

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
ÁREA DE SISTEMAS ELETRÔNICOS**

**ANÁLISE DO USO DA ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CANAIS EM SISTEMAS
DE TELEFONIA CELULAR**

Benedito José Barreto Fonseca Júnior

SÃO PAULO
1999

Benedito José Barreto Fonseca Júnior

**ANÁLISE DO USO DA ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CANAIS EM SISTEMAS
DE TELEFONIA CELULAR**

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

Área de Concentração :
Sistemas Eletrônicos.

Orientador :
Dr. Paul Jean Etienne Jeszensky.

SÃO PAULO
1999

Fonseca Júnior, Benedito José Barreto

Análise do Uso da Alocação Dinâmica de Canais em Sistemas de Telefonia Celular

São Paulo 1999

p. 267

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

1. Telefonia Celular, 2. FDMA, 3. TDMA, 4. DCA

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

*à Patrícia, pelo seu amor,
compreensão e apoio.*

*aos meus pais, por me ensinarem
a nunca me impor limites.*

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Paul Jean Etienne Jeszensky, pela sua orientação, conselhos e compreensão.

À Patrícia van Hoesel, pelo seu apoio durante todo o período de meus estudos e pela sua ajuda na construção dos desenhos.

A meu amigo e colega de profissão Cláudio Badin, pelas suas sugestões, interesse e valiosas discussões.

Índice

Lista de Abreviaturas

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Resumo

"Abstract"

1.Introdução.....	1
2.Alocação Fixa de Canais (FCA).....	3
2.1. Princípios Básicos de Sistemas de Telefonia Celular	3
2.1.1. Processamento de uma Chamada.....	3
2.1.2. Conceito de Reutilização de Canais.....	4
2.2. Problemas da Alocação Fixa de Canais	5
2.2.1. Planejamento de Freqüências / Canais.....	6
2.2.2. Previsão de Tráfego Gerado	7
2.2.3. Expansões e Modificações.....	7
2.2.4. Variações no Grau-de-Serviço Oferecido ao Usuário	8
2.2.5. Queda de Troncalização	9
2.2.6. Margens de Projeto Prejudicando Capacidade e Flexibilidade do Sistema	9
3. Alocação Dinâmica de Canais (DCA)	10
3.1. Algoritmos DCA Adaptativos a Tráfego (DCA-AT)	11
3.1.1. Filosofia Básica de Funcionamento	12
3.1.2. Algoritmo "Maximum Packing"	14
3.1.3. Outros Algoritmos DCA-AT	15

3.1.4. Análise Teórica	17
3.1.4.1. Intervalo de Variação do Ganho de Capacidade.....	18
3.1.4.2. Interdependência de Parâmetros	21
3.1.4.3. Impacto da Variação de Parâmetros.....	23
3.1.4.3.1. Variação no Número de Canais Disponíveis no Sistema	23
3.1.4.3.2. Efeito da Variação do Número de Células no "Cluster", no Fator de Compactação " δ " e no Ponto de Referência de Probabilidade de Bloqueio.....	24
3.1.4.3.3. Efeito da Variação do SIR Mínimo de Chamadas e do Coeficiente de Propagação.....	25
3.1.4.4. Impacto do Controle de Potência	26
3.1.5. Desempenhos Reportados na Literatura.....	26
3.1.5.1. Desempenhos em Situações de Tráfego Uniforme.....	27
3.1.5.2. Desempenhos em Situações de Concentração de Tráfego	28
3.1.6. Benefícios de Algoritmos DCA-AT	29
3.1.7. Dificuldades de Implementação	29
3.2. Algoritmos DCA Adaptativos a Interferência (DCA-AI).....	30
3.2.1. Filosofia Básica de Funcionamento	30
3.2.1.1. Funcionamento Distribuído	30
3.2.1.2. Planejamento Automático de Frequência e Reconfiguração Automática de Sistema	32
3.2.1.3. Adaptabilidade à Variações de Tráfego	33
3.2.1.4. Flexibilização da Distância de Reuso de Canais.....	33
3.2.2. Algoritmo DCA-AI "Maximum Packing" (DCA-AI-MP)	35
3.2.3. Algoritmos DCA-AI Descentralizados.....	37
3.2.3.1. Tipos de Algoritmos DCA-AI Descentralizados	37
3.2.4. Análise Teórica	40

3.2.4.1. Análise de Ganho de Capacidade devido à Flexibilização do Reuso de Canais - sem Controle de Potência.....	41
3.2.4.2. Análise de Ganho de Capacidade devido à Flexibilização do Reuso de Canais - com Controle de Potência.....	44
3.2.4.3. Intervalo de Variação do Ganho Composto de Capacidade de Algoritmos DCA-AI	46
3.2.5. Algoritmos Propostos na Literatura	48
3.2.5.1. Algoritmos DCA-AI Centralizados	49
3.2.5.2. Algoritmos DCA-AI Descentralizados.....	49
3.2.5.2.1. Seleção Baseada na Melhor Qualidade	50
3.2.5.2.2. Seleção Randômica	51
3.2.5.2.3. Seleção Baseada no Melhor Preço	52
3.2.5.2.4. Seleção com Prioridade Baseada em Alocações Passadas	53
3.2.5.2.5. Seleção com Prioridade Baseada na Partição de Reuso.....	55
3.2.5.3. Discussão dos Resultados	58
3.2.6. Benefícios de Algoritmos DCA - AI.....	60
3.2.7. Dificuldades de Implementação	60
4. Análise de Desempenho de Algoritmos DCA Adaptativos a Interferência em Sistemas FDMA / Analógicos	62
4.1. Foco de Pesquisa	62
4.1.1. Algoritmos de Alocação de Canais Considerados	63
4.1.1.1. Algoritmo FCA (Alocação Fixa de Canais).....	63
4.1.1.2. Algoritmo DCA de Melhor Qualidade (QUAL)	65
4.1.1.3. Algoritmo DCA de Melhor Preço (PREÇO)	66
4.1.1.4. Algoritmo DCA Randômico	67
4.1.1.5. Algoritmo DCA de Segregação de Canais (“Channel Segregation” - CHANSG).....	68

4.1.1.6. Algoritmo DCA de Partição de Reuso ("Reuse Partitioning" - RUP) ...	70
4.1.2. Cenário de Simulação	71
4.1.3. Medidas de Desempenho	72
4.2. Análise de Desempenho de Algoritmos DCA-AI: sem Controle de Potência	76
4.2.1. Comportamento de Algoritmos DCA-AI na Condição de Máxima Capacidade	76
4.2.2. Análise de Ganho de Capacidade de Algoritmos DCA-AI na Condição de Máxima Capacidade	80
4.2.2.1. Qualidade (SIR) Média das Chamadas.....	81
4.2.2.2. Estabilidade de Chamadas	83
4.2.2.3. Resumo das Observações	88
4.2.3. Comportamento de Algoritmos DCA-AI com Parâmetros Ajustados para Melhor Qualidade das Chamadas e Estabilidade do Sistema	89
4.2.3.1. Critério de Equalização de Algoritmos	89
4.2.3.2. Verificação da Equalização	91
4.2.3.3 Capacidade de Tráfego.....	94
4.2.3.4 Outras Medidas de Desempenho.....	95
4.2.3.5 Validação dos Resultados Obtidos.....	98
4.2.3.5.1. Validação Teórica.....	98
4.2.3.5.2. Comparação com Resultados Apresentados na Literatura	100
4.2.4. Resumo das Observações	101
4.3. Análise quanto a Forma de Uso do Canal: Controle de Potência	102
4.3.1. Detalhes do Controle de Potência Simulado.....	103
4.3.2. Efeito do Controle de Potência.....	104
4.3.3. Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-AI	110
4.3.4. Análise de Capacidade	111
4.3.4.1. Probabilidade de Bloqueio	111

4.3.4.2. Qualidade das Chamadas.....	113
4.3.4.3. Estabilidade.....	115
4.3.5. Validação dos Resultados.....	117
4.3.5.1. Validação Teórica.....	117
4.3.5.2. Comparação com Resultados Publicados na Literatura.....	119
4.3.6 Resumo das Observações	120
4.4. Influência da Mobilidade de Usuários no Desempenho de Algoritmos DCA-AI	121
4.4.1. Modelo de Mobilidade	123
4.4.2. Cenário de Simulação	124
4.4.3. Análise de Desempenho: Sem Controle de Potência	125
4.4.3.1. Efeito da Mobilidade no Desempenho dos Algoritmos DCA-AI.....	126
4.4.3.2. Comparação do Desempenho dos Algoritmos DCA-AI sob Efeito da Mobilidade.....	128
4.4.3.3. Análise de Capacidade	131
4.4.3.4. Verificação Teórica.....	136
4.4.3.5. Resumo das Observações sobre Mobilidade em Algoritmos DCA sem Controle de Potência	138
4.4.4. Análise de Desempenho: com Controle de Potência	139
4.4.4.1. Efeito da Mobilidade no Desempenho dos Algoritmos DCA-AI com Controle de Potência.....	139
4.4.4.2. Comparação do Desempenho de Algoritmos DCA-AI com e sem Controle de Potência sob Efeito da Mobilidade.....	142
4.4.4.3. Comparação do Desempenho entre Algoritmos DCA-AI com Controle de Potência.....	144
4.4.4.4. Análise de Capacidade de Tráfego dos Algoritmos DCA-AI	147
4.4.4.5. Verificação Teórica.....	151
4.4.4.6. Resumo das Observações sobre Mobilidade em Algoritmos DCA com Controle de Potência	153

4.5. Influência do Número de Transceptores Equipados nas ERBs.....	154
4.5.1 Limitação de Transceptores: Caso sem Controle de Potência.....	155
4.5.2 Limitação de Transceptores: Caso com Controle de Potência.....	158
4.5.3. Resumo das Observações	161
5. Aplicação de DCA em Sistemas TDMA	163
5.1. Imperfeições de Sistemas TDMA Reais.....	164
5.1.1. Falta de Sincronismo.....	164
5.1.2. Dificuldade de Resintonizar Portadoras	166
5.2. Classificação de Algoritmos DCA em Sistemas TDMA.....	168
5.2.1. Algoritmos DCA-TDMA de Portadoras sem Flexibilização de "Time-Slots" (DCA-TDMA-RP)	169
5.2.1.1. Algoritmos DCA-TDMA-RP Adaptativos ao Tráfego (DCA-TDMA-RP-AT)	170
5.2.1.2. Algoritmos DCA-TDMA-RP Adaptativos à Interferência (DCA-TDMA-RP-AI)	171
5.2.2. Algoritmos DCA-TDMA de Portadoras com Flexibilização de "Time-Slots" (DCA-TDMA-RTS).....	172
5.2.2.1. Algoritmos DCA-TDMA-RTS Adaptativos à Tráfego (DCA-TDMA-RTS-AT).....	174
5.2.2.2. Algoritmos DCA-TDMA-RTS Adaptativos à Interferência (DCA-TDMA-RTS-AI)	175
5.2.2.2.1. Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI para Sistemas DECT	176
5.2.3. Discussão dos Resultados	179
6. Análise de Desempenho de Algoritmos DCA Adaptativos a Interferência em Sistemas TDMA.....	181
6.1. Foco de Pesquisa	181

6.1.1. Algoritmos de Alocação de Canais Considerados	182
6.1.1.1. Algoritmo FCA-TDMA (Alocação Fixa de Canais).....	183
6.1.1.2. DCA-TDMA com Prioridade Baseada em Alocações Passadas (Segregação de Canais - “Channel Segregation”)	183
6.1.1.3. DCA-TDMA "SLOW ACA" (Alocação Adaptativa de Canais de Baixa Velocidade de Adaptação)	184
6.1.1.4. Algoritmo DCA com Prioridade baseada na Localização dos Usuários ("Reuse Partitioning") (DCA-RUP de Portadoras)	186
6.1.2. Cenário de Simulação	188
6.2. Análise de Desempenho: Sem Controle de Potência	189
6.2.1. Comparação de Desempenho de Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com Sincronismo entre Portadoras.....	190
6.2.2. Efeito da Falta de Sincronismo entre Portadoras.....	193
6.2.3. Comparação de Desempenho de Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem Sincronismo entre Portadoras.....	198
6.2.4. Análise de Capacidade de Algoritmos.....	199
6.2.5. Resumo das Observações	202
6.3. Análise de Desempenho: Com Controle de Potência	203
6.3.1. Efeito do Controle de Potência em Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI	204
6.3.2. Efeito da Falta de Sincronismo em Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI- BPC.....	208
6.3.3. Efeito do Controle de Potência em Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com Falta de Sincronismo.....	210
6.3.4. Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com Controle de Potência	211
6.3.4.1. Comparação de Algoritmos com Sincronismo	211
6.3.4.2. Comparação de Algoritmos sem Sincronismo	214
6.3.5. Análise de Capacidade de Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com Controle de Potência.....	216
6.3.6. Resumo das Observações	218

