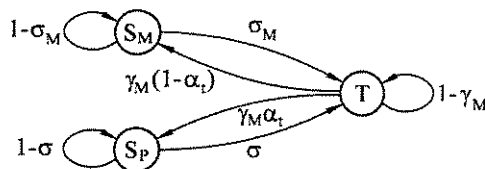


Fig. 1: Fast voice activity detector model [2].

Otherwise, it stays in the ACS state, or even still returns to one of silent states, if its talkspurt ends before obtaining reservation. Terminals that do not obtain reservation in a pre-established time period have their packets dropped. The voice terminals transmit one fixed length voice packet per frame. Therefore, the chain of RES states models one frame period, \$T_f\$, which is composed of \$N\$ time slots. The probability that a minisput has ended in the last frame is \$\gamma_f = 1 - (1 - \gamma_M)^N\$. Thus, a mobile station (MS) in state \$RES_0\$ goes to the state \$SIL_P\$ with probability \$\alpha\gamma_f\$. Naturally, it goes to the state \$SIL_M\$ with probability \$(1-\alpha)\gamma_f\$. Otherwise, it returns to state \$RES_{N-1}\$. The following equations can be obtained from the state diagram:

$$r \alpha \gamma_f + a \alpha \gamma_M = s_p \sigma \quad (1)$$

$$r (1 - \alpha) \gamma_f + a (1 - \alpha) \gamma_M = s_M \sigma_M \quad (2)$$

$$a (1 - \gamma_M) p_s(r) Q_E(r+c) = r \gamma_f \quad (3)$$

$$r_0 = r_1 = \dots = r_{N-1} = r \quad (4)$$

$$s_p + s_M + a + r N = M \quad (5)$$

where \$M\$ is the number of MSs and \$s_p, s_M, a, r\$ are real numbers that denote the equilibrium value of the state variables \$SIL_P, SIL_M, ACS\$, and \$RES\$, respectively. We observe that \$c = a (1 - \gamma_M) p_s(r)\$ is the equilibrium value of the number of voice terminals that are in the channel contending for reservation.

The conventional permission control (CPC) consists of a channel access function, \$p_s(r)\$, that maps the number of users in state \$RES\$ to the permission access probabilities to be used in the next frame. The shape of \$p_s(r)\$ is composed of two line segments defined by the initial probability \$p_p\$ and the inclination and breakpoint of the first and second line segment \$\Delta_1, \delta_1, \Delta_2\$ and \$\delta_2\$, respectively [1]. Using hard decision, the packet success probability is given by

$$Q_E(r+c) = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (P_e)^i (1-P_e)^{n-i} \quad (6)$$

where \$n\$ is the linear block code length and \$t\$ is the error-correcting capability. Supposing perfect power control in an AWGN channel, it is widely known that the average bit error rate for the uplink of a BPSK DS-CDMA chip asynchronous interference limited system is given by

$$P_e \approx Q \left(\sqrt{\frac{3 G_p}{(r+c)(1+f)-1}} \right) \quad (7)$$

where \$Q(x)\$ is the Gaussian \$Q\$-function, \$G_p\$ is the processing gain, and \$f\$ is the normalized average intercell interference.

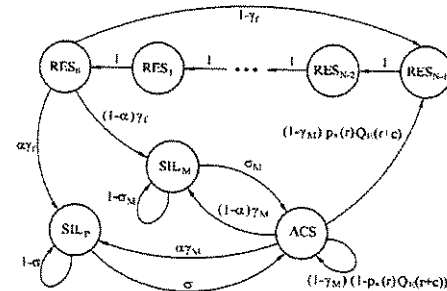


Fig. 2: CDMA/PRMA speech terminal state diagram.

In CDMA/PRMA systems, the voice packet loss rate is equal to the sum of corrupted, \$P_{optd}\$, and dropped packet rate, \$P_{drop}\$, due to multiple access interference (MAI) and excessive delay, respectively. Using the suppositions and approximations carried out in [4], then it is easy to show that the mean corrupted packet loss rate can be obtained by

$$\overline{P_{optd}} \approx \sum_{R=1}^{R_U} \binom{R_U}{R} \left(\frac{r}{R_U} \right)^R \left(1 - \frac{r}{R_U} \right)^{R_U-R} [1 - Q_E(R+c)] \quad (8)$$

where the number of users per slot in the state \$RES\$ was modeled by a binomial probability density function, \$\theta_R(R)\$, with support upper bounded by \$R_U = \delta_2 + 1\$ and mean given by the equilibrium value \$r\$.

To attain the dropped packet rate, the same expression derived for the PRMA protocol [2, eqn. 67-76] can be used, because, in this case, the difference between both protocols is reduced to the events needed to obtain reservation. Consequently, the conditional packet dropping probability is given by

$$P_{drop}(v) = \gamma_f \left\{ \frac{v^D (1-\gamma_f)^{B-1}}{1-v^N} \left(1 - \frac{\gamma_f [1 - (1-\gamma_f)v^{2N}]}{[1 - (1-\gamma_f)v^N]^2} \right) + \frac{\gamma_f v^N}{[1 - (1-\gamma_f)v^N]^2} \right\} + \gamma_f^2 (1-\gamma_f)^{B-1} (v^D - v^{BN}) \quad (9)$$

where \$B\$ is the buffer size and \$D\$ is the maximum delay in time slots allowed to speech packets. The probability that a MS stays in the state \$ACS\$ is given by

$$v(R) = 1 - (1-\gamma)p_s(r)Q_E(R+c) \quad (10)$$

Finally, the mean packet dropping probability can be

obtained by

$$\overline{P_{\text{drop}}} \approx \sum_{R=0}^{\delta_2+1} P_{\text{drop}}(v) \theta_R(R) \quad (11)$$

Comparative analysis of CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA for voice-only traffic

At first, the same design parameters proposed in [1] are used, i.e., slow VADs, $G_P=7$, $T_F=20$ ms, $N=D=B=20$ slots, speech source rate of 8 kbps, and a BCH ($n=511, k=229, t=38$) block code, but besides that, fast VADs are also considered. Fig. 3 and Tab. 1 show good agreement between numerical and simulation results. It has to be noticed that the numerical expressions derived in the previous Section were obtained using some suppositions over the protocol behavior in its nominal operation region, i.e., $P_{\text{loss}}=1\%$. The CDMA/ALOHA capacity with fast (slow) VAD is given by (i) $M=227$ (200) for $f=0$; (ii) $M=183$ (161) for $f=0.37$; (iii) $M=154$ (137) for $f=0.749$. Theoretically, using a 3-state instead of a 2-state VAD allows an increase of $\sim 15\%$ in the SMG. However, lower voice activity leads to an average capacity gain about 8% and 13% for the CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA, respectively. It has been observed that while the fast VAD is immediately employed in CDMA/ALOHA system, the access function for the CDMA/PRMA protocol is more difficult to be optimized. When intercell interference is considered, it results in a decrease in the capacity gain of CDMA/PRMA, whose access mechanism controls the intracell interference, in relation to CDMA/ALOHA system.

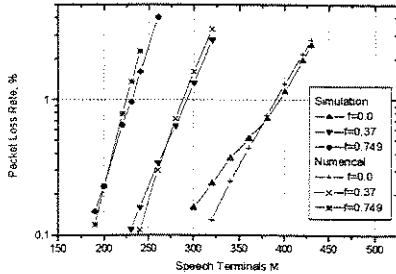


Fig. 3: CDMA/PRMA protocol simulation and numerical results. Fast VADs.

A variant of the CDMA/PRMA protocol, labeled by CDMA/Frame Reservation Multiple Access (CDMA/FRMA), is obtained when the feedback from the base station (BS) is received at a frame basis instead of a slot basis as in the CDMA/PRMA protocol. Fortunately, this does not cause major influence on the system performance, as it is shown in Fig. 4.

Tab. 1: Simulation and numerical results for the CDMA/PRMA protocol at its nominal operation point.

f	Slow (Fast) VAD			
	M	$P_{\text{loss}} \%$	$P_{\text{cpld}} \%$	$P_{\text{drop}} \%$
0	362 (385)	0.95 (0.95)	0.60 (0.68)	0.35 (0.27)
	365 (388)	0.95 (0.96)	0.56 (0.71)	0.39 (0.25)
0.37	266 (289)	0.96 (0.96)	0.69 (0.67)	0.27 (0.29)
	269 (287)	1.01 (0.98)	0.72 (0.70)	0.29 (0.28)
0.75	209 (229)	0.99 (0.98)	0.69 (0.72)	0.30 (0.26)
	207 (224)	0.98 (0.98)	0.74 (0.76)	0.24 (0.22)

The packet dropped rate can be decomposed in a sum of two terms: (i) packets dropped without obtaining a unique permission to contend for reservation; (ii) packets that contended for a reservation, but were corrupted due to MAI. We have observed that the first component is highly predominant. So, this explains the similar behavior of CDMA/PRMA and CDMA/FRMA protocols. Finally, the same feature was also noticed for fast VAD systems.

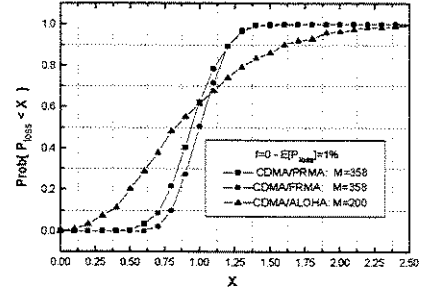


Fig. 4: Packet loss rate cumulative distribution for CDMA/PRMA, CDMA/FRMA and CDMA/ALOHA systems with slow VAD. These results refer to 180 s. of steady state communication time in a single cell system.

It is possible to design a simulator where the number of users in contention (K_{cont}) can be precisely determined. Thus, the CDMA/PRMA access function parameters can be optimized using as a benchmark the capacity obtained when the permission access probability is given by $p_s = (K_{\text{opt}} - K_{\text{res},i}) / K_{\text{cont}}$, where $K_{\text{res},i}$ is the number of users in reservation at the i th slot. The optimum number of users in

the reservation state (K_{opt}) is given by [1]

$$K_{\text{opt}} = \max_{K=1,2,\dots} \{K \mid (1 - Q_E[K]) \leq (P_{\text{loss}})_{\text{req}}\} \quad (12)$$

where $(P_{\text{loss}})_{\text{req}}$ is the target voice packet loss rate. In [5] a new method, labeled as adaptive permission control (APC), was proposed to estimate K_{cont} . However, it is apparently necessary that the permission access probability be updated and broadcasted to the MSs in a slot basis. In this paper, an APC method suitable for CDMA/FRMA is proposed. In this control policy, the speech permission access probability for the i th slot is given by

$$P_{s,i} = \frac{K_{opt} - K_{res,i}}{K_{cont}} = \frac{K_{opt} - K_{res,i}}{(M - \sum_{i=1}^N K_{res,i})P_{ST}} \quad (13)$$

where the first denominator term is the number of users that are not in the reservation state and P_{ST} is the probability that a given MS in the silent state goes to the talk state in a time period equal to the maximum delay of speech packets. The number of reservation voice terminals in each slot is determined by supposing that the voice packet header contains two bits with the following function: 00 (packet transmitted to obtain reservation); 01 (the current packet is neither the first nor the last packet of the current talkspurt); 10 (the last packet of the current talkspurt); 11 (packet transmitted to release the resources when the packet 10 was corrupted due to MAI).

Tab. 2 shows that the CDMA/PRMA protocol is flexible in relation to the frame period and coding parameters choice. A BCH(255,115,21) block code is used for $T_f=10$ ms and a BCH(127,57,11) for $T_f=4.615$ ms. Using APC, the CDMA/FRMA capacity with slow (fast) VADs is: (i) $M=365$ (398) for $T_f=20$ ms and $K_{opt}=9$; (ii) $M=374$ (420) for $T_f=10$ ms and $K_{opt}=9$; (iii) $M=361$ (413) for $T_f=4.615$ ms and $K_{opt}=8$. Using Fig. 1, eqn. (13) was easily adapted to fast VAD. The CDMA/ALOHA capacity with slow (fast) VADs is: (i) $M=200$ (227) for $T_f=20$ ms; (ii) $M=218$ (249) for $T_f=10$ ms; (iii) $M=211$ (242) for $T_f=4.615$ ms.

Tab. 3 indicates that the CDMA/PRMA capacity is a linear function of the processing gain. As a consequence of the law of large numbers, we can observe that the capacity of CDMA/ALOHA grows at a faster rate than the former one. However, an increment in the CDMA/FRMA capacity gain is verified when the target QoS is more demanding (please, compare Tab. 2 and 3). The best of one's effort for the parameters optimization using CPC leads to the CDMA/FRMA, with slow (fast) VADs, that supports 346 (366), 720 (790) and 1453 (1590) speech MSs for $G_p=8$, 16 and 32, respectively. Therefore, besides to work equally well with slow and fast VADs, the APC scheme presents high flexibility in relation to the QoS required.

In order to ratify the numerical expressions developed in Section 2, Fig. 5 presents the effects on the number of slots per frame on the capacity of the CDMA/ALOHA and CDMA/PRMA systems in a single cell environment. If APC ($K_{opt}=18$) is used instead of CPC policy, then the following results for CDMA/FRMA with slow (fast) VADs are obtained: (i) 792 (866) for $N=20$ slots; (ii) 387 (430) for $N=10$ slots; (iii) 150 (167) for $N=4$ slots

Tab.2: CDMA/PRMA simulation and numerical results. Single cell system with CPC policy. System parameters: $G_p=7$, $T_f=x$, $N=20$, $D=y$, where x can assume 4.615, 10 and 20 ms. The maximum allowable delay is set to 20 ms, thus, y can assume 87 slots for $T_f=4.615$ ms, 40 slots for $T_f=10$ ms and 20 slots for $T_f=20$ ms.