7. Conclusões Finais	220
8. Estudos Futuros.....	225
9. Bibliografia	230
Apêndice A: Modelamento do Simulador e Componentes.....	237
A.1 Objetivos do Modelamento	237
A.2 Conceitos Básicos do Sistema Simulador	238
A.2.1. Modelamento Espacial.....	238
A.2.2. Independência entre Geração de Chamadas e Sistema Celular	239
A.2.3 Modelamento do Sistema Celular por Variáveis de Estado	241
A.2.4 Modelamento da Propagação de Sinais	242
A.2.5 Sistema Determinístico	244
A.2.6 Componentes do Sistema Simulador.....	244
A.3. Módulo Simulador das Chamadas e Mobilidade dos Usuários.....	245
A.4. Módulo Gerador do Ambiente Celular.....	248
A.5. Módulo Simulador do Sistema Celular.....	249
A.5.1. Introdução e Filosofia do Módulo	249
A.5.2. Diagrama de Blocos do Módulo Simulador	250
A.5.2.1. Fila de Mensagens dos Módulos	255
A.6. Módulo de Análise do Simulador	257
A.6.1. Arquivo de Histogramas.....	257
A.6.2. Arquivo de Estado Estacionário.....	258
A.6.3. Arquivo de Resultados para Tratamento	260

A.6.3.1. Aquisição de Amostras	260
A.6.3.2. Obtenção do Valor da Medida de Desempenho e Intervalo de Confiança	261
A.6.4. Arquivo de Estados	262
A.7 Desempenho do Simulador (Tempo de Execução)	263
A.8 Limitações do Sistema Simulador	265
A.9. Testes de Validação	265
A.10. Futuras Implementações	267

Lista de Abreviaturas

ACCA - All-Channel Concentric Allocation

AMPS - Advanced Mobile Phone System

ARP - Autonomous Reuse Partitioning

BPC - Both Power Control

CCC - Centro de Comando e Controle

CDMA - Code Division Multiple Access

CHANSO - Channel Segregation

DCA - Dynamic Channel Allocation

DCA-AI - Dynamic Channel Allocation-Adaptativos à Interferência

DCA-AI-MP - Dynamic Channel Allocation-Adaptativos à Interferência-Maximum Packing

DCA-AT - Dynamic Channel Allocation-Adaptativos à Tráfego

DCA-TDMA - Dynamic Channel Allocation-Time Division Multiple Access

DCA-TDMA-RP - Dynamic Channel Allocation-Time Division Multiple Access Reuso de Portadoras

DCA-TDMA-RP-AI - Dynamic Channel Allocation-Time Division Multiple Access Reuso de Portadoras-Adaptativos à Interferência

DCA-TDMA-RP-AT - Dynamic Channel Allocation-Time Division Multiple Access Reuso de Portadoras-Adaptativos ao Tráfego

DCA-TDMA-RTS - Dynamic Channel Allocation-Time Division Multiple Access-Reuso de Time-Slot

DCA-TDMA-RTS-AI - Dynamic Channel Allocation-Time Division Multiple Access-

Reuso de Time-Slot-Adaptativos a Interferência

DCA-TDMA-RTS-AT - Dynamic Channel Allocation-Time Division Multiple Access-

Reuso de Time-Slot-Adaptativos a Tráfego

DECT - Digital European Cordless Telecommunications

ERB - Estação Rádio-Base

FA - First Available

FCA - Alocação Fixa de Canais

FDMA - Frequency Division Multiple Access

GSM - Groupe Spéciale Mobiles

MC - Matriz de Compatibilidade

MOP-ACA - Multiple Overlay Priority - Adaptive Channel Allocation

NPC - No Power Control

QUAL - Qualidade

RANDOM - Seleção Randômica

RF - Rádio-Freqüência

RUP - Reuse Partitioning

SIR - Razão Sinal Interferência

SLOW ACA - Alocação com Adaptação Lenta de Canais

SORP - Self Organizing Reuse Partitioning

TDMA - Time Division Multiple Access

TM - Terminal Móvel

TS - Time-Slot

Lista de Figuras

FIGURA	pág
Fig.3.1: Conceito de Células Mutuamente Interferentes (“cluster”).	15
Fig.3.2: Impacto da Alocação de Canais com distância maior que a distância mínima de reuso.	16
Fig.3.3: Exemplo de influência de outros “clusters” impossibilitando o uso do canal “A” pelo “cluster” “B”	19
Fig.3.4: Ilustração do conceito da capacidade de um algoritmo alocar canais de forma compacta e do conceito da parcela “ δ ” para um sistema com 3 células no “cluster”	20
Fig.3.5: TM e ERB decidem quais canais estão disponíveis para a comunicação através de medições de interferência em cada canal do sistema.	31
Fig.3.6: Flexibilização da distância mínima de reuso de canais de algoritmos DCA-AI.	34
Fig.3.7: Similaridade entre compatibilidade de TMs e grafo.	36
Fig.3.8: “Círculos de Reuso” em Algoritmos DCA-AI.	43
Fig.4.1: Fluxograma para Algoritmo FCA considerado.	64
Fig.4.2: Fluxograma para Algoritmo DCA de Melhor Qualidade (QUAL) considerado.	65
Fig.4.3: Fluxograma para Algoritmo DCA de Melhor Preço (PREÇO) considerado.	66
Fig.4.4: Fluxograma para Algoritmo DCA Randômico (RANDOM) considerado.	67

Fig.4.5: Fluxograma para Algoritmo DCA de Segregação de Canais ("Channel Segregation" - CHANSG) considerado.	69
Fig.4.6: Fluxograma para Algoritmo DCA de Partição de Reuso ("Reuse Partitioning" - RUP) considerado.	70
Fig.4.7: Diagrama de Fluxos de chamadas no Sistema Celular utilizando algoritmo DCA-AI.....	74
Fig.4.8: Probabilidade de Bloqueio de Algoritmos FCA e DCA-AI na condição de máxima capacidade, sem controle de potência.	77
Fig.4.9: Histogramas de SIR (TM-ERB) das chamadas nos algoritmos DCA-AI sem controle de potência, ajustados para máxima capacidade, sob o mesmo tráfego gerado	80
Fig.4.10: Médias do SIR médio das chamadas bem sucedidas em sistemas DCA-AI sem controle de potência ajustados para máxima capacidade.	82
Fig.4.11: Probabilidade de queda de chamadas em andamento devido a falha em "intracell handoff" nos algoritmos operando sem controle de potência e ajustados para máxima capacidade.	84
Fig.4.12: Probabilidade de chamada sofrer "intracell handoff" nos algoritmos operando sem controle de potência e ajustados para máxima capacidade.	85
Fig.4.13: Número médio de "intracell handoffs" por chamada bem sucedida nos algoritmos operando sem controle de potência e ajustados para máxima capacidade.	87
Fig.4.14: Probabilidade de queda de chamadas em andamento devido a falha em "intracell handoff" nos algoritmos operando sem controle de potência e com parâmetros ajustados para equalização de qualidade e estabilidade.....	92

Fig.4.15: Histogramas de SIR (TM-ERB) das chamadas nos algoritmos DCA-AI sem controle de potência, ajustados para equalização de qualidade e estabilidade.....	92
Fig.4.16: Probabilidade de Bloqueio de Algoritmos FCA e DCA-AI com parâmetros ajustados para equalização de qualidade e estabilidade em sistema operando sem controle de potência.....	94
Fig.4.17: Medidas adicionais de estabilidade em algoritmos ajustados para equalização de qualidade e estabilidade em sistema operando sem controle de potência. (a) Probabilidade de chamada sofrer "intracell handoff"; (b) número médio de "intracell handoffs" por chamada bem sucedida.	96
Fig.4.18: Variação da potência transmitida nas simulações de controle de potência.	104
Fig.4.19: Controle de Potência permitindo menor probabilidade de bloqueio.	106
Fig.4.20 Histogramas de SIR antes a após a aplicação do controle de potência....	109
Fig.4.21: Probabilidade de bloqueio de novas chamadas para algoritmos operando com controle de potência nas condições de máxima capacidade e de equalização.....	112
Fig.4.22: Histogramas para condição de máxima capacidade com algoritmos com controle de potência operando a 5% de probabilidade de bloqueio	114
Fig.4.23: Histogramas para condição equalizada com algoritmos com controle de potência operando a 5% de probabilidade de bloqueio.	114
Fig.4.24: Probabilidade de queda de chamadas em "intracell handoff" para algoritmos com controle de potência na condição de máxima capacidade e na condição equalizada.	115

Fig.4.25: Probabilidade de chamada sofrer "intracell handoff" para algoritmos com controle de potência na condição de máxima capacidade e na condição equalizada	116
Fig.4.26: número médio de "intracell handoffs" por chamada para algoritmos com controle de potência na condição de máxima capacidade e na condição equalizada.	116
Fig.4.27: Impacto do movimento de um TM operando em um dado canal	122
Fig.4.28: Fluxograma de movimento e início de "intercell handoff".....	123
Fig.4.29: Medidas de Desempenho de Algoritmos operando com 25% de mobilidade, sem controle de potência e sob os mesmos parâmetros.....	131
Fig.4.30: Ganho de Capacidade de Algoritmos DCA-AI sobre algoritmo FCA a 5% de probabilidade de bloqueio com algoritmos equalizados e na condição de sistema operando com 25% de mobilidade.	133
Fig.4.31: (a) Probabilidade de Chamada sofrer "intracell handoff" e (b) Probabilidade de Queda de Chamadas por "intracell handoff" com algoritmos operando a 5% de probabilidade de bloqueio, na condição equalizada e com 25% de mobilidade.	134
Fig.4.32: Número médio de "intracell handoff" por chamada bem sucedida com algoritmos operando na condição equalizada, a 5% de probabilidade de bloqueio e com 25% de mobilidade.	134
Fig.4.33: Histograma de SIR de Chamadas para algoritmos operando no ponto de operação em sistema com 25% de mobilidade.	135
Fig.4.34: Medidas de Desempenho de Algoritmos DCA-AI com controle de potência operando em sistema com 25% de mobilidade e com mesmo conjunto de parâmetros (máxima capacidade)	146

Fig.4.35: Ganho de Capacidade de Algoritmos DCA-AI com controle de potência sobre FCA no ponto de operação, com equalização, e na condição de sistema operando com 25% de mobilidade.	148
Fig.4.36: (a) Probabilidade de Chamada sofrer "intracell handoff" e (b) Probabilidade de Queda de Chamadas por "intracell handoff" com algoritmos operando a 5% de probabilidade de bloqueio, com controle de potência e na condição equalizada e com 25% de mobilidade.	149
Fig.4.37: Histograma de SIR de Chamadas para algoritmos operando a 5% de probabilidade de bloqueio em sistema com controle de potência e com 25% de mobilidade.	150
Fig.4.38: Influência da quantidade de transceptores em algoritmos DCA-AI sem controle de potência e equalizados.	155
Fig.4.39: Variação do SIR médio das chamadas com o tráfego completo para algoritmo QUAL sem controle de potência sob diversos efeitos de limitação de transceptores	158
Fig.4.40: Influência da quantidade de transceptores em algoritmos DCA-AI com controle de potência e equalizados.	159
Fig.5.1: Sistema TDMA totalmente sincronizado, onde "time-slots" da mesma portadora reutilizada em outras células não interferem entre si.	163
Fig.5.2: Interferência adicional gerada pela falta de sincronismo entre portadoras das células.....	164
Fig.5.3: Transceptores de ERBs acessando diferentes portadoras entre "time-slots".	166
Fig.5.4: Exemplo de situação onde transceptor "i" da ERB 1 não pode utilizar os "time-slots" restantes devido à impossibilidade de troca de portadora entre "time-slots".....	167
Fig.5.5: Controle de Potência imperfeito entre "time-slots".	168

Fig.5.6: ERBs vizinhas compartilhando a mesma portadora.....	173
Fig.6.1: Fluxograma do Algoritmo DCA "SLOW ACA" (SLACA)	185
Fig.6.2: Fluxograma do Algoritmo DCA "SLOW ACA" (SLACA) (continuação)	186
Fig.6.3: Fluxograma do Algoritmo DCA-TDMA de Partição de Reuso de Portadoras (RUP).....	187
Fig.6.4: Histogramas de SIR (TM-ERB) para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência, com sincronismo e operando sob a mesma carga (2100 Erlangs).	191
Fig.6.5: Histogramas de SIR (TM-ERB) para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência, com e sem sincronismo	197
Fig.6.6: Histogramas de SIR para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência, sem sincronismo e com parâmetros ajustados para equalização	200
Fig.6.7: Exemplo de Alocações imperfeitas no algoritmo RUP-TDMA.....	206
Fig.6.8: Histogramas de SIR para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência e com sincronismo sob o mesmo tráfego de 1900 Erlangs.....	213
Fig.6.9: Histogramas de SIR para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência e sem sincronismo sob o mesmo tráfego de 1470 Erlangs.....	215
Fig.6.10: Histogramas de SIR para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência e sem sincronismo com parâmetros ajustados para equalização.	217
Fig.A.1: Grade dividindo a área geográfica de serviço.....	239

Fig.A.2: fila de eventos de usuários passada pelo Gerador de Chamadas ao Sistema Simulador.....	240
Fig.A.3: Módulos que Compõe o Sistema Simulador.....	244
Fig.A.4: Fluxograma do Módulo de Geração de Chamadas	247
Fig.A.5: Diagrama de Blocos do Módulo Simulador do Sistema	251
Fig.A.6: Comportamento da variação do número de chamadas ativas no sistema com o decorrer da execução da simulação. O exemplo se refere ao sistema utilizando o algoritmo RUP, com controle de potência, sem mobilidade, com SIR de Aceitação em 19dB e operando com carga gerada de 2500 Erlangs (11% de probabilidade de bloqueio e 5% de probabilidade de queda resultantes).	259