T_f	Slow (Fast) VAD			
	M	P_{loss} , %	P_{cpd} , %	P_{drop} , %
20 ms	362 (385)	0.95 (0.95)	0.60 (0.68)	0.35 (0.27)
	365 (388)	0.95 (0.96)	0.56 (0.71)	0.39 (0.25)
10 ms	373 (421)	0.93 (0.92)	0.71 (0.74)	0.22 (0.18)
	374 (418)	0.94 (0.94)	0.64 (0.71)	0.30 (0.23)
4.6 ms	358 (410)	1.0 (0.95)	0.99 (0.92)	0.01 (0.03)
	353 (400)	1.01 (0.97)	1.01 (0.96)	0.001 (0.006)

Tab.3: CDMA/FRMA and CDMA/ALOHA single-cell systems capacity as a function of the processing gain. System parameters: $T_f=10$ ms, $N=D=20$ slots, BCH (255,115,21) block code. APC scheme optimized for $P_{loss}=0.1\%$ ($K_{opt}=9$, 17 and 34 for $G_p=8$, 16 and 32, respectively).

G_p	Slow VAD			Fast VAD		
	CDMA/ FRMA	CDMA/ ALOHA	Gain %	CDMA/ FRMA	CDMA/ ALOHA	Gain %
8	372	185	101	415	212	96
16	740	510	45	830	570	46
32	1492	1175	27	1662	1340	24

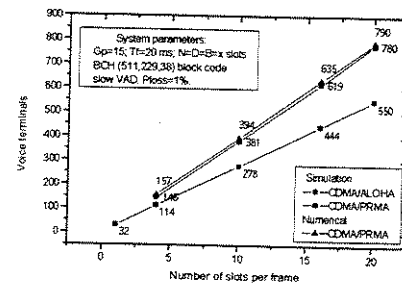


Fig. 5: Voice users against the number of slots per frame.

Tab. 4 shows that on the opposition of observed with APC scheme, the success in the parameters optimization used in CPC policy have a dependence on the VAD characteristics, the frame period and the maximum permissible delay.

Tab.4: Effects of packet delay on the performance of CDMA/FRMA with slow and fast VADs. APC optimized for $P_{loss}=1.0\%$ in a cellular system with $f=0.6$ [4]. System parameters: $G_p=16$, $N=10$ slots, BCH code (see Tab.1).

T_f ms	D slots	CPC			APC		
		10	20	40	10	20	40
4.615 ms		241	245	248	244	245	246
		272	278	281	280	281	283
10 ms		257	264	265	262	264	266
		288	297	302	297	300	304

Voice-only performance of CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA over slow frequency selective fading channels

For frequency division duplex (FDD) mode, a fast power control mechanism (for instance, 1.6 kHz in the UTRA WCDMA [6, pp.168]) due to the asymmetries between direct and reverse links is necessary. Therefore, for $(P_{\text{loss}})_{\text{req}}=1\%$, Tab. 5 shows some results due to the effects of imperfect power control (IPC) on the performance of the CDMA/FRMA protocol, designed in a symmetric single-switching-point time division duplex (TDD) mode. In opposition to other investigations [7], we hypothetically assumed that the received power is a log-normal random variable (RV), that is correlated at a frame basis ($R_{\text{cp}}(k) = \sigma_{\text{pc}}^2 a^{|k|}$) [8], where σ_{pc} is the standard deviation error due to the IPC). A special control packet to contend for reservation, which is triggered by the VAD, is used to avoid the superposition of delays due to contention for reservation and the frame assembling. The CDMA/FRMA capacity, without interframe interleaving (IFI), now with an insignificant dependence in relation to the correlation factor a is given by 305, 171 and 85 for $\sigma_{\text{pc}}=1, 2$ and 3 dB, respectively. It is observed that CDMA/FRMA capacity is $M=415$ (414) for perfect PC assumption in the TDD (FDD) mode

Tab. 5: CDMA/FRMA single-cell capacity considering correlated IPC and IFI. System configuration: symmetric TDD mode; $G_p=16$; $T_f=10$ ms (uplink+downlink); voice frame period (T_{vt}) of 10 ms; $N=10$ slots (uplink); $D=20$ slots (uplink); BCH(255,115,21); slow VAD; APC policy.

σ_{pc}	a	IFI: 2 frames			IFI: 3 frames		
		0	0.25	0.9	0	0.25	0.9
1 dB		335	326	303	350	338	304
2 dB		217	201	172	244	223	177
3 dB		117	109	87	145	127	88

In [9], the performance of the CDMA/PRMA protocol over fast Nakagami- m frequency selective fading channel was investigated. Considering a simple RAKE receiver, it was concluded that a suitable diversity scheme mitigates the fading adequately. For pedestrian TD/CDMA systems with short slot duration, the power received at each slot is essentially constant. Thus, analyzing the performance of CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA protocols over frequency selective slow fading channels (and assuming that the path loss and the slow lognormal shadowing effects are compensated by the power control loop), it is shown that the interframe interleaving jointly with diversity are essential to minimize the capacity loss. In this context, the slow and fast jargons refer to the power variation in a time slot. Tab. 6 shows results for CDMA/PRMA protocol over a Rayleigh fast fading

channel with constant multipath intensity profile (MIP). In this case, a RAKE receiver matched to the channel diversity, L_c , is used, and the MAI is modeled as a flat power spectrum density [9]. Considering a Rayleigh slow fading channel, Fig. 6 shows a dramatic capacity loss, unless an interframe interleaving be used.

Tab. 6: Results for the CDMA/PRMA protocol over a Rayleigh fast fading channel with a constant MIP. Single cell system. For the system parameters, it is referred to in Tab. 5.

L_c	Simulation (numerical) results		
	M	$P_{\text{cpd}} \%$	$P_{\text{drop}} \%$
1	130 (132)	0.75 (0.72)	0.24 (0.27)
3	279 (282)	0.90 (0.94)	0.10 (0.06)
6	329 (338)	0.87 (0.92)	0.13 (0.08)

At this point in order to investigate the effects of non-constant MIP [10] slow Rayleigh channel in the capacity of the TD-CDMA systems, using conventional RAKE receivers, the ATDMA microcell channel model is used.

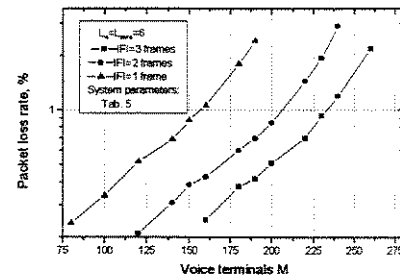


Fig. 6 – Effects of interframe interleaving in the CDMA/PRMA system performance over a Rayleigh slow fading channel with constant MIP.

Tab. 7: ATDMA microcell channel model [6, pp.91].

Tap	Delay (ns)	Power (dB)	Tap	Delay (ns)	Power (dB)
1	0	-4.9	4	1110	-13.9
2	230	0	5	1440	-16.1
3	630	-11.4	6	1840	-23.5

Tab. 8 indicates that spatial diversity, jointly with the intrinsic inbound diversity of SS-signals ($\approx 1/8$ MHz ≈ 125 ns), is strictly necessary to minimize the capacity loss in this high demanding channel. In these results, besides of independent assumption, we consider that it is possible to combine coherently the signals observed at the RAKE receiver output of each antenna. We also use the concept of conditional expected value as a random variable to model the instantaneous SIR per bit at each branch of a maximum ratio combiner (MRC) receiver [9].

Tab 8: CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA performance in a single cell system. The channel model is given by Tab. 7. For the system parameters and the channel model, it is referred to in Tab. 5 and 6, respectively.

L_{ant}	$L_{mrc} = L_c$		L_{mrc}	$L_{ant} = 3$	
	CDMA/ FRMA	CDMA/ ALOHA		CDMA/ FRMA	CDMA/ ALOHA
1	82	58	1	55	33
2	157	120	2	150	116
3	202	157	3	175	136
6	265	209	4	195	150

Performance of CDMA/FRMA and CDMA/ALOHA systems in a mixed voice and video traffic environment

Henceforth, the system parameters referred to in Tab. 5 are used. Also, unless explicitly cited, the number of voice users produces a packet loss rate of 1% using slow VADs. The variable bit rate video (VBR) traffic is modeled as a Markov modulated rate process (MMRP) with eight states. The transition rate matrix is given in [11, Tab. 3]. The ATM cell arrival rate associated with each state are set to provide a 64 kbps video service (at an average of 178 cells/s., using 45 video samples per cell) [12, Tab. 2]. The medium access control (MAC) layer does the cell segmentation to transmit encoded packets in the physical layer. It is considered that each video packet can carry 80 bits of information. In the case of continuous bit rate (CBR) traffic model, a video terminal creates a packet every slot according to a Bernoulli experiment [1], which provides a net rate of 64 kbps. In all situations a first-in first-out (FIFO) buffer is used. The packets are dropped after a pre-established maximum access delay, which is defined as the maximum time that the packet can be stored in the buffer. This definition includes the time to perform the interframe interleaving. The corrupted packets are retransmitted using a selective automatic repeated request (SARQ) technique.

First, a multislot multirate approach with a fix allocation of one code at every slot (maximum net rate of 8 kbps $\times$ 10 = 80 kbps) for each video MS is considered. Tab. 9 shows that this allocation approach works well for CBR traffic. However, the bursty characteristics of VBR traffic produces a very high packet dropped rate. Theoretically, at an average bit rate, 1 video terminal is equivalent to ~19 (64kbps/3.4kbps) speech MSs in a system with perfect statistical multiplexing and slow VADs. On the other, the CDMA/FRMA protocol supports 414 MSs for voice-only traffic. Tab. 9 shows that 1 video user is equivalent to ~18 speech users in both traffic models.

Tab. 9: Number of speech MSs, $P_{loss}=1\%$, and the video dropped rate as a function of the maximum access delay of video terminals. Perfect PC with IFI of 2 frames (20 ms).

$1Ex=10^x$	CDMA/FRMA			CDMA/ALOHA		
	$1\ s$	$60ms$	$40\ ms$	$1\ s$	$60ms$	$40\ ms$
1	392			298		
(CBR)	<1E-6	1.7E-5	2.2E-4	<1E-6	3.9E-5	2.7E-4
3	351			266		
(CBR)	<1E-6	9.1E-6	2.4E-4	<1E-6	3.1E-5	2.5E-4
1	392			298		
(VBR)	1.1E-3	2.5E-2	4.5E-2	7.7E-3	3.0E-2	4.6E-2
3	355			268		
(VBR)	3.9E-3	2.7E-2	4.8E-2	3.5E-3	2.6E-2	4.9E-2

Using again a multislot multirate approach in a TDD symmetric single-switching-point configuration, Tab. 10a shows the effects of imperfect PC in the system capacity. In these results we consider that a VBR video packet can carry 115 information bits per packet instead of 80 bits, as shown in Tab. 9. This results in a significant increase of the VBR video performance. Through extensive simulations, we conclude that similar results are obtained when the system is elaborated to operate in a symmetric TDD multiple-switching-point configuration. In this case the power changes at each slot due to the closed-loop power control. Tab. 10a shows that the dropped video packet rate is practically constant with the standard deviation of the PC error. This occurs because the system is parameterized to a voice packet loss rate of 1%. Finally, these results confirms the superior performance of CDMA/FRMA in relation to the CDMA/ALOHA protocol.

At this point, a CDMA/FRMA protocol with a multicode multirate approach is investigated as follows below. A fixed number of spreading codes per single slot is allocated for every CBR video MS. The number of spreading codes must be enough in order that an average number of the packets generated per frame be transmitted, as well as the eventual corrupted packets. The remaining spreading codes can be dynamically allocated to speech users, since a given target QoS be attended. The same policy can be used for VBR traffic. However, in this article we consider that all available spreading codes at a single slot are allocated to a given VBR video MS.

The results of Tab. 10b take into account that each video packet can carry 80 information bits. Supported by extensive simulations, we can conclude that: (ii) the speech user capacity is weakly dependent upon multirate approach used for CBR video traffic; (ii) the multicode approach permits to decrease the CBR video packet dropped rate that was observed in the multislot scheme with the PC error increase. This occurs due to the reduction of near-far effect, which is caused by different

MSs loading the channel slot when there are spreading codes allocated to a given video MS; (iii) the full code slot allocation policy permits reducing by almost one decade the VBR video packet dropped rate, but, on the other hand, it also generates reduction of the speech users number due to the greater bandwidth allocated to the video MSs; (iv) the elimination of near-far effect due to the full code allocation policy permits to get a more homogeneous packet video dropped rate in relation to the standard deviation of the PC loop.

Tab. 10: Imperfect PC effects in the number of voice users and video dropped rate for CDMA/FRMA and CDMA/ALOHA protocols. Maximum allowable delay for video users is 60 ms. IFI of 2 frames. $1Ex=10^x$.

Tab. 10a : Multislot approach: 1 code per MS at each slot.

M_{vd}	σ_{pc}	CDMA/FRMA			CDMA/ALOHA		
		1 dB	2 dB	2.5 dB	1 dB	2 dB	2.5 dB
1 (CBR)		317	196	145	247	154	107
		5.7E-6	1.4E-6	4.3E-6	5.4E-6	5.8E-6	5.7E-6
3 (CBR)		274	155	105	213	120	75
		4.5E-6	4.3E-6	2.3E-6	9.1E-6	6.2E-6	2.9E-6
1 (VBR)		316	200	149	252	158	111
		9.1E-4	1.2E-3	2.2E-3	6.5E-4	1.5E-3	1.2E-3
3 (VBR)		278	161	112	224	129	86
		8.9E-4	1.5E-3	1.6E-3	1.4E-3	8.4E-4	1.0E-3

Tab. 10b : CDMA/FRMA protocol performance using multicode approach for video traffic: (i) CBR: 10 codes per video MS per slot; (ii) VBR: 18 codes per MS per slot.