Lista de Tabelas

TABELA	pág
Tabela 3.1: Limites inferior e superior para a parcela " δ " em sistemas hexagonais com "clusters" de 3 e 7 células.....	22
Tabela 3.2: Variação do intervalo da relação entre a capacidade de tráfego de algoritmos DCA-AT sobre algoritmos FCA com a variação do número "N" de células no conjunto mutuamente interferente em sistema linear (unidimensional) com 60 canais, nas condições de 5% e 1% de chamadas bloqueadas.	24
Tabela 3.3: Variação do intervalo da relação entre a capacidade de tráfego de algoritmos DCA-AT sobre algoritmos FCA com a variação do número "N" de células no conjunto mutuamente interferente em sistema hexagonal com 63 canais, nas condições de 5% e 1% de chamadas bloqueadas.	24
Tabela 4.1: Cenário de Simulação: Características do Sistema Celular Simulado	71
Tabela 4.2: Cenário de Simulação: Características de Geração de Chamadas	71
Tabela 4.3: Cenário de Simulação: Características do Modelamento de Propagação.....	72
Tabela 4.4: Cenário de Simulação: Características de Acesso ao Sistema.....	72
Tabela 4.5: Ganhos de capacidade de algoritmos DCA-AI sobre algoritmo FCA com parâmetros ajustados para máxima capacidade, em sistema operando sem controle de potência.	81

Tabela 4.6: Probabilidade de queda por falha em "intracell handoff" e probabilidade de chamada sofrer "intracell handoff" com parâmetros ajustados para máxima capacidade, em níveis de tráfego para 4% de probabilidade de bloqueio, com algoritmos operando sem controle de potência.	85
Tabela 4.7: Níveis de SIR de Aceitação ("SIR_Aceit" e "SIR_Intraho") ajustados para equalização de estabilidade e qualidade em algoritmos sem controle de potência.	91
Tabela 4.8: Efeito da equalização de qualidade na média do SIR médio do sentido TM-ERB das chamadas em sistema operando sem controle de potência.	93
Tabela 4.9: Ganhos de capacidade de algoritmos DCA-AI sobre algoritmo FCA e redução na capacidade dos algoritmo com o ajuste dos parâmetros para equalização de estabilidade e qualidade, em sistema operando sem controle de potência.	95
Tabela 4.10: Efeito da equalização na probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff" e no número médio de "intracell handoffs" por chamada em sistema operando sem controle de potência.	97
Tabela 4.11: Limites Teóricos para algoritmos DCA-AI simulados.	98
Tabela 4.12: Diferenças de número médio de usuários ativos entre as condições de máxima capacidade e com equalização, medidas obtidas a 4% de probabilidade de bloqueio.	99
Tabela 4.13: Diferenças teóricas esperadas entre as condições de máxima capacidade e com equalização, a partir da relação (4.10), medidas obtidas a 4% de probabilidade de bloqueio.	100
Tabela 4.14: Efeito da introdução do controle de potência nos algoritmos FCA e DCA-AI.	105

Tabela 4.15 : Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-AI sob o mesmo tráfego gerado (3100 Erlangs).	110
Tabela 4.16: Ganhos de capacidade de algoritmos DCA-AI sobre algoritmo FCA na condição equalizada, em sistema operando com controle de potência.	112
Tabela 4.17: Limites Teóricos para algoritmos DCA-AI com controle de potência simulados.	118
Tabela 4.18: Diferenças de número médio de usuários ativos entre as condições de máxima capacidade e com equalização, medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, no caso com controle de potência.	118
Tabela 4.19: Diferenças teóricas esperadas entre as condições de máxima capacidade e com equalização, a partir da relação (4.10), medidas obtidas a 4% de probabilidade de bloqueio, em sistema com controle de potência.	119
Tabela 4.20 : efeito da introdução da mobilidade dos usuários em algoritmos FCA e DCA-AI sem controle de potência.	127
Tabela 4.21 : Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-AI sem controle de potência, sob o efeito da mobilidade de 25% dos TMs e sob o mesmo tráfego gerado de 2300 Erlangs.	129
Tabela 4.22: níveis de SIR de Aceitação ajustados para equalização de desempenho entre algoritmos DCA sem controle de potência na condição de 25% de mobilidade no sistema.	132
Tabela 4.23: Limites Teóricos para algoritmos DCA-AI sem controle de potência equalizados e simulados na condição de 25% de mobilidade.	136

Tabela 4.24: Diferenças de número médio de usuários ativos entre as condições de máxima capacidade e com equalização, medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema operando sem controle de potência e com 25% de mobilidade.	137
Tabela 4.25: Diferenças teóricas esperadas entre as condições de máxima capacidade e com equalização, a partir da relação (4.10), medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema operando sem controle de potência e com 25% de mobilidade.....	137
Tabela 4.26 : efeito da introdução da mobilidade dos usuários em algoritmos FCA e DCA-AI com controle de potência.	141
Tabela 4.27 : efeito da introdução do controle de potência nos algoritmos FCA e DCA-AI operando com mobilidade de 25% dos Terminais.	143
Tabela 4.28 : Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-AI com mobilidade e controle de potência sob o mesmo tráfego gerado (3800 Erlangs).....	145
Tabela 4.29: Níveis de SIR de Aceitação ajustados para equalização de qualidade e estabilidade entre algoritmos DCA-AI na condição de 25% de mobilidade no sistema.	147
Tabela 4.30: Limites Teóricos para algoritmos DCA-AI com controle de potência equalizados e simulados na condição de 25% de mobilidade.	151
Tabela 4.31: Diferenças de número médio de usuários ativos entre as condições de máxima capacidade e com equalização, medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema operando com controle de potência e com 25% de mobilidade.	152
Tabela 4.32: Diferenças teóricas esperadas entre as condições de máxima capacidade e com equalização, a partir da relação (4.10), medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema operando com controle de potência e com 25% de mobilidade.....	152

Tabela 4.33: Medidas de estabilidade e qualidade em algoritmos DCA-AI com controle de potência sob efeito de limitação de transceptores.....	160
Tabela 6.1: Modificações do cenário de simulação para o caso TDMA.....	188
Tabela 6.2: Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência e com sincronismo de portadoras, sob o mesmo tráfego gerado (2100 Erlangs).	190
Tabela 6.3: Análise do efeito da falta de sincronismo entre portadoras em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência.	193
Tabela 6.4: Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência e sem sincronismo de portadoras, sob o mesmo tráfego gerado (1330 Erlangs).	198
Tabela 6.5: Ganhos de capacidade de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sobre algoritmo FCA. Algoritmos operavam sem controle de potência, com sincronismo e com parâmetros ajustados para equalização.....	200
Tabela 6.6: Medidas de estabilidade de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI. Algoritmos operavam sem controle de potência, sem sincronismo e com parâmetros ajustados para equalização.	201
Tabela 6.7: efeito da introdução de controle de potência em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com sincronismo.	205
Tabela 6.8: efeito da falta de sincronismo em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência.....	208
Tabela 6.9: efeito do controle de potência em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI operando em sistema sem sincronismo.....	210
Tabela 6.10: Comparação de Desempenho de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência, com sistema operando de forma sincronizada.....	211

Tabela 6.11: Comparação de Desempenho de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência, com sistema operando sem sincronismo e com 1470 Erlangs de tráfego gerado.....	214
Tabela 6.12: parâmetros utilizados para equalização dos algoritmos com sistema operando sem sincronismo.	216
Tabela 6.13: Comparação de Capacidade de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência em relação ao FCA, com sistema operando sem sincronismo.	217
Tabela 6.14: ganho de capacidade de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sobre algoritmo FCA, com parâmetros ajustados para equalização, com sistema operando sem sincronismo.....	218
Tabela 7.1: Resumo dos Ganhos de Capacidade obtidos nos diversos cenários do trabalho.	223
Tabela A.1: tempo aproximado de execução do Sistema Simulador em cada cenário, em cada carga, para 100 mil eventos.	264

RESUMO

A alocação fixa de canais de comunicação nos sistemas de telefonia celular atuais causa uma série de problemas: necessidade do árduo trabalho de planejamento de frequências, baixa tolerância à variabilidade de tráfego e baixa capacidade devida às margens de projeto e reduzida troncalização. Algoritmos de Alocação Dinâmica de Canais (DCA) têm sido propostos por diversos autores com o fim de minimizar estes problemas. Diversos trabalhos na literatura propuseram diferentes tipos de algoritmos DCA. Entretanto, é difícil compará-los pois os mesmos foram analisados sobre diferentes condições e parâmetros. Muitas análises de algoritmos DCA consideraram diversos fatores atuando conjuntamente, dificultando ainda mais a análise. Além disso, aspectos de qualidade e estabilidade das chamadas em algoritmos DCA freqüentemente não são considerados com a profundidade necessária. Este trabalho analisa o comportamento de diversos algoritmos DCA adaptativos à interferência sobre um mesmo cenário de simulação, permitindo uma completa análise e comparação dos mesmos. Aspectos de qualidade e estabilidade das chamadas são analisados em detalhes. Os impactos que o controle de potência, a mobilidade dos usuários e a limitação no número de transceptores equipados nas Estações Rádio-Base exercem sobre o desempenho dos algoritmos DCA são analisados separadamente. A aplicação dos algoritmos DCA em sistemas TDMA e o impacto causado pelas principais limitações deste tipo de sistema no desempenho dos algoritmos DCA também são analisados neste trabalho.

ABSTRACT

Fixed channel allocation causes several problems in present cellular phone systems: need for frequency planning, poor tolerance to traffic load variations and low capacity due to low trunking efficiency and high design margins. Dynamic Channel Allocation (DCA) is an alternative to solve these problems. Many authors have proposed different types of DCA schemes, however, it is hard to analyze and compare their results because they were obtained under different scenarios and conditions. In addition, several different factors were acting together in the final result, making the analysis even harder. Furthermore, call quality and stability aspects are seldom considered deeply. This research considers several different DCA algorithms under the same scenario, allowing a complete analysis and comparison of their performance. Call quality and stability are considered in detail. The impact of power control, user mobility and limited number of transceivers in base stations are studied separately. The application of DCA in TDMA systems and its main problems are also studied.

1. Introdução

O objetivo deste trabalho é estudar o funcionamento e desempenho de Algoritmos de Alocação Dinâmica de Recursos/Canais em sistemas celulares de radiocomunicação.

Alocação Dinâmica de Canais (DCA) é uma alternativa para o método de alocação de canais atualmente em uso em boa parte dos sistemas celulares. O método de alocação de canais atualmente em uso é normalmente referenciado como Alocação Fixa de Canais (FCA).

A motivação para o estudo de um novo método de alocação de canais advém das principais dificuldades que o algoritmo FCA possui: baixo desempenho em situações de tráfego variável no tempo ou no espaço, necessidade da difícil tarefa de planejamento prévio de frequências e capacidade reduzida pela distribuição de canais. Prevê-se inclusive que estes problemas serão realçados com o uso de microcélulas. Estes aspectos serão melhor explorados no capítulo 2.

Algoritmos DCA podem auxiliar no tratamento destes problemas e diversos algoritmos foram propostos na literatura. O capítulo 3 apresenta os dois tipos principais de algoritmos DCA: Adaptativos ao Tráfego (DCA-AT) e Adaptativos à Interferência (DCA-AI). A filosofia de funcionamento e uma análise teórica que permite estimar o desempenho de cada um deles são apresentadas; entretanto, o trabalho se concentra nos algoritmos DCA-AI.

Devido à complexidade do sistema, algoritmos DCA-AI são geralmente analisados através de simulações. Entretanto, os diversos algoritmos DCA propostos na literatura utilizaram-se de diversas técnicas e cenários de simulação diferentes entre si. É difícil a comparação dos algoritmos dado que o desempenho dos mesmos varia bastante com a variação dos parâmetros. Além disso, os resultados apresentados na literatura muitas vezes consideram a ação conjunta de diversos fatores; como por exemplo, controle de potência.

A fim de permitir a avaliação e comparação dos algoritmos DCA-AI entre si, este trabalho apresenta no capítulo 4 os resultados de simulações dos principais algoritmos DCA-AI sobre o mesmo cenário em um sistema analógico. Além disso, considerou-se o efeito do controle de potência separadamente a fim de avaliar o efeito deste fator.

O desempenho dos algoritmos DCA será analisado não somente com respeito à sua capacidade, mas também com respeito à aspectos de estabilidade e qualidade de chamadas. Será visto que a correta análise do desempenho de algoritmos DCA deve considerar estes aspectos.

O efeito do número de transceptores equipados em cada Estação Rádio-Base (ERB) e o efeito da mobilidade dos usuários são também analisados no capítulo 4. Nos capítulos 5 e 6, este trabalho analisa ainda o desempenho de algoritmos DCA quando utilizados em sistemas TDMA, incluindo a análise do efeito da falta de sincronismo e da limitação no controle de potência no desempenho dos algoritmos.

Este trabalho não inclui analisar o uso do algoritmo DCA em conjunto com outras técnicas de melhoramento de desempenho de sistemas celulares, tais como células hierárquicas, seqüências de troca de freqüências ("Frequency Hopping"), redirecionamento de chamadas entre ERBs ("Direct Retry") ou diversidade de antenas. A análise do desempenho dos algoritmos DCA envolverá somente o tráfego de voz. Este trabalho também não inclui a aplicação de algoritmos DCA em sistemas celulares CDMA.

2. Alocação Fixa de Canais (FCA)

A fim de entender melhor as limitações do algoritmo FCA de alocação de recursos/canais, explicam-se a seguir os princípios básicos de sistemas celulares e os problemas advindos do algoritmo FCA.