M_{vd}	σ_{pc}	CBR			VBR		
		0 dB	1 dB	2 dB	0 dB	1 dB	2 dB
1		388	314	194	365	303	195
		3.7E-5	3.7E-5	<1E-6	7.1E-5	5.7E-5	6.2E-5
2		362	290	170	323	266	170
		1.1E-5	2.5E-5	<1E-6	6.5E-5	5.3E-5	6.4E-5
3		342	269	149	281	231	149
		<1E-6	<1E-6	<1E-6	6.0E-5	5.8E-5	5.6E-5

Performance of CDMA/FRMA and CDMA/ALOHA systems with a mixed voice and WWW browsing traffic

Firstly, the ETSI WWW browsing model described in [13] is summarized. In a section, a data MS performs one or more packet call requests, which is a geometric random variable, N_{pc} , with an average number of packet calls $\mu_{N_{pc}}$ of 5. The interarrival time between two packet call requests, D_{pc} , is a exponential random variable with mean $\mu_{D_{pc}}$ of 4 s. A new packet request only starts when all packets of the earlier call request are received by the opposite partner. The number of packets in a packet call request, N_d , is geometrically distributed with mean μ_{N_d} of 25. The interpacket time inside a packet call is a

exponential random variable with mean $\mu_{D_{pc}}$ of 0.5 s. The size of packets in bytes is modeled by a truncated Pareto distribution with a shape parameter (Noah factor) of 1.1, a location parameter of 81.5 and maximum value of 67 kbytes. This produces a mean of 481 bytes and "peak" rate of roughly 8 kbps. Each simulation run is started with a given fixed number of data terminals. A new user, with exponential interarrival time with mean of 2 s, is generated when a given data MS ended its all packets transmission requests. Different WWW loading traffic are generated by modifying the initial number of data MSs. A FIFO buffer and a SARQ policy for WWW users is used. In this paper, we do not consider that the packets can be lost due to buffer overflow. Simulation studies on the effects of long rang dependence (LRD) traffic in the buffer design can be found in [14]. Succinctly, they clearly show that the source intensity of the Noah effect can significantly reduce the buffering gain, such that increasing the buffer size beyond a given value produces a minor decrease in the packet loss rate.

The CDMA/FRMA and CDMA/ALOHA voice packet loss rate against the mean channel load, G , is shown in Fig. 7. The channel load includes all voice and data packets received by the BS. The total delay shown is defined as the time between the arrival of a packet in the buffer and the end of the successful transmission. We use the probability permission access policy proposed in [5]. Therefore, the i th slot access permission is only granted to data MSs if all estimated access users can contend for reservation ($p_{s,i} \geq 1$),

$$P_{d,i} = \frac{K_{opt} - K_{res,i} - (M - \sum_{i=1}^N K_{res,i}) P_{ST}}{M_d} \quad (14)$$

where M_d is the number of data terminals in a cell. We use a multislot multirate scheme where a given data MS can allocate one spreading code at every slot. We set the maximum allocation cycle to 100 frames (i.e., mean frame number used in a typical voice talkspurt using slow VADs), where the resources that are no more used are dynamically released.

For voice-only traffic, the CDMA/FRMA and CDMA/ALOHA capacity is respectively 415 ($\sim 0.425 \times 415 / 10 \approx 17.6$ users/ slot) and 315 for a P_{loss} of 1%. The voice and data MSs have free access to the channel in the CDMA/ALOHA protocol. In [13], it is defined the access delay as the time arrival between a request at the MS MAC entity and the end of a successful transmission. We observe that, for both protocols, the access delay is ~ 4.5 ms for the data loads considered. This is due to the fact that the packet access scheduling is postponed to the beginning of the next frame. Therefore, the access delay and the total delay observed in the

CDMA/ALOHA (for all loads) and CDMA/PRMA (for low load of data traffic) systems indicate that it is imperative to dynamically allocate a high bandwidth to data users to obtain a stringent QoS. The observed delays for high load data in the CDMA/PRMA protocol is a superposition of delays, the first necessary to obtain reservation and the second to transmit the packet spurts

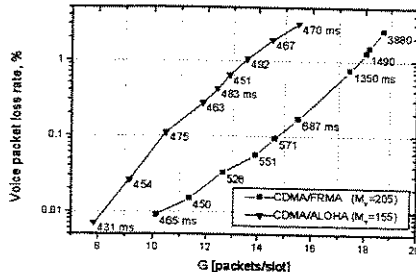


Fig. 7: CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA performance for mixed voice/WWW browsing traffic.

Figure 8 shows some CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA curves when a WWW MSs can allocate until 20 spreading codes per frame. At this point, the system is designed to have 20 slots per frame to accomplish this multislot multirate approach. The CDMA/PRMA protocol has an almost linear relation between the speech capacity and the number of slots per frame, as well as with the processing gain. Therefore, the processing gain is set to 8 to maintain a similar voice-only capacity obtained in an earlier study case. For voice-only traffic, the CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA capacity is respectively 430 and 257 for a P_{loss} of 1%. Although high enough, we observe, by comparing Fig. 7 and Fig. 8, a smaller total access delay.

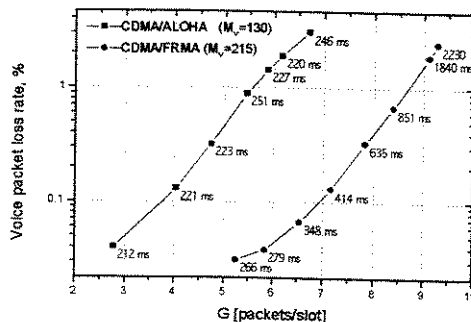


Fig. 8: CDMA/PRMA and CDMA/ALOHA performance for mixed voice/WWW browsing traffic. For the system parameters, unless of $G_p=8$, $N=20$ slots and $D=40$ slots, it is referred to Tab. 5.

Conclusions

Firstly, we have developed numerical expressions to evaluate the voice-only traffic CDMA/PRMA performance. Then, we have shown that the CDMA/PRMA protocol is highly flexible in relation to design parameters choice. We have also verified the

superior performance of the CDMA/PRMA protocol over CDMA/ALOHA system in a mixed voice/video and voice/WWW browsing traffic environments.

References

- 1 Brand, A. E., Aghvami A. H.: "Performance of a Joint CDMA/PRMA Protocol for Mixed Voice/Data Transmission for Third Generation Mobile Communication", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 14, no.9, pp. 1698-1707, Dec. 1996
- 2 Nanda, S., Goodman, D. J., Timor, U.: "Performance of PRMA: a Packet Voice Protocol for Cellular Systems," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 40, n.3, pp. 584-598, Aug.1991.
- 3 Amitay, N., Nanda, S.: "Resource Auction Multiple Access (RAMA) for Statistical Multiplexing of Speech in Wireless PCS," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 584-595, Aug. 1994.
- 4 Hoefel, R. P. F., de Almeida, C.: "Numerical Analysis of a Joint CDMA/PRMA Protocol Based on Equilibrium Point Analysis," *Electronics Letters*, vol. 35, no.24, pp.2093-2095, 25th Nov 1999.
- 5 Wang, L., Jianjun, W., Aghvami A. H.: "Performance of CDMA/PRMA with Adaptive Permission Probability Control in Packet Radio Networks," *Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC'99 Spring)*, Houston, USA 1999.
- 6 Ojaperä, T., Prasad R.: "Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications," Artech House, 1998.
- 7 Hoefel, R. P. F., de Almeida, C.: "On the Capacity of CDMA/PRMA Systems", *Wireless Personal Communications: Emerging Technologies for Enhanced Communications*, Tranter, W. H, Rappaport, T. S et. al. (eds.), Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 315-326.
- 8 Gudmundson, M.: "Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio Systems," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2145-2146, Nov. 1991.
- 9 Hoefel, R. P. F., de Almeida, C.: "The Performance of CDMA/PRMA for Nakagami-m Frequency Selective Fading Channel," *Electronics Letters*, vol. 35, no.1, pp.28-29, Jan. 1999.
- 10 Foerster, J. R., Milstein, L.: "Analysis of Hybrid, Coherent FDMA/CDMA Systems in Ricean Multipath Fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no.1, pp. 15-18, Jan. 1997.
- 11 Skelly P., Schwartz M., Dixit M.: "A Histogram-Based Model for Video Traffic Behavior in a ATM multiplexer," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 1, no. 4, pp. 446-459, Aug. 1993.
- 12 Uziel, A. and Tumala, M.: "Modeling of Low Data Rate Services for Mobile ATM," *Proceedings of IEEE 1997, PRIMC*, pp. 194-198, Finland, 1997.
- 13 Brand, A. E. Aghvami A. H.: "Multidimensional PRMA with Prioritized Bayesian Broadcast - a MAC Strategy for Multiservice Traffic over UMTS," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 47, no. 4, pp. 1148-1161, Nov. 1998.
- 14 Wang, M., Wang Z. S., Lu, Wei and Chen, D. R.: "Performance of a Joint CDMA/PRMA Protocol with Heavy-Tailed ON/OFF Source," *Wireless Networks*, 5(1999), pp. 157-162.