2.1. Princípios Básicos de Sistemas de Telefonia Celular

2.1.1. Processamento de uma Chamada

A título de ilustração, será descrito o processamento de uma chamada em um sistema de telefonia celular.

Na primeira geração dos sistemas de telefonia móvel, o termo “canal” corresponde a um par de frequências de Rádio-Frequência (RF) onde uma frequência é utilizada para a comunicação no sentido Terminal Móvel-ERB (sentido TM-ERB) e outra frequência é utilizada no sentido inverso (sentido ERB-TM). Cada chamada envolvendo um Terminal Móvel (TM) exige um canal exclusivo e cada canal envolve a utilização de um Transceptor em uma ERB. Este conceito pode ser estendido a sistemas de segunda geração.

Cada ERB possui um transceptor dedicado para o “canal de controle”. Quando não estão envolvidos em uma comunicação, os Terminais Móveis (TMs) estão sintonizados no canal de controle de sua ERB.

Uma chamada destinada a um TM é recebida pelo Centro de Comando e Controle (CCC). A CCC troca mensagens com suas ERBs a fim de localizar o TM. Através do canal de controle, o TM é alertado da chegada de uma chamada para o mesmo. O TM troca mensagens de controle com a ERB que determina um canal de tráfego (outro par de frequências) para a comunicação. O TM se sintoniza no canal determinado e a comunicação “Full-Duplex” se processa. Processo semelhante ocorre quando o TM deseja realizar uma chamada.

Quando um TM em movimento atravessa os limites de uma célula, ao TM é alocado um novo canal na nova célula e ocorre a troca de canais ou transferência de chamada, disponibilizando o antigo canal na célula de origem. Este processo

envolve diversas medições e trocas de informações entre ERBs e CCC, sendo usualmente chamado de “Handover” ou “Handoff” na literatura técnica [1].

É importante notar que na concepção atual de sistemas celulares, um único canal de tráfego é utilizado exclusivamente pelo TM durante toda a comunicação.

Maiores informações sobre o processamento de chamadas em sistemas celulares analógicos e digitais podem ser encontradas em [1].

2.1.2. Conceito de Reutilização de Canais

A filosofia básica do sistema de telefonia celular é o conceito de reutilização de canais. No caso de sistemas analógicos, o conceito se aplica a pares de frequências, enquanto em sistemas de digitais baseados em Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (TDMA - "Time Division Multiple Access") o conceito se aplica às portadoras dos canais. No Sistema digital baseado em Acesso Múltiplo por Divisão por Código (CDMA - "Code Division Multiple Access"), o conceito se aplica ao reuso de códigos.

Como o espectro de frequências de RF é um recurso finito, existe um número finito de canais que pode ser utilizado simultaneamente. No caso do padrão analógico AMPS ("Advanced Mobile Phone System"), o número de canais disponíveis no espectro de frequências para o serviço de telefonia móvel é 832 [1]. A limitação imposta pelo espectro de frequências também impacta na capacidade de sistemas TDMA.

O conceito de reutilização de canais permite que um canal possa ser reutilizado simultaneamente em diversas localidades separadas suficientemente. Isto permite que o número de conversações simultâneas em um sistema seja muito maior que o número de canais disponíveis para o mesmo [1].

A interferência gerada em uma ERB devido ao uso do mesmo canal por outra ERB é chamada de “interferência co-canal”. Os sistemas celulares são projetados de forma que os níveis de interferência co-canal estejam sempre abaixo de um determinado limiar mínimo que garante uma boa qualidade de conversação.

Além das interferências co-canal, existe também interferência de “canal adjacente”. A alocação de canais em um sistema celular também leva em consideração a interferência entre canais adjacentes, utilizando canais em uma ERB

com certo espaçamento entre os canais. Apesar da importância deste parâmetro, este não será considerado neste trabalho.

Para permitir uma maior reutilização de canais, os sistemas atuais utilizam “Setorização” nas ERBs. A Setorização consiste em dividir a região abrangida pela ERB em diversas partes (setores) e utilizar antenas direcionais (ou setoriais) para cobrir cada uma desses setores. Como as antenas direcionais diminuem a interferência co-canal, é possível uma maior reutilização de canais [1]. Neste trabalho, serão consideradas somente ERBs omnidirecionais.

Note que quanto menor a região de serviço de cada ERB, mais ERBs poderão se utilizar do mesmo canal, resultando em um alto ganho de capacidade. Esta é a principal razão para o uso de microcélulas em sistemas celulares futuros [2].

2.2. Problemas da Alocação Fixa de Canais

Conforme visto anteriormente, a reutilização de canais exige que ERBs reutilizando um mesmo canal estejam suficientemente separadas. Dessa forma, ERBs de células adjacentes deverão utilizar canais diferentes. Extrapolando este conceito à todo o sistema, os canais devem ser distribuídos pelas diversas células de uma região próxima.

Nos sistemas celulares atuais, uma vez que os canais são distribuídos, a distribuição permanece constante. Esta forma de alocação de recursos/canais é normalmente chamada de Alocação Fixa de Canais (FCA).

O algoritmo FCA causa uma série de implicações e problemas. Dentre estas, pode-se destacar os seguintes:

- necessidade de planejamento de frequências / canais;
- necessidade de previsão de tráfego gerado;
- dificuldade em expansões e modificações;
- variações do grau-de-serviço decorrente da variação de tráfego gerado;
- queda na troncalização decorrente da divisão do grupo de canais;
- margens de projeto prejudicam capacidade e flexibilidade do sistema.

2.2.1. Planejamento de Freqüências / Canais

O planejamento de quais grupos de freqüências serão utilizados em cada célula não é simples pois o sistema real possui células irregulares e as regiões cobertas pelas mesmas possuem diferentes condições de topologia e propagação. Tais fatores podem tornar aleatória a região de cobertura de uma determinada célula.

Dessa forma, é necessário um cuidadoso estudo de interferência entre ERBs antes da implementação do sistema. Neste estudo se definem a localidade das ERBs, a região de cobertura de cada célula e os canais que serão utilizados em cada uma delas. O estudo exige o uso de ferramentas computacionais poderosas a fim de prever a interferência co-canal entre ERBs utilizando os mesmos canais. Esta tarefa é denominada Planejamento de Freqüências (“frequency planning”).

Dependendo do tamanho do sistema, tal tarefa exige algumas semanas de trabalho de engenheiros de RF especializados.

Apesar do tempo gasto nesta tarefa, o seu resultado será somente uma estimativa das condições reais de interferência que o sistema sofrerá quando instalado.

Além disso, apesar do estudo considerar as diversas elevações do terreno e considerar fatores de atenuação adicionais devido a existência de prédios e construções entre os TMs e as ERBs, o estudo é estatístico. Isto significa que os sinais de RF de um determinado canal em diversas direções podem ter alcance maior ou menor do que o previsto, podendo existir regiões de interferência acima do projetado e regiões onde o sinal não é suficiente para se estabelecer uma comunicação (regiões de “sombra”).

As discrepâncias entre as condições previstas e as reais são resolvidas no campo, consumindo mais algumas semanas de engenheiros especializados.

Ao utilizar micro e picocélulas, as estruturas urbanas (prédios, casas, carros, etc) possuirão maior influência na propagação e reflexão do sinal. Os prédios tornam-se difratores das ondas eletromagnéticas devido à baixa altura das antenas de microcélulas [3-14]. A maior influência das estruturas urbanas exigirá que tais

estruturas sejam consideradas durante o planejamento de freqüências, tornando o planejamento de freqüências muito mais dispendioso e difícil [4,5,7-12,15-29].

Além disso, mudanças nas condições de propagação exigem revisão do planejamento (por exemplo, construção de um prédio).

2.2.2. Previsão de Tráfego Gerado

Juntamente com o Planejamento de Freqüências / Canais, o número de transceptores com que cada ERB será equipada é definido baseado em predições de tráfego médio gerado na área de cobertura de cada célula correspondente.

Da mesma forma que no Planejamento de Freqüências, a Predição de Tráfego resulta somente em uma estimativa das condições reais de tráfego que as células sofrerão. Erros são comuns devido às diversas variáveis que determinam o tráfego sendo gerado em uma determinada região. As diferenças entre as condições previstas e as reais novamente devem ser resolvidas no campo com a redistribuição de transceptores e canais entre as ERBs.

O uso de micro e picocélulas agravará ainda mais a situação pois o tráfego gerado em cada célula será mais difícil de prever pois suas dimensões reduzidas provocarão alto grau de variabilidade de tráfego entre as mesmas [3-7,11,13,16,20,21,24,25,30-34].

2.2.3. Expansões e Modificações

Após o estudo de tráfego gerado, o estudo de interferências e a fase de otimização, os canais são distribuídos à cada uma das ERBs de forma permanente. As chamadas que ocorrerem em cada célula serão servidas somente com os canais próprios da mesma.

Reconfigurações durante o período de operação são necessárias e freqüentes para ajustar o sistema a eventuais modificações nas condições de tráfego ou interferência [5,12,24,28,29,35]. Podem-se citar os seguintes exemplos: adição de uma ou mais células para aumento de capacidade, modificações no planejamento de freqüências devido a mudanças no meio de propagação

(construção ou demolição de um prédio) ou remanejamento de transceptores a fim de compensar mudanças no padrão de tráfego.

Lembrando que em algoritmos FCA o número de canais distribuídos à cada ERB é fixo, qualquer modificação na distribuição de canais em um sistema já implantado necessita intenso estudo de replanejamento de freqüências e nova predição de tráfego. As mudanças não são automáticas e exigem um corpo técnico especializado para tal reconfiguração.

2.2.4. Variações no Grau-de-Serviço Oferecido ao Usuário

Ao utilizar FCA, cada ERB possui um número fixo de canais. Como visto no item anterior, este número é determinado no estudo de predição de tráfego.

O estudo de predição é baseado no tráfego médio sendo gerado em cada célula. Isto é, considera-se que o número de usuários sob a cobertura de uma célula qualquer se mantenha na média constante, sofrendo poucas variações. Entretanto, os usuários são móveis por natureza e se locomovem por várias células. No decorrer do tempo, ocorrem concentrações e desconcentrações de usuários nas diversas células do sistema. Assim, em determinado momento, o sistema possuirá células com número de usuários superior ao previsto, não possuindo canais suficientes para tal aumento de tráfego. Da mesma forma, simultaneamente, outras células possuirão um número de usuários inferior ao previsto, tendo seus canais, preciosos recursos para outras células, desocupados¹ [21,33,35-38]. A situação é ainda pior quando ocorre grande concentração de usuários em uma célula devido à ocorrência de eventos especiais, congestionamentos, acidentes, etc².

Mesmo que não ocorram concentrações de usuários, os canais de uma célula podem se tornar escassos quando picos de tráfego gerado variam acima do previsto.

A conseqüência da variação de tráfego para um número constante de transceptores/canais (servidores) é a variação no grau-de-serviço percebido pelo

¹ Técnicas de roteamento de chamadas entre ERBs ("Direct Retry") podem ser utilizadas para amenizar este problema, inclusive em conjunto com algoritmos DCA. Entretanto, este trabalho não considera esta possibilidade; isto é, as chamadas somente serão atendidas pela célula que lhe fornecer o melhor sinal.

² As operadoras de sistemas celulares tentam resolver o problema causado por eventos especiais através de ERBs móveis e com pequena área de abrangência, localizadas no topo de veículos (caminhões) e que são inseridas próximas ao local onde ocorrerá a grande concentração.

usuário [21]; isto é, quando o tráfego na célula aumenta, mais usuários terão chamadas negadas devido à falta de transceptores/canais.

Sistemas de primeira geração não têm enfrentado muitos problemas com respeito à variabilidade de tráfego em suas células. Tais problemas não são muito freqüentes porque as células abrangem grandes extensões de área e o número médio de usuários em uma determinada célula varia pouco percentualmente.

Entretanto, ao se utilizar microcélulas e picocélulas, a variabilidade de tráfego entre células será obviamente muito mais acentuada e a consideração de que o número de usuários em uma célula varia pouco percentualmente não é mais válida [3-7,11,13,16,20,21,24,25,30-34,39]. Dessa forma, grandes variações indesejadas no grau-de-serviço devido à variação da relação de usuários por canais disponíveis são esperadas com o uso de algoritmos FCA em sistemas celulares de futuras gerações.

2.2.5. Queda de Troncalização

Conforme explicado no item anterior, em sistemas celulares utilizando algoritmo FCA os diversos canais do sistema são distribuídos pelas ERBs segundo a previsão de tráfego na célula. Assim, a ERB de cada célula possui seus canais para uso exclusivo.

A teoria de Erlang mostra que o tráfego cursado para um determinado grau-de-serviço aumenta de forma não linear com o número de canais disponíveis [1]. Por exemplo, utilizando a tabela de Erlang-B, uma ERB com 70 canais é capaz de servir 56,1 Erlangs com somente 1% das chamadas sendo bloqueadas; uma ERB com 7 canais é capaz de servir somente 2,5 Erlangs para a mesma probabilidade de bloqueio. Assim, é melhor possuir uma ERB com 70 canais do que 10 ERBs com 7 canais, que serviriam somente 25 Erlangs.

Este simples exemplo demonstra a baixa troncalização de sistemas utilizando FCA, onde a divisão dos canais disponíveis ao sistema celular pelas ERBs diminui a capacidade do sistema [7,11,21,40,41].