ANEXO E

DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA COM DETECTOR CONJUNTO DESCORRELACIONADOR

E.1 INTRODUÇÃO

Sistemas celulares com interface do ar DS-CDMA empregam três tipos de controle de potência: de malha aberta, de malha fechada e do laço externo [ETSI98, p. 45, p. 75]. É extremamente complexa a implementação integrada desses algoritmos ao se utilizar transmissão descontinua no modo FDD. Sendo este um dos principais fatores que levam à implementação dos protocolos de múltiplo acesso híbridos TD-CDMA no modo TDD. Estes sistemas utilizam a estrutura de quadros dos sistemas TDMA, permitindo, porém, que distintos usuários possam acessar simultaneamente um slot por meio da técnica DS-SS.

Sistemas de terceira geração consideram a implementação de receptores com detecção conjunta dos usuários (MUD do inglês *Multiuser Detection*) [ETSI98, p. 72], [PAI99]. Nesta última Seção é investigado o desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA com receptor de detecção conjunta descorrelacionadora.

E.2 MODELAGEM TEÓRICA

É empregado um modelo de canal na banda básica, denominado de canal CDMA síncrono para K usuários, no qual o sinal recebido consiste na soma de K formas de onda de assinatura síncronas moduladas antipodalmente superpostas ao ruído aditivo Gaussiano branco, ou seja,

$$y(t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j\theta_k} b_k s_k(t) + n(t), \quad t \in [0, T] \quad (E.1)$$

onde T é período de símbolo; $b_k \in \{-1, +1\}$ é o bit transmitido pelo k -ésimo usuário; A_k e θ_k é a envoltória e a fase, respectivamente, introduzidas pelo canal observado pelo k -ésimo usuário; $n(t)$ denota o ruído Gaussiano complexo, onde as componentes em fase e em quadratura tem média nula e desvio padrão σ ; $s_k(t)$ é a envoltória complexa da assinatura do k -ésimo usuário

$$s_k(t) = C_N \sum_{i=1}^{G_p} [(2cf_{k,i} - 1) + j(2cq_{k,i} - 1)] p_{T_c}(t - (i-1)T_c) \quad (E.2)$$

onde p_{T_c} é uma forma de onda de chip determinística (assumida retangular neste artigo), T_c é o período de chip, G_p é número de chips por bit (ganho de processamento), e cf_k e cq_k são as seqüências de espalhamento unipolares em fase e em quadratura, respectivamente, que particularizam o k -ésimo usuário. Nota-se que a forma de onda de assinatura é normalizada (através da constante C_N) para ter energia unitária, ou seja, $\|s_k\|^2 = 1$. Finalmente, observa-se que a envoltória complexa do AWGN $n(t)$ tem densidade espectral de potência unilateral $N_0 = \sigma^2$.

Considera-se a utilização de um banco de filtros casados para converter a forma de onda contínua recebida em um processo discreto, ou seja, [VER98, p.56]

$$y_k = \langle y, s_k \rangle = \int_0^T y(t) s_k^*(t) dt = A_k e^{j\theta_k} b_k + \sum_{j \neq k} A_j e^{j\theta_j} b_j \rho_{kj} + n_k \quad (\text{E.3})$$

onde * denota conjugado complexo, e a correlação cruzada entre as assinaturas $s_k(t)$ e $s_j(t)$ e a componente de ruído térmico são fornecidas, respectivamente, por

$$\rho_{kj} = \int_0^T s_k^*(t) s_j(t) dt \quad (\text{E.4})$$

$$n_k = \int_0^T s_k^*(t) n(t) dt \quad (\text{E.5})$$

Na forma vetorial, a Eq. (3) pode ser expressa por¹:

$$\mathbf{y} = \mathbf{R}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n} \quad (\text{E.6})$$

onde $\mathbf{R}$ é uma matriz Hermitiana complexa, positiva definida, de correlações cruzadas normalizadas (cujo elemento (k,j) é $R_{kj} = \rho_{kj}$),

$$\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_K]^T \quad (\text{E.7})$$

$$\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_K]^T \quad (\text{E.8})$$

$$\mathbf{A} = \text{diag}[A_1 e^{j\theta_1}, \dots, A_K e^{j\theta_K}]^T \quad (\text{E.9})$$

e $\mathbf{n}$ um vetor Gaussiano complexo com componentes real e imaginária independentes, média nula e matriz de covariância dada por

$$\text{Cov}[\mathbf{n}] \equiv \frac{1}{2} E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] = \sigma^2 \mathbf{R} \quad (\text{E.10})$$

onde o sobrescrito H denota transposição complexa conjugada.

Convencionalmente, sistemas DS-CDMA utilizam receptores SUD (Single User Detector), onde o bit transmitido pelo k-ésimo usuário é coerentemente estimado através de

$$\hat{b}_k = \text{sgn}[\Re\{\mathbf{y}\}_k e^{-j\theta_k}] = \text{sgn}[\Re\{\mathbf{R}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n}\}_k e^{-j\theta_k}] \quad (\text{E.11})$$

onde $\text{sgn}(\cdot)$ é a função sinal, $\Re(z)$ a parte real do número complexo z ; $(\mathbf{y})_k$ denota a k-ésima componente do vetor $\mathbf{y}$. Utilizando-se o conceito de valor médio como uma VA [Pap91, p.162-172], a taxa de erro de bit “instantânea” pode ser aproximada por

$$P_{e_i} = Q\left(\sqrt{E[RSI_i / P_1, \dots, P_K]}\right) \quad (\text{E.12})$$

onde $Q(x)$ denota a função Gaussiana-Q. Utilizando-se códigos aleatórios em um canal AWGN limitado por interferência, então a RSI em um sistema síncrono pode ser expressa por

¹ Vetores e matrizes são denotados por letras minúsculas e maiúsculas, respectivamente, em negrito.