2.2.6. Margens de Projeto Prejudicando Capacidade e Flexibilidade do Sistema

Conforme anteriormente mencionado, o planejamento de frequências não consegue levar em consideração as diversas condições presentes no campo. Dado que o desvanecimento que o sinal recebido sofre depende fortemente das estruturas e prédios presentes no campo, não é possível quantificar exatamente esse efeito. Assim, margens são adicionadas nos cálculos de interferência a fim de se precaver dos piores casos de desvanecimento [15,16,31,42].

Da mesma forma, como a posição dos TMs na célula não é conhecida, os cálculos de interferência consideram o pior caso de interferência co-canal considerando que os TMs interferentes estariam operando na fronteira da área de cobertura da célula [11,16,31,38,39,41].

As margens de projeto causadas pelas incertezas quanto ao desvanecimento e à localização dos TMs prejudicam a capacidade e flexibilidade do sistema pois TMs em condições favoráveis não conseguem reutilizar o mesmo canal pois a separação mínima exigida é baseada nas piores condições possíveis.

3. Alocação Dinâmica de Canais (DCA)

Os algoritmos DCA tem como objetivo resolver ou amenizar os problemas advindos do algoritmo FCA mencionados no item 2.2. Diversos trabalhos estudaram algoritmos DCA de diversos tipos [5-14,16-30,32-66].

O DCA tem como principal característica não possuir canais fixos designados às ERBs das células. O princípio básico de algoritmos DCA é permitir que os canais possam ser compartilhados entre várias células de forma coordenada e automática durante a operação do sistema.

O DCA permite que o sistema se molde às condições variáveis de tráfego e/ou interferência do sistema, conforme será visto neste capítulo. Através desta flexibilidade, os algoritmos DCA têm o potencial para:

- se adaptar às variações temporais e espaciais do tráfego oferecido a fim de evitar degradações acentuadas no grau-de-serviço do sistema;
- evitar o trabalho de planejamento de frequências;
- amenizar as dificuldades nas reconfigurações do sistema;
- aumentar a troncalização, aumentando portanto a capacidade do sistema;
- melhorar a capacidade e flexibilidade do sistema ao minimizar o uso de margens de projeto.

Os algoritmos DCA podem ser classificados em 2 tipos básicos: algoritmos DCA Adaptativos ao Tráfego (DCA-AT) e algoritmos DCA Adaptativos à Interferência (DCA-AI).

3.1. Algoritmos DCA Adaptativos ao Tráfego (DCA-AT)

Em um sistema utilizando FCA, muitas vezes um usuário tem seu pedido de serviço negado devido à falta de canais na ERB da célula em que está localizado. Entretanto, é possível que nestas situações de bloqueio uma outra célula próxima não esteja utilizando todos os canais designados a ela. A rigidez do FCA não permite que estes canais desocupados possam ser utilizados pela célula com sobrecarga momentânea.

Os primeiros algoritmos DCA sugeridos na literatura se concentravam em resolver o problema acima descrito. O algoritmo DCA iria coordenar o uso de canais

de forma a permitir que células momentaneamente sobrecarregadas possam utilizar canais de células com menor carga no momento. Em outras palavras, o algoritmo DCA se adapta à situação de tráfego presente no sistema em um dado momento através da alocação de mais canais para células com alto tráfego momentâneo e menos canais para células com baixo tráfego momentâneo.

Os algoritmos DCA que se concentram basicamente na adaptabilidade à situação de tráfego foram classificados na literatura como algoritmos DCA Adaptativos ao Tráfego (DCA-AT) [5,11,16,21,28,38,39,41,56].

Inúmeras formas de algoritmos DCA-AT foram sugeridas [6-8,30,33,36,43-55]. Algoritmos de Empréstimo de Canais [36,43,47,49] e algoritmos Híbridos FCA-DCA [44] também são considerados algoritmos DCA-AT devido à sua característica de adaptabilidade à tráfego. Todos estes algoritmos diferenciam-se entre si pela heurística utilizada; entretanto, todos seguem direta ou indiretamente a mesma filosofia básica de funcionamento.

3.1.1. Filosofia Básica de Funcionamento

Ao se adaptar à situação de tráfego gerado, os algoritmos DCA-AT devem respeitar a distância mínima de reuso de canais de forma a evitar a interferência co-canal. Assim, caso uma chamada esteja utilizando um determinado canal em uma célula, as células vizinhas não poderão se utilizar deste canal.

Para coordenar as alocações dos diversos canais, os algoritmos DCA-AT devem conhecer a situação de cada canal em cada célula. Antes de utilizar um canal, a ERB da célula consulta a coordenação do algoritmo DCA-AT para verificar se a mesma pode utilizar o canal.

O algoritmo DCA-AT coordena as alocações baseado na Matriz de Compatibilidade [5,11,16,28,38,39,46]. A Matriz de Compatibilidade "MC" é uma matriz quadrada com "M" colunas e linhas, onde "M" é o número de células no sistema.

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & c_{1,2} & \cdot & c_{1,j} & c_{1,M} \\ c_{2,1} & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & c_{M-1,M} \\ c_{M,1} & \cdot & \cdot & c_{M,M-1} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

...onde:

- "M" é o número de células no sistema;
- " $c_{i,j}$ " = 0 se as células "i" e "j" podem utilizar o mesmo canal simultaneamente;
- " $c_{i,j}$ " = 1 se as células "i" e "j" não podem utilizar o mesmo canal simultaneamente.

Note que a Matriz "MC" de Compatibilidade depende da topologia do sistema, permanecendo fixa durante todo o funcionamento do sistema.

O algoritmo DCA-AT também tem informação sobre o uso dos canais em cada célula através de vetores "U" de uso de canal.

$$U_i = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_i \ \dots \ u_M]' \quad (3.2)$$

...onde:

- "l" é o canal a que se refere o vetor;
- " u_i " = 1 se a célula "i" estiver utilizando o canal "l";
- " u_i " = 0 se a célula "i" não estiver utilizando o canal "l".

Os vetores "U" de uso de canal variam à medida que as chamadas são processadas no sistema.

O algoritmo DCA-AT somente permitirá que uma determinada célula "i" utilize um canal "l" se a condição (3.3) for satisfeita:

$$[MC \cdot U_i]_l = 0 \quad (3.3)$$

...onde $[.]_l$ indica o l-ésimo elemento do vetor resultante.

A condição acima significa que um canal somente pode ser utilizado em uma célula se nenhuma de suas células interferentes estiver utilizando este canal naquele instante. Dessa forma, no caso do surgimento de uma nova chamada em uma célula, esta chamada é aceita se existir um canal que satisfaça a condição (3.3). Algoritmos DCA-AT que seguem esta regra são usualmente chamados de algoritmos DCA-AT Tímidos e estes representam a forma mais básica de implementação de um algoritmo DCA-AT.

Os algoritmos DCA-AT Tímidos foram estudados por diversos trabalhos anteriores [6,7,30,45] que mostraram que tais algoritmos podem alcançar estados não-ótimos devido a aleatoriedade do surgimento das chamadas. Isto é, os vetores "U_i" podem alcançar estados tais que a condição (3.3) não se satisfaz embora

possam existir estados que permitam satisfazer esta condição trafegando o mesmo número de chamadas.

3.1.2. Algoritmo "Maximum Packing"

Everitt e MacFayden [46] sugeriram o algoritmo "Maximum Packing" (DCA-AT-MP) como um algoritmo DCA-AT ideal. O DCA-AT-MP funciona da seguinte forma: à cada nova chamada, o algoritmo estuda a melhor forma de alocar o conjunto das chamadas em andamento juntamente com a nova chamada para que o sistema utilize o menor número de canais, com todos os canais satisfazendo a condição (3.3) em sua configuração final. Caso seja possível alocar a nova chamada e manter todas as chamadas já em andamento, o algoritmo rearranja as chamadas que se façam necessárias para permitir a alocação da nova chamada. Caso o algoritmo não permita alocar todas as chamadas, a nova chamada não é aceita e o sistema continua em seu estado anterior. Note que uma chamada somente é bloqueada se não existir estado possível que suporte a nova chamada mais todas as chamadas em andamento.

Everitt e MacFayden demonstram em seu trabalho [46] que, em sistemas uniformes (regulares), a condição de bloqueio somente ocorrerá quando todos os canais estiverem em uso em qualquer um dos conjuntos de células mutuamente interferentes que contenha a célula recebendo a chamada. Um conjunto de células mutuamente interferentes, também chamado de "cluster", é formado por células que não podem utilizar o mesmo canal simultaneamente. A figura 3.1 ilustra o conceito.

Referenciando-se na figura 3.1, em um sistema exemplo que necessite pelo menos 1 célula de distância de reuso, cada conjunto de células (b) a (g) representa um "cluster" com a célula "A". Note que, no algoritmo "Maximum Packing", uma chamada que ocorra na célula "A" somente será aceita se todos os "clusters" (b) a (g) possuírem número de chamadas ativas menor que o número total de canais no sistema.

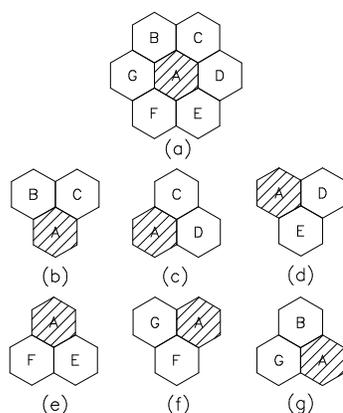


Fig. 3.1 - Conceito de Células Mutuamente Interferentes ("cluster").

Caso tal condição se satisfaça, o algoritmo DCA-AT-MP conseguirá achar uma configuração de alocação que permita acomodar a nova chamada.

Dessa forma, e conforme reconhecido por muitos outros trabalhos [6-8,16,21,30,33,48], o algoritmo DCA-AT-MP representa o caso ideal que fornece a menor probabilidade de bloqueio dentro desta classe de algoritmos.

Entretanto, a implementação do DCA-AT-MP é difícil pois exige uma carga de processamento e rearranjo muito grande para se ajustar o estado ótimo do sistema celular. Note que o DCA-AT-MP pode exigir o rearranjo de grande parte ou de todo o conjunto de chamadas ativas.

3.1.3. Outros Algoritmos DCA-AT

Diversos algoritmos DCA-AT foram propostos na literatura para se conseguir um desempenho melhor que o fornecido pelo DCA-AT Tímido. Ao mesmo tempo, estes algoritmos procuravam aproximar seu desempenho ao do algoritmo DCA-AT-MP.

Dentre os diversos algoritmos propostos, os que forneceram melhor desempenho foram os algoritmos que propunham uma escolha criteriosa do canal a alocar [6,30,33,36,47,49-55]. O critério de escolha tem como objetivo evitar que o algoritmo DCA-AT progrida para estados não-ótimos.

O canal escolhido era tal que maximizasse o número de usuários utilizando (ou que poderiam utilizar) o mesmo canal simultaneamente. A fim de maximizar o número de usuários utilizando o mesmo canal simultaneamente, os algoritmos procuram alocar o canal a usuários à mínima distância de reuso permitida. Note que

a alocação de usuários em células com distância superior à mínima permitida implica em pior desempenho pois mais células estarão proibidas de utilizar o canal simultaneamente. A figura 3.2 ilustra o conceito.

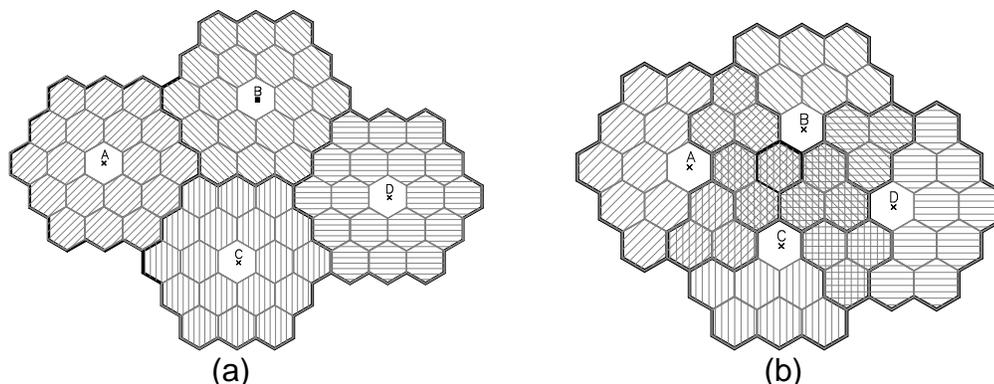


Fig.3.2: Impacto da Alocação de Canais com distância maior que a distância mínima de reuso. Os diferentes padrões de preenchimento representam as células proibidas de utilizar o canal pois a célula central o está utilizando.
 (a): canais alocados com distância superior à distância mínima de reuso.
 (b): canais alocados com exatamente a distância mínima de reuso

A figura 3.2 ilustra o problema quando os canais não são alocados de forma compacta. Conforme mostrado na figura 3.2-a, 72 células estão proibidas de utilizar o canal devido ao grande distanciamento entre células co-canais. A figura 3.2-b ilustra a alocação ideal, totalmente compacta, onde somente 48 células estão proibidas de reutilizar o canal. Assim, na situação compacta, mais células no sistema podem reutilizar um mesmo canal simultaneamente.

Canais que possuem usuários localizados em células separadas da distância mínima de reuso são chamados na literatura de "canais compactos", "canais com alocação ótima" ou "canais saturados" [7,30,33,46,48,52,54,55].

O algoritmo DCA-AT-MP sugerido por Everitt e MacFayden [46] possui desempenho ótimo pois o resultado final do rearranjo global de chamadas gera canais mais "compactos" [46].