$$E[RSI_i / P_1, \dots, P_K] = \frac{G_p P_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^K P_j} \quad (E.13)$$

onde P_i é a potência recebida devida ao i -ésimo usuário [Mor89]. A RSI, quando os $(K-1)$ sinais interferentes possuem atrasos e fases aleatórias (canal assíncrono), é ainda fornecida por (E.13), porém substituindo-se G_p por $3G_p$ [Mor89]. Retomando o receptor MUD-D (Multiuser Detector Decorrelator) e supondo que a matriz de correlações cruzadas seja passível de ser invertida, então é possível demodular coerentemente o bit transmitido pelo k -ésimo através da seguinte relação [Ver98, p. 234]

$$\hat{b}_k = \text{sgn} \left[\Re \left\{ \left(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \right)_k e^{-j\theta_k} \right\} \right] = \text{sgn} \left[\Re \left\{ \left(\mathbf{A} \mathbf{b} + \mathbf{R}^{-1} \mathbf{n} \right)_k e^{-j\theta_k} \right\} \right] \quad (E.14)$$

Analisando-se cuidadosamente a expressão acima verifica-se que a VA real utilizada para decisão possui somente duas componentes: uma devida ao sinal do k -ésimo usuário, que é igual a $A_k b_k$, e outra devido ao ruído térmico, que é uma VA Gaussiana com média nula e variância dada pela parte real da componente kk da matriz de covariância:

$$\text{Cov} \left[\Re \left\{ \mathbf{R}^{-1} \mathbf{n} \right\} \right] = \frac{1}{2} E \left[\Re \left\{ \left(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{n} \right) \left(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{n} \right)^H \right\} \right] = \sigma^2 \mathbf{R}^{-1} \quad (E.15)$$

Assim, verifica-se imediatamente que a BER para o k -ésimo usuário é dada por

$$P_{e,k} = Q \left(\frac{A_k}{\sigma \sqrt{(\mathbf{R}^{-1})_{kk}}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2E_{b,k}}{N_0 (\mathbf{R}^{-1})_{kk}}} \right) \quad (E.16)$$

onde $E_{b,k} = \frac{A_k^2}{2}$ é a energia de bit do k -ésimo usuário.

Quando da utilização de um código corretor de erros linear de bloco e decodificação abrupta, a probabilidade de um pacote ser recebido com sucesso é dada por

$$Q_E = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (P_e)^i (1-P_e)^{n-i} \quad (E.17)$$

onde n é o tamanho da palavra código, t é a capacidade de correção do código e P_e é a BER do canal sem codificação. Subjacente a esta modelagem está a utilização do modelo do canal binário simétrico (BSC do inglês *Binary Symmetric Channel*). Este emprego é justificado pela aplicação do teorema do espaço de momentos, conforme a Seção 2.5, de tal forma que a utilização do BSC conduz a um limitante superior do desempenho na região de operação nominal do protocolo.

E.3 DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS CDMA/PRMA E CDMA/ALOHA

Na Fig. 11 da referência [Lup89], Lupas e Verdu mostram a probabilidade de erro de bit obtida com a utilização de SUDs e MUDs em canais assíncronos com CP perfeito. Estes resultados, mostrados em função da RSR de bit, são convenientemente repetidos na Fig. E.1 sob o rótulo MUD-D (SUD) assíncrono com

$\sigma_{pc}=0$ dB. Comparando estes resultados com os demais, obtidos neste artigo com o uso de seqüências de assinatura aleatórias, ressalta-se: (i) a semelhança dos resultados obtidos com MUD-D síncrono e assíncrono. Nota-se que, diferentemente do que ocorre ao se utilizar um receptor convencional com seqüências de espalhamento aleatórias (vide Tab. E.1), no MUD-D a falta sincronismo não propiciou um aumento no cancelamento da interferência. Isto ocorre porque estes últimos receptores têm por paradigma o cancelamento, e não somente a atenuação, da interferência (vide Eq. E.14). Contudo, a simulação e a implementação de MUDs assíncronos apresentam uma maior complexidade em relação aos receptores síncronos [Ver95]; (ii) o efetivo cancelamento da IMA pelo MUD-D faz com que seu desempenho se aproxime do observado quando o ruído térmico é a única fonte de interferência.

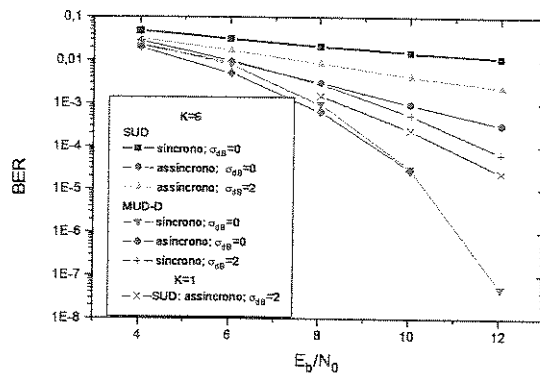


Figura E.1- BER versus E_b/N_0 para K usuários no canal em um sistema sem codificação. Resultados parametrizados pelo tipo de receptor, modelo de canal (síncrono ou assíncrono), CP (perfeito ou $\sigma_{pc}=2$ dB). Ganho de processamento (G_p) igual a 31.

Tabela E.1 - Efeitos do CP imperfeito na capacidade do protocolo CDMA/PRMA com receptor SUD. Sistema uncelular com modelagem síncrona e assíncrona, onde a IMA é modelada como uma densidade espectral de potência plana. Configuração: $G_p=16$; $T_f=10$ ms; $N_{slots}=10$ slots; $D=20$ slots; BCH(255,115,21).

Canal	Síncrono	Assíncrono
σ_{cp} , dB		
0	129	410
1	106	339
	105	335
2	77	221
	64	214
3	42	128
	38	117

E.3.1 Controle de potência imperfeito

Os resultados mostrados nesta Seção consideram que $E_{b,k}/N_0$ na Eq. (E.16) é modelado por uma VA log-normal, cujo desvio padrão modela o nível das imperfeições no CP. Nota-se que esta modelagem é corroborada pelas conclusões obtidas no Capítulo 4.

Os efeitos do ruído térmico foram desconsiderados nos resultados mostrados na Tab. E.1. A capacidade do protocolo CDMA/PRMA (CDMA/ALOHA) com SUD em um canal assíncrono, $G_p=16$, $E_b/N_0=10$ dB, $P_{perda} \approx 1\%$ é 357 (271) para $\sigma_{db}=0$ e 128 (94) para $\sigma_{db}=2,5$ dB. Comparando estes resultados com os mostrados na Fig. E.2 verifica-se que a utilização de sistemas com MUD-D produz um significativo ganho de capacidade no caso de CP imperfeito. Contudo, os sistemas com SUD apresentam um melhor desempenho para CP perfeito. Este aparente paradoxo (sistema que cancela a IMA ter um desempenho inferior ao sistema que apenas atenua a interferência) é desfeito quando se verifica que o número ótimo de usuários no canal é de 16 EMs ($P_{perda}=1\%$) no sistema que emprega SUD com o código BCH especificado. Nesta carga o desempenho do MUD-D é substancialmente degradado, pois o sistema opera com um ganho de processamento de 1E. Analisando-se a Fig. E.2, também pode ser verificado: (i) o substancial ganho de capacidade obtido pelo protocolo CDMA/PRMA em relação ao protocolo CDMA/ALOHA para CP perfeito e CP imperfeito com $\sigma_{pc}=2,5$ dB; (ii) a redução deste ganho no caso em que o CP é extremamente ineficiente.

A Fig. E.3 mostra que o mecanismo de acesso irrestrito ao canal do protocolo CDMA/ALOHA faz com que a carga no canal flutue significativamente em torno de seu valor médio. Nota-se que para o protocolo CDMA/PRMA a carga no canal pode ser modelada por uma VA binomial, cujo limite superior pode ser aproximado por $K_{ot}+1$, onde K_{ot} é o número nominal de usuários no canal que satisfaz a perda de pacotes requerida (vide Seções 2.8 e 2.20). Portanto, o ganho de capacidade do protocolo CDMA/PRMA pode ser explicado pela menor variação da carga no canal, visto que o desempenho do MUD-D é substancialmente degradado quando o número de usuários no canal se aproxima do ganho de processamento do sistema. Finalmente, observa-se que a degradação do desempenho para $\sigma_{pc}=4$ dB deve-se mais à variação da potência do sinal desejado que aos efeitos da IMA. Em outras palavras, não há potência suficiente para combater o desvanecimento profundo a que a envoltória do sinal desejado é freqüentemente submetida.

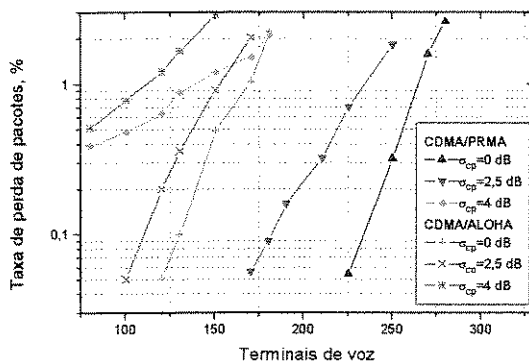


Figura E.2 – Efeitos das imprecisões do CP no desempenho dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA equipados com MUD-D. Sistema unicelular com $E_b/N_0=10$ dB. Configuração: $G_p=16$; $T_f=10$ ms; $N_{slots}=10$ slots; $D=20$ slots; BCH(255,115,21).

Os efeitos do aumento da potência do sinal na capacidade do protocolo CDMA/PRMA podem ser verificados ao se comparar a Fig. E.4 com a Fig. E.2. Os resultados com receptor SUD referenciam um canal assíncrono. Evidencia-se o ganho de capacidade devido ao cancelamento da IMA propiciado pelo receptor MUD-D.

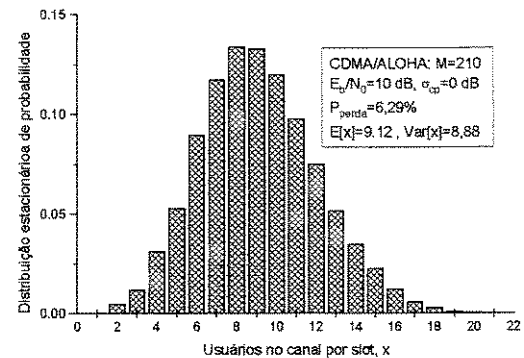


Figura E.3 – Distribuição estacionária de probabilidade da carga no canal para o sistema CDMA/ALOHA com 210 EMs de voz.

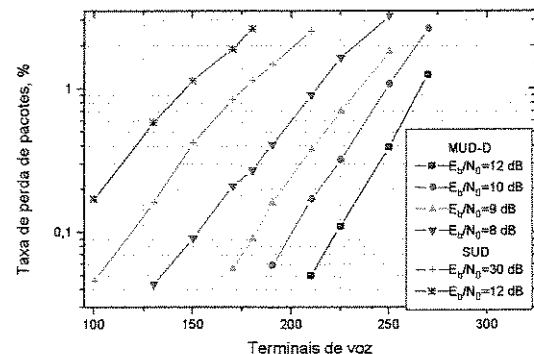


Figura E.4 – Efeitos de E_b/N_0 no desempenho do protocolo CDMA/PRMA. CP imperfeito com $\sigma_{cp}=2,5$ dB. Configuração: MUD-D (vide Fig. E.2).

Estes resultados indicam que o efetivo cancelamento da IMA propiciado pelo MUD-D faz com que a energia recebida do sinal, e não a IMA, seja a responsável pela limitação da capacidade. Nota-se que esta conclusão

pressupõe que a carga no canal não seja tão elevada a ponto de afetar o desempenho do MUD-D.

E.3.2 Desvanecimento plano do tipo Nakagami-m

Primeiramente, ressalta-se que a VA Nakagami-m é gerada de acordo com o método proposto em [Hoe99a] (vide Seção 4.4). Neste trabalho, também se mostram resultados que corroboram a modelagem da IMA como uma densidade espectral de potência plana para canais com desvanecimento Nakagami-m. Portanto, $E_{b,k}/N_0$ na Eq. (E.16) pode ser modelado por uma VA gama, visto que quando A_k é uma VA Nakagami-m, então A_k^2 é uma VA gama.

A Fig. E.5 mostra claramente que: (i) o desempenho do protocolo CDMA/ALOHA se aproxima do obtido pelo sistema CDMA/PRMA quando a variação da carga do canal não é suficientemente alta para afetar o desempenho do MUD; (ii) o desempenho dos sistema é limitado por E_b/N_0 até o momento em que o desempenho do MUD-D começa degradar. Ressalta-se, novamente, que isto ocorre quando o número de usuários no canal atinge valores próximos do ganho de processamento do sistema. Observa-se que $m=1,8$ (m é a figura de desvanecimento da VA Nakagami-m) modela um canal do tipo Rice, onde a razão da potência do sinal de linha de visada e a potência recebida nos caminhos sem linha de visada é de 3 dB [Pra98, p. 41-44].

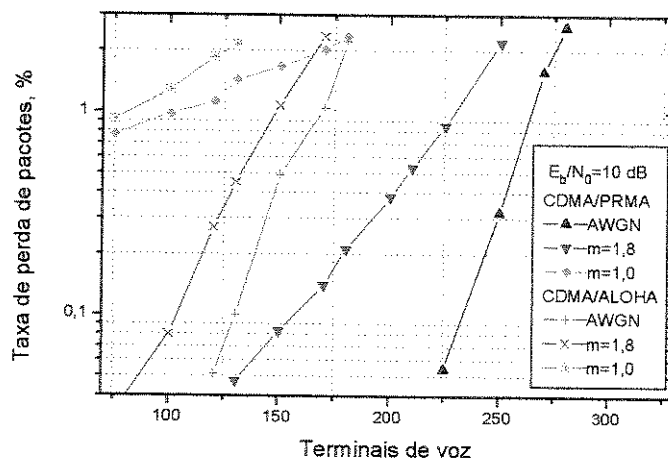


Figura E.5 – Capacidade dos protocolos CDMA/PRMA e CDMA/ALOHA em um canal com desvanecimento plano Nakagami-m. Configuração: MUD-D (vide Fig. E.2).

E.4 COMENTÁRIOS FINAIS

O desempenho obtido pelo protocolo CDMA/PRMA com MUD-D tem motivado a continuidade das atividades de pesquisa visando o projeto integrado de sistemas de pacotes e técnicas avançadas de processamento de sinais. Entre as atividades em andamento, destaca-se a incorporação de receptores MUD no simulador de redes de pacotes apresentado no Cap. 4, com o objetivo de investigar os efeitos da interferência externa, o estudo de não-idealidades no desempenho (falsa aquisição de um código, por exemplo), canais com desvanecimento seletivo, projeto integrado de receptores MUD.