Apesar dos algoritmos DCA-AT propostos tentarem manter os canais o mais compactos possível, a aleatoriedade da geração de chamadas não permite que o algoritmo mantenha os canais compactos todo o tempo. Assim, estes algoritmos procuram rearranjar chamadas em andamento em diferentes canais ("intracell handoffs") para melhorar a compactação dos mesmos [6,7,21,30,33,36,44,47,49,51-55]. Para tornar o algoritmo mais próximo da implementação, os algoritmos procuram rearranjar o menor número de chamadas possível.

Os "Intracell Handoffs" também permitem que chamadas que normalmente seriam bloqueadas sejam aceitas com o rearranjo de chamadas em andamento. A fim de evitar que chamadas sendo rearranjadas sejam prematuramente terminadas, muitos algoritmos somente permitem a alocação da nova chamada se as chamadas em andamento conseguirem encontrar um novo canal. Estes algoritmos são conhecidos como algoritmos "Educados" [7,30]. Algoritmos que alocam chamadas sem se preocupar com o efeito que a mesma irá causar nas chamadas em andamento são conhecidos como algoritmos "Agressivos" [6,7,30]. Note que algoritmos "Agressivos" tornam o sistema mais instável pois chamadas em andamento que recebam interferência excessiva e não conseguem encontrar um novo canal terminam prematuramente.

Os algoritmos Híbridos FCA-DCA procuram alcançar alocações mais compactas através da distribuição de canais fixos e dinâmicos [44]. Os canais fixos são alocados com compactação ótima e possuem prioridade na alocação. Os canais dinâmicos são utilizados quando a célula não mais possui canais fixos disponíveis. Além disso, "intracell handoffs" são efetuados sempre que possível para liberar os canais dinâmicos [44]. Dessa forma, os algoritmos híbridos conseguem uma boa compactação de canais, especialmente em situações de tráfego uniforme.

3.1.4. Análise Teórica

A complexidade dos algoritmos DCA-AT não permite uma análise teórica exata de seu comportamento. Dessa forma, os algoritmos DCA-AT propostos são geralmente analisados através de simulações.

Entretanto, análises teóricas aproximadas podem ser úteis para verificar o impacto de cada parâmetro no sistema, além de fornecer uma ordem de grandeza do desempenho do sistema com respeito à probabilidade de bloqueio.

Embora o enfoque deste trabalho seja o estudo de algoritmos DCA-AI, o estudo do comportamento dos algoritmos DCA-AT é importante pois, conforme será visto no item 3.2, os algoritmos DCA-AI também possuem adaptabilidade a tráfego.

3.1.4.1. Intervalo de Variação do Ganho de Capacidade

Cimini [7] apresentou uma formulação simples que permite analisar o comportamento aproximado de algoritmos DCA-AT e como o desempenho destes varia com a variação de parâmetros do sistema. A análise utilizada neste item será baseada no trabalho de Cimini [7]. Outros trabalhos adotaram formulação semelhante para esta análise [41,56].

Suponha-se um sistema celular regular hexagonal bidimensional utilizando algoritmo FCA com total de "CA" canais e um "cluster" de "N" células. No algoritmo FCA, os "CA" canais são divididos igualmente pelas "N" células do "cluster" (supondo sistema uniforme), resultando em "CA" dividido por "N" canais de comunicação para cada célula.

Ao utilizar um algoritmo DCA-AT, todas as células podem utilizar qualquer um dos "CA" canais do sistema. Se a interferência co-canal não fosse fator limitante, as células poderiam utilizar todos os "CA" canais disponíveis, independente da utilização dos mesmos por outras células. Nesta situação, a capacidade "C_m" de tráfego de uma célula "m" seria máxima e dada por:

$$C_m = \text{Erl_B}(\text{CA}, \text{GOS}) \quad (3.4)$$

...onde "Erl_B(CA,GOS)" representa o tráfego cursado por "CA" servidores para um determinado grau-de-serviço "GOS" dado através da formulação Erlang B.

Entretanto, a distância mínima de reuso necessária não permite o uso da totalidade dos canais por uma única célula. Supondo que um "cluster" de "N" células seja necessário para se garantir um determinado nível de qualidade, os "CA" canais deverão ser utilizados de forma não simultânea pelas "N" células. Se ignorarmos a influência dos outros "clusters" vizinhos, a capacidade "C_m" de cada célula do "cluster" será dada pela relação (3.5):

$$C_m = \frac{1}{N} \text{Erl_B}(\text{CA}, \text{GOS}) \quad (3.5)$$

A relação (3.5) mostra que, nesta condição, o "cluster" de "N" células opera como uma única célula com "CA" servidores.

Entretanto, esta situação não é válida quando as alocações não estão compactas. Isto é, situações como a ilustrada na figura 3.3 podem ocorrer,

impossibilitando que um “cluster” opere um dado canal mesmo que nenhuma célula do mesmo esteja utilizando tal canal.

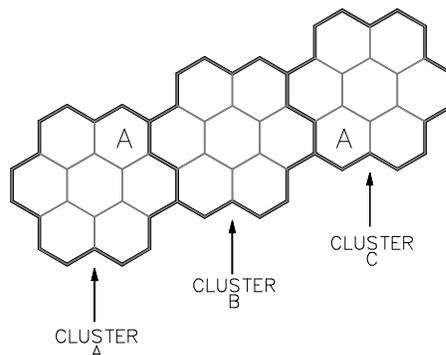


Fig. 3.3 - Exemplo de influência de outros “clusters” impossibilitando o uso do canal “A” pelo “cluster” “B”.

A figura 3.3 ilustra um exemplo de sistema que opera com 7 células no “cluster” e exige uma distância mínima de reuso de 2 células. Note no exemplo da figura 3.3 que mesmo que o “cluster” “B” não esteja utilizando o canal “A”, o mesmo não o pode utilizar pois são necessárias pelo menos 2 células de distância para o reuso do canal “A” no conjunto “B”. A alocação do canal “A”, mesmo que momentânea, pelas células dos conjuntos “A” e “C” impossibilita o uso do canal “A” pelo conjunto “B”.

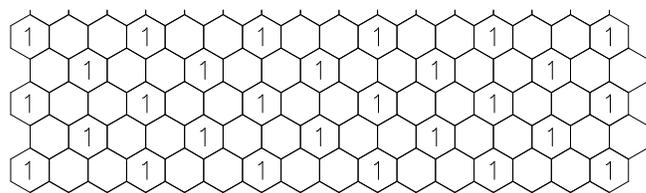
Se o sistema conseguir se ajustar para que seus “CA” canais sejam sempre utilizados de forma perfeitamente “compacta” (isto é, com distância entre células interferentes exatamente igual à mínima distância de reuso), garante-se que o conjunto das “N” células de qualquer “cluster” terá “CA” canais à disposição, valendo a relação (3.5) [7]. Esta situação é obviamente ideal e a relação representa o limite superior de desempenho de um algoritmo DCA-AT.

A fim de avaliar situações não ideais, Cimini [7] sugere o uso de uma parcela “ δ ” para refletir o efeito de compactações imperfeitas. Esta parcela multiplica o número total de canais disponível a um conjunto de células mutuamente interferentes. Utilizando tal parcela, a capacidade de uma célula operando em um algoritmo DCA-AT não-ideal é obtida através da formulação (3.6):

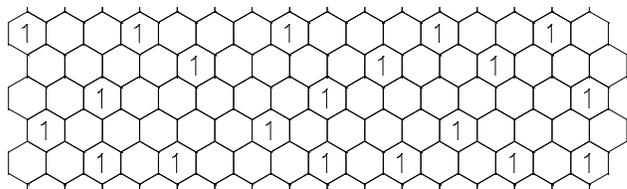
$$C_{m_{\text{imperfeito}}} = \frac{1}{N} \text{Erl}_B(\delta \cdot CA, \text{GOS}) \quad (3.6)$$

O valor da parcela “ δ ” representa o quanto a forma de alocação de um algoritmo DCA-AT se aproxima da forma de alocação ideal. Isto é, o valor de “ δ ” representa a capacidade de um algoritmo DCA-AT em “compactar” usuários em um

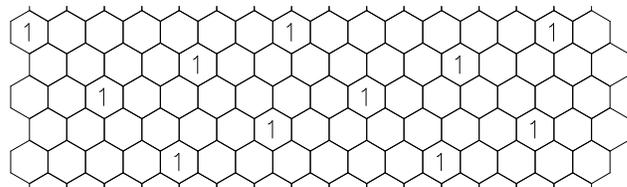
dado canal. Cimini [7] define o valor da parcela " δ " para um dado algoritmo DCA-AT como sendo igual à razão entre o número médio de células que reutilizam um mesmo canal ao seguir este algoritmo e o número máximo de células que poderiam reutilizar um mesmo canal³. A figura 3.4 ilustra o conceito para um sistema hexagonal com "cluster" de 3 células ("cluster" de 3 células exige um espaçamento de no mínimo 1 célula para o reuso de canais).



(a): canais alocados de forma ótima (compacta). $\delta = 1$



(b): canais alocados de forma aleatória. $\delta = 0,693$ [7]



(c): canais alocados na pior forma possível. $\delta = 0,42$ [7]

Fig. 3.4 - Ilustração do conceito da capacidade de um algoritmo alocar canais de forma compacta e do conceito da parcela " δ " para um sistema com 3 células no "cluster".

Pode-se observar na figura 3.4 que a parcela " δ " possui um valor mínimo correspondente à pior forma que um canal pode ser alocado nas células do sistema. Note que o valor mínimo de " δ " é maior que 0 (zero) pois mesmo na pior forma de alocação um canal ainda pode ser utilizado por várias células. Deve-se observar que o valor mínimo da parcela " δ " é dependente do número " N " de células em um "cluster" do sistema. O valor máximo que a parcela " δ " pode alcançar é 1 (um) e representa a situação onde todos os canais são alocados de forma compacta.

Note que a capacidade de um algoritmo DCA em rearranjar as chamadas para tornar as alocações mais compactas permite que a parcela " δ " aumente.

³ a parcela " δ " representa uma redução no número de canais disponíveis em um "cluster". A razão entre números de células reutilizando um dado canal se iguala na média à razão entre número de canais disponíveis em um "cluster".

Ao utilizar a pior parcela " δ ", as relações (3.5) e (3.6) representam o intervalo de variação de desempenho dos algoritmos DCA-AT. O ganho de capacidade dos algoritmos DCA-AT com relação ao algoritmo FCA pode então ser dado por:

$$\frac{\text{Erl_B}(\delta \cdot \text{CA}, \text{GOS})}{N \cdot \text{Erl_B}(\text{CA}/N, \text{GOS})} \leq \frac{C_{m_{\text{DCA_AT}}}}{C_{m_{\text{FCA}}}} \leq \frac{\text{Erl_B}(\text{CA}, \text{GOS})}{N \cdot \text{Erl_B}(\text{CA}/N, \text{GOS})} \quad (3.7)$$

A fim de exemplificar o uso da relação (3.7) e também para uso futuro, resolveu-se numericamente a relação (3.7) para a condição de um sistema com 70 canais e com 7 células no "cluster", obtendo-se as seguintes variações de ganho de capacidade de algoritmos DCA-AT sobre o algoritmo FCA:

$$\text{Variação para 1\% de probabilidade de bloqueio: } 0,54 \leq \frac{C_{m_{\text{DCA_AT}}}}{C_{m_{\text{FCA}}}} \leq 1,80$$

$$\text{Variação para 5\% de probabilidade de bloqueio: } 0,48 \leq \frac{C_{m_{\text{DCA_AT}}}}{C_{m_{\text{FCA}}}} \leq 1,49$$

Em percentagem, nesta situação, a capacidade de algoritmos DCA-AT, a 1% de probabilidade de bloqueio, pode superar em até 80% a capacidade do algoritmo FCA. A 5% de probabilidade de bloqueio, o ganho de capacidade máximo reduz para 49%.

3.1.4.2. Interdependência de Parâmetros

Conforme pode-se observar em (3.7), o ganho de capacidade devido a adaptabilidade a tráfego de um algoritmo DCA está ligada aos seguintes parâmetros: número "N" de células no "cluster", número total "CA" de canais no sistema e forma de alocação das chamadas (parcela " δ ").

A fim de avaliar corretamente o impacto da variação do desempenho do DCA com a variação destes parâmetros, este item verificará como estes parâmetros se relacionam entre si e como se relacionam com outros parâmetros de relevância no sistema.

O número total "CA" de canais no sistema não possui relação de dependência com os outros parâmetros.

Conforme apresentado por Cimini [7], o número "N" de células no "cluster" influencia a parcela " δ ". O aumento de "N" causa redução no limite inferior da parcela " δ " [7]. Como exemplo, a tabela 3.1 ilustra os limites inferiores que a parcela

" δ " pode alcançar para "clusters" de 3 e 7 células. O limite inferior é obtido através da divisão entre a razão de células reutilizando um canal quando o sistema está operando na pior compactação possível pela razão de células reutilizando um canal quando o sistema está operando na melhor compactação possível. No caso de sistema com "cluster" de 3 células, a melhor compactação permitirá que um terço (0,333...) das células estejam utilizando um canal, conforme mostrado pela figura 3.4-a; enquanto a pior compactação permite que uma dentre sete células (0,14) reutilize um determinado canal. Assim, o limite inferior da parcela " δ " resulta em 0,43. O mesmo raciocínio foi utilizado para obtenção da parcela " δ " em sistemas com "cluster" de 7 células.

N	limite inferior parcela δ	limite superior parcela δ
3	0,14 / 0,33 = 0,43	0,33 / 0,33 = 1
7	0,05 / 0,14 = 0,37	0,14 / 0,14 = 1

Tabela 3.1 - Limites inferior e superior para a parcela " δ " em sistemas hexagonais com "clusters" de 3 e 7 células.

Em algoritmos DCA-AT, a Relação entre o Sinal e a Interferência (SIR) mínima para a qualidade de uma chamada é um dos principais parâmetros do sistema. Assim, o número "N" de células no "cluster" será relacionado com o SIR mínimo no sistema.

O número "N" de células em um "cluster" é relacionado ao SIR mínimo que se deseja garantir no sistema através da seguinte formulação (válida para sistemas hexagonais) [1]:

$$\sqrt{3 \cdot N} = (6 \cdot \text{SIR}_{\min})^{1/\alpha} \quad (3.8)$$

...resultando em:

$$N = \frac{1}{3} \cdot (6 \cdot \text{SIR}_{\min})^{2/\alpha} \quad (3.9)$$

....onde "SIR_{min}" representa o SIR mínimo necessário no sistema (podendo também representar o SIR mínimo para Aceitação de uma chamada) e " α " representa o coeficiente de atenuação com a distância entre ERB e TM.

3.1.4.3. Impacto da Variação de Parâmetros

3.1.4.3.1. Variação no Número de Canais Disponíveis no Sistema

O impacto da variação no número "CA" de canais no sistema está relacionado com o comportamento da função Erlang-B.

Dado que "CA" canais nunca trafegarão mais do que "CA" Erlangs, a função $Erl_B("CA", GOS)$ é limitada superiormente em "CA". Pode-se verificar que:

$$\lim_{CA \rightarrow \infty} Erl_B(CA, GOS) = CA \quad (3.10)$$

...da mesma forma:

$$\lim_{CA \rightarrow \infty} Erl_B\left(\frac{CA}{N}, GOS\right) = \frac{CA}{N} \quad (3.11)$$

Isto significa que o limite superior da capacidade adicional de algoritmos DCA devido à adaptabilidade ao tráfego, lado direito da inequação (3.7), tende à unidade com "CA" tendendo a infinito; isto é, o ganho de capacidade de algoritmos DCA-AT em relação aos algoritmos FCA se anula. Este resultado também pode ser alcançado pela lei dos grandes números: quanto maior o número de canais "CA", menor será a variância do número de chamadas dividido pelo número de canais "CA", tendendo a zero com "CA" tendendo ao infinito [39].

Da mesma forma, o limite inferior do ganho de capacidade devido à adaptabilidade ao tráfego tende ao pior valor de " δ ". Portanto, a inequação (3.7) pode ser rescrita conforme a inequação (3.12) a seguir:

$$\delta \leq \lim_{CA \rightarrow \infty} \frac{Cm_{DCA_AT}}{Cm_{FCA}} \leq 1,0 \quad (3.12)$$

Assim, deve-se esperar desempenho decrescente nos algoritmos DCA com o aumento no número de canais "CA" disponíveis no sistema. Outros trabalhos [7,30,56] também chegaram à mesma conclusão. Em outras palavras, pode-se dizer que o aumento no número de canais "CA" provoca queda no ganho de troncalização de algoritmos DCA.

Dessa forma, deve-se tomar cuidado ao comparar algoritmos DCA-AT utilizando número diferente de canais.

3.1.4.3.2. Efeito da Variação do Número de Células no “Cluster” , no Fator de Compactação "δ" e no Ponto de Referência de Probabilidade de Bloqueio

Conforme (3.9), o aumento no SIR mínimo de chamadas no sistema provoca o aumento no número "N" equivalente de células no “cluster”.

Conforme ilustrado na tabela 3.1, o aumento do "N" equivalente gera uma queda no pior valor que a parcela "δ" pode assumir, reduzindo o limite inferior de (3.7). Além disso, o aumento de "N" também atua nos denominadores desta inequação. O fator "N" multiplicando cada um dos denominadores tende a reduzir ambos limites de desempenho; entretanto, o resultado da função "Erl_B()" tende a diminuir, forçando um aumento dos limites de desempenho. A complexidade da função "Erl_B()" e do cálculo de sua derivada justifica o uso de cálculos numéricos para verificar o comportamento da inequação (3.7) com a variação de "N".

Resolveu-se a inequação (3.7) para um sistema linear (unidimensional) e um sistema hexagonal de células e os resultados se encontram na tabela 3.2 e 3.3.

N	60 canais, 5% prob. bloqueio		60 canais, 1% prob. bloqueio	
	$\frac{Cm_{DCA-AT}}{Cm_{FCA}} \min$	$\frac{Cm_{DCA-AT}}{Cm_{FCA}} \max$	$\frac{Cm_{DCA-AT}}{Cm_{FCA}} \min$	$\frac{Cm_{DCA-AT}}{Cm_{FCA}} \max$
2	0,70	1,10	0,71	1,15
3	0,67	1,19	0,71	1,30
4	0,67	1,28	0,73	1,45
5	0,70	1,37	0,78	1,60
6	0,74	1,46	0,86	1,75
10	0,90	1,84	1,16	2,46
12	0,97	2,05	1,30	2,88

Tabela 3.2 - Variação do intervalo da relação entre a capacidade de tráfego de algoritmos DCA-AT sobre algoritmos FCA com a variação do número "N" de células no “cluster” em sistema linear (unidimensional) com 60 canais, nas condições de 5% e 1% de chamadas bloqueadas.

N	60 canais, 5% prob. bloqueio		60 canais, 1% prob. bloqueio	
	$\frac{Cm_{DCA-AT}}{Cm_{FCA}} \min$	$\frac{Cm_{DCA-AT}}{Cm_{FCA}} \max$	$\frac{Cm_{DCA-AT}}{Cm_{FCA}} \min$	$\frac{Cm_{DCA-AT}}{Cm_{FCA}} \max$
3	0,43	1,19	0,44	1,29
7	0,46	1,53	0,52	1,88

Tabela 3.3 - Variação do intervalo da relação entre a capacidade de tráfego de algoritmos DCA-AT sobre algoritmos FCA com a variação do número "N" de células no “cluster” em sistema hexagonal com 63 canais, nas condições de 5% e 1% de chamadas bloqueadas.

Através dos resultados numéricos apresentados nas tabelas 3.2 e 3.3, pode-se verificar que o aumento de "N" provoca um aumento nos limites mínimo e máximo da relação (3.7).

Para justificar tal efeito, deve-se lembrar que o aumento de "N" provoca uma queda na troncalização do sistema. Esta queda é mais acentuada nos algoritmos FCA, enquanto que a flexibilidade de alocação de canais permite ao algoritmo DCA manter sua capacidade, aumentando o ganho com relação ao FCA. Cimini [7] também chegou à mesma conclusão.

As tabelas 3.2 e 3.3 também apresentam resultados para as condições de 5% e 1% de probabilidade de bloqueio. Pode-se observar que ao reduzir o ponto de referência de 5% para 1% de probabilidade de bloqueio, os algoritmos DCA-AT mostram melhoras no ganho de capacidade relativo ao FCA.

Baseado no exposto, deve-se comparar algoritmos DCA-AT sempre sob o mesmo número de células no conjunto interferente e sob o mesmo ponto de referência de probabilidade de bloqueio.

3.1.4.3.3. Efeito da Variação do SIR Mínimo de Chamadas e do Coeficiente de Propagação

Dado que o coeficiente de propagação " α " e o SIR mínimo de uma chamada no sistema se relacionam com o número "N" de células no "cluster" através da relação (3.9), quanto maior o SIR mínimo de um sistema e/ou quanto menor o coeficiente de propagação " α ", maior será o número "N" equivalente de células no "cluster". Portanto, conforme visto anteriormente, maior será o potencial de ganho de capacidade que algoritmos DCA-AT podem oferecer.

As análises apresentadas mostram que o desempenho de algoritmos DCA pode variar bastante com a variação dos diversos parâmetros, justificando a diversidade de resultados encontrados na literatura. O impacto da variação destes parâmetros reforça a necessidade de se analisar o desempenho de algoritmos DCA sob o mesmo ambiente de simulação.

3.1.4.4. Impacto do Controle de Potência

Dado que os algoritmos DCA-AT se baseiam em distâncias mínimas entre ERBs co-canais pré-fixadas, distâncias estas baseadas nas piores condições de localização dos TMs, o controle de potência não irá melhorar o desempenho dos mesmos.

Note que, mesmo que um TM esteja próximo da ERB e estes decidam utilizar potências de transmissão menores, os algoritmos DCA-AT mantêm a distância mínima de reuso, pois os mesmos não possuem conhecimento da localização do móvel na célula nem possuem conhecimento das suas condições de interferência. Para o algoritmo DCA-AT, o canal é alocado para este TM da mesma forma que se este TM estivesse localizado na fronteira da célula correspondente.

3.1.5. Desempenhos Reportados na Literatura

Diversos trabalhos na literatura analisaram o desempenho de Algoritmos DCA-AT [6,7,30,33,36,44,47,49,53-55]. O critério de avaliação dos algoritmos utilizado foi baseado principalmente no ganho de capacidade que os mesmos oferecem sobre o algoritmo FCA.

Dado que a maioria dos algoritmos possuíam um controle centralizado ou regionalizado, era possível a implementação de algoritmos com rearranjo ("intracell handoffs") conforme descrito no item 3.1.3 sem prejudicar aspectos de estabilidade das chamadas no sistema. Dessa forma, não foi necessária a análise da probabilidade de queda de chamadas.

Da mesma forma, dado que os algoritmos DCA-AT garantem o nível de qualidade SIR através da imposição da separação mínima de células co-canais, da mesma forma que no FCA, não foi necessário verificar a qualidade das chamadas.

Os diversos tipos de algoritmos DCA-AT apresentados na literatura estudaram principalmente a condição de tráfego uniforme, apesar da principal vantagem dos algoritmos DCA-AT ser encontrada em situações de variação de tráfego.

3.1.5.1. Desempenhos em Situações de Tráfego Uniforme

Embora a principal vantagem dos algoritmos DCA-AT é a sua adaptabilidade às variações acentuadas de tráfego, é importante avaliar como o mesmo se comporta em situações de tráfego uniforme, onde a variação de tráfego espacial e temporal é menor.

Nesta situação, os trabalhos relataram resultados de ganhos de capacidade sobre o FCA que variam desde -3% até +100%.

A análise teórica do item 3.1.4 ajuda a entender a diversidade dos resultados.

Algoritmos DCA-AT cujos resultados de desempenho foram obtidos em sistemas com muitos canais mostraram baixo desempenho. Para um sistema com 7 células no "cluster" ("N"=7), Cimini [7] simulou o algoritmo DCA-AT Tímido e encontrou ganhos de capacidade sobre o FCA variando de -3% ("CA"=112 canais) a 23% ("CA"=56 canais) no ponto de 1% de probabilidade de bloqueio. Estes resultados estão dentro dos limites de capacidade da relação (3.7). Aliás, os resultados estão bem inferiores ao limite máximo de capacidade (53% para o caso de "CA"=112 canais e 98% para o caso de "CA"=56 canais). Justifica-se o desempenho pobre pelo fato destes algoritmos serem "tímidos", isto é, não se utilizam do rearranjo de chamadas em andamento para melhorar a parcela " δ " de compactação. Chih Li [30] também simulou o comportamento de algoritmos DCA-AT Tímidos em um sistema com 35 e 70 canais, encontrando ganhos de capacidade sobre FCA de 47% e 11% respectivamente, sobre 1% de probabilidade de bloqueio. Estes resultados também estão dentro do limite teórico da relação (3.7).

Mesmo no caso de algoritmos DCA-AT Educados, encontrou-se ganhos baixos para o caso de alto número de canais. Em um sistema de 7 células no "cluster" ("N"=7), Chih Li [30] encontrou ganho de 14% para "CA"=420 canais no sistema e 18% para "CA"=350 canais em seu algoritmo DCA-AT "Local Packing". Os limites de capacidade para o ganho nestes casos, fornecidos pela relação (3.7), são de 20% e 23% respectivamente. Note que o fato do algoritmo utilizar rearranjos de chamadas em andamento permitiu ao mesmo uma melhor parcela " δ " de compactação. Outra razão para o bom desempenho do algoritmo "Local Packing" proposto por Chih Li [30] foi a maior prioridade dada à alocação de canais que formassem padrões compactos de reuso.

Por outro lado, se for considerado um baixo número de canais no sistema ou se aumentar-se o número de células no “cluster”, os ganhos de capacidade tendem a ser maiores.

Sob o mesmo algoritmo, Chih Li [30] reduziu o número de canais para "CA" $=35$, o ganho de capacidade do seu algoritmo DCA-AT subiu para 100% sobre o FCA. Resultado esperado, pois o limite de capacidade teórico também subiu para 159% neste caso. McEliece [53], apesar de considerar 96 canais em suas avaliações, considerou 12 células no “cluster” ("N" $=12$). McEliece [53] avaliou diversos tipos de algoritmos comparando-os com o FCA. Os ganhos de capacidade variaram de 33% a 75% a 1% de probabilidade de bloqueio, estando dentro do limite de capacidade teórico para esta condição (114%).

Um cenário muito simulado pelos diversos trabalhos foi o cenário de "CA" $=70$ canais totais para 7 células no “cluster” e 1% de probabilidade de bloqueio. Neste caso, os algoritmos DCA-AT Educados [30,33,36,47,54,55] alcançaram resultados variando de 44% a 67% (limite teórico para esta condição: 80%). Pode-se notar uma variância bem menor nestes resultados, sendo os resultados maiores referentes a algoritmos que visam a alocação de canais "compactos" [33,54,55].

3.1.5.2. Desempenhos em Situações de Concentração de Tráfego

Dado que o algoritmo FCA é projetado para as cargas médias de tráfego em cada célula, variações temporais e espaciais de tráfego penalizarão bastante o desempenho do mesmo. A adaptabilidade às variações de tráfego dos algoritmos DCA-AT deve portanto ser melhor observada nas situações de concentração de tráfego. Alguns trabalhos também analisaram esta condição [30,49].

Chih Li [30] analisou diversos casos de concentração de tráfego. Seu algoritmo DCA-AT "Local Packing" conseguiu cursar mais de 100% de tráfego do que o algoritmo FCA sobre as mesmas condições, mesmo em situações com alto número de canais.

Kuek [49] simulou situações de congestionamento em uma rodovia. Enquanto o algoritmo FCA sofria probabilidades de bloqueio da ordem de 50%, seu algoritmo DCA-AT proposto alcançava probabilidades de bloqueio da ordem de 10%.

3.1.6. Benefícios de Algoritmos DCA-AT

Conforme visto anteriormente, os algoritmos DCA-AT possuem flexibilidade na alocação de canais, permitindo que uma célula possa suportar mais chamadas simultâneas. Esta flexibilidade permite aos algoritmos DCA-AT oferecer os seguintes benefícios sobre algoritmos FCA:

- **melhor troncalização:** conforme explicado no item 3.1.4, e comprovado por muitos trabalhos na literatura, os algoritmos DCA-AT permitem uma adaptabilidade às variações do tráfego instantâneas sobre a média projetada, reduzindo a probabilidade de bloqueio. A menor probabilidade de bloqueio pode representar uma melhor disponibilidade do sistema ou uma maior capacidade para cursar tráfego sobre uma mesma probabilidade de bloqueio.

- **adaptabilidade às variações de tráfego:** ao permitir o redirecionamento de canais para células sobrecarregadas, os algoritmos DCA-AT permitem evitar a degradação do grau-de-serviço nestas células [7,30,49].

3.1.7. Dificuldades de Implementação

Conforme visto, os algoritmos DCA-AT são capazes de diminuir os problemas de perda de troncalização e variabilidade de tráfego entre células encontrados nos sistemas celulares atuais. Entretanto, a implementação destes algoritmos traz algumas dificuldades [5,11,21,28]:

- necessidade de controle centralizado ou regionalizado;
- trabalho de planejamento de frequências ainda é necessário.

A necessidade dos algoritmos DCA-AT utilizarem um controle centralizado ou regionalizado causaria um aumento no tráfego de informações trocadas entre ERBs e CCC. Com o aumento de células no sistema, o aumento de tráfego provindo desta centralização começa a ser problemático.

Os algoritmos DCA-AT ainda exigem o trabalho de planejamento de frequências para que se defina a matriz de compatibilidade entre células. Além disso, expansões ou alterações no sistema celular exigiriam que a matriz de compatibilidade fosse reformulada.

Estas características dificultam ou impossibilitam a implementação de algoritmos DCA-AT em sistemas microcelulares.

3.2. Algoritmos DCA Adaptativos a Interferência (DCA-AI)

Conforme visto em itens anteriores, a descentralização de algoritmos de alocação e a redução no trabalho de planejamento e reconfiguração de sistemas são considerações essenciais para a implementação de um sistema microcelular.

Os algoritmos DCA-AI foram propostos com o principal objetivo de resolver estes problemas, apesar de muitos trabalhos se concentrarem no ganho de capacidade que os mesmos podem oferecer.

Muitos trabalhos estudaram as características e capacidades de algoritmos DCA-AI [5,9-14,16-20,22-29,32,34,35,37,39-42,56-68]. Conforme será visto neste item, as características dos algoritmos DCA-AI permitem [5,9-13,17-20,23-28,31,39,42,56,57,62,63,42,66,69]:

- implementação descentralizada;
- planejamento de frequência automático;
- adaptabilidade às variações de tráfego;
- aumento de capacidade através do aumento da troncalização e menores distâncias de reuso de canais.

3.2.1. Filosofia Básica de Funcionamento

3.2.1.1. Funcionamento Distribuído

A disponibilidade de canais em algoritmos DCA-AI é definida por medidas locais de interferência recebida. Um determinado canal " CA_i " estará disponível à alocação se a potência " I_i " interferente recebida no mesmo estiver abaixo de um determinado limiar que permita uma conversação com um nível mínimo de qualidade.

Assumindo que o nível de potência de sinal " S_i " desejado possa ser determinado através de trocas de mensagens entre ERB e TM, um canal " CA_i " estará disponível se satisfizer à condição (3.13):

$$\left(\frac{S_1(\text{TM})}{I_1(\text{TM})} \geq \text{SIR_Aceit.}, \frac{S_1(\text{ERB})}{I_1(\text{ERB})} \geq \text{SIR_Aceit.} \right) \quad (3.13)$$

...onde:

- $S_1(\text{TM})$: nível de potência de sinal desejado recebido no canal "1" pelo TM;
- $I_1(\text{TM})$: nível de potência de interferência recebida no canal "1" pelo TM;
- $S_1(\text{ERB})$: nível de potência de sinal desejado recebido no canal "1" pela ERB;
- $I_1(\text{ERB})$: nível de potência de interferência recebida no canal "1" pela ERB;
- SIR_Aceit : nível mínimo da relação entre o Sinal e a Interferência (qualidade mínima) para se aceitar uma nova chamada;

Esta forma de funcionamento permite a implementação distribuída de algoritmos DCA-AI pois a própria ERB e o TM envolvidos na chamada poderão determinar se um dado canal está disponível ou não simplesmente medindo a interferência recebida no mesmo. Ao verificar cada um dos canais do sistema, TM e ERB podem definir quais canais estão disponíveis. A figura 3.5 ilustra o processo.

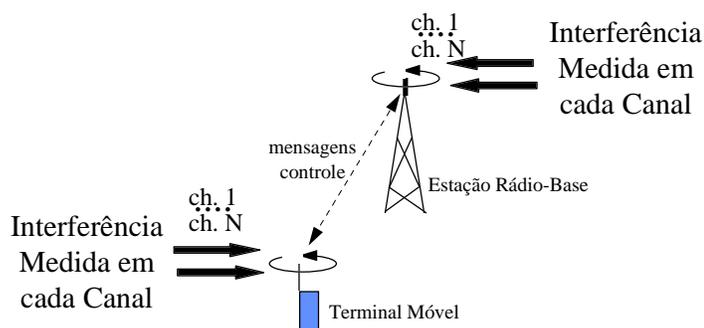


Fig. 3.5 - TM e ERB decidem quais canais estão disponíveis para a comunicação através de medições de interferência em cada canal do sistema.

Uma vez definida a disponibilidade de cada canal, o algoritmo DCA-AI pode definir o canal a alocar para o TM e a ERB em questão. Note que o processo acima descrito não exige qualquer troca de informações com outras ERBs ou TMs no sistema para permitir a alocação do canal.

O caráter distribuído dos algoritmos DCA-AI implica em uma "agressividade" natural destes algoritmos. Ao alocar uma chamada, a ERB e o TM não conseguem determinar se o uso do canal escolhido interferirá excessivamente em outras chamadas em andamento. Assim, é possível que a alocação de um canal a um par ERB-TM possa causar a queda do nível de qualidade (relação SIR entre Sinal

desejado e Interferência) abaixo do nível mínimo exigido em outras chamadas em andamento neste canal.

No momento que um par ERB-TM identifique que seu nível de qualidade caiu abaixo do nível mínimo exigido ("SIR_Min") , ambos iniciarão um processo de mudança de canal ("intracell handoff"). Note que o nível "SIR_Min" pode ser diferente do nível "SIR_Aceit". Neste processo, ERB e TM determinarão canais disponíveis e decidirão por um novo canal a utilizar através do mesmo processo de início de uma nova chamada. Durante o processo de mudança de canal, um canal "CA₁" estará disponível para mudança se satisfizer a condição (3.14):

$$\left(\frac{S_1(\text{TM})}{I_1(\text{TM})} \geq \text{SIR_Intraho}, \frac{S_1(\text{ERB})}{I_1(\text{ERB})} \geq \text{SIR_Intraho}\right) \quad (3.14)$$

...onde "SIR_Intraho" se refere ao nível mínimo de qualidade para se aceitar uma mudança de canal.

Caso o par ERB-TM não consiga encontrar um novo canal que satisfaça a condição (3.14) para operar, a chamada será interrompida.

O fenômeno de interferência excessiva e interrupção de chamadas deve ser mantido em níveis baixos para se garantir um bom grau de serviço e evitar instabilidades no sistema. Os parâmetros de "SIR_Min", "SIR_Aceit." e "SIR_Intraho" podem ser utilizados para se controlar o comportamento de algoritmos DCA-AI.

3.2.1.2. Planejamento Automático de Frequências e Reconfiguração Automática de Sistemas

O comportamento distribuído dos algoritmos DCA-AI também dispensam o trabalho de planejamento de frequência, dado que o próprio processo de medição de interferência evita que canais sejam reutilizados muito próximos uns dos outros.

A filosofia dos algoritmos DCA-AI permite reconfiguração automática do sistema pela mesma razão. Note que a introdução ou retirada de uma ERB no sistema será sentida nas outras ERBs através do aparecimento ou desaparecimento de níveis de interferência recebidos nos diversos canais. O processo de alocação se encarregará de fazer com que a nova ERB encontre canais a utilizar.

3.2.1.3. Adaptabilidade às Variações de Tráfego

Note que o processo de alocação não impõe qualquer limitação quanto ao número máximo de canais que uma determinada ERB pode utilizar. Isto significa que, enquanto existirem canais e transceptores disponíveis para uso na ERB, os mesmos podem ser alocados a TMs que requisitem o acesso, da mesma forma que nos algoritmos DCA-AT.

Isto significa que os algoritmos DCA-AI também possuem adaptabilidade ao tráfego da mesma forma que visto no item 3.1. Além disso, a flexibilidade de alocar canais baseados na demanda dos TMs fornece melhor troncalização aos algoritmos DCA-AI quando comparados ao algoritmo FCA, da mesma forma que observado nos algoritmos DCA-AT.

3.2.1.4. Flexibilização da Distância de Reuso de Canais

Conforme visto no item 3.1, os algoritmos DCA-AT baseiam suas alocações no planejamento prévio de frequências. A fim de garantir um determinado nível de qualidade, este planejamento é construído de tal forma que TMs operando no limiar de fronteira das células possuam o nível de qualidade requerido. Além disso, a fim de garantir que as variações no nível de sinal causadas pelo desvanecimento não abaiquem o nível de qualidade, uma margem de segurança é adicionada no projeto.

Obviamente, nem todos os TMs estarão operando na fronteira de sua célula. Adicionalmente, muitas chamadas conseguem operar com boas condições de propagação. Assim, muitos TMs possuirão níveis de qualidade superiores ao mínimo exigido.

Ao alocar canais, os algoritmos DCA-AI não utilizam as margens de projeto utilizadas no planejamento de frequência. Isto é, os algoritmos DCA-AI consideram, indiretamente, a localização atual que o TM possui em relação à ERB; e consideram as condições de propagação atuais que resultam no nível de sinal e interferência recebidos.

Ao considerar a localização atual do TM, os algoritmos DCA-AI permitem menores distâncias de reuso de canais. Tal situação pode ser exemplificada pela figura 3.6. Algoritmos DCA-AI podem permitir que dois TMs próximos às suas respectivas ERBs operem no mesmo canal em células vizinhas.

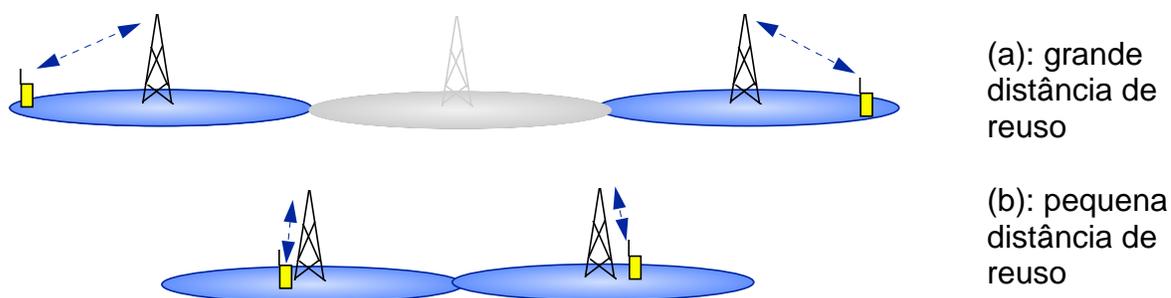


Fig. 3.6 - Flexibilização da distância mínima de reuso de canais de algoritmos DCA-AI. Em (a), pode-se observar um exemplo de alocação no qual o algoritmo DCA-AI automaticamente escolheria quando usuários estão operando próximos à fronteira da célula. Em (b), pode-se observar a menor distância de reuso quando os TMs operam próximos às suas respectivas ERBs.

Ao permitir menores distâncias de reuso de canais, os algoritmos DCA-AI permitem capacidades de tráfego bem superiores às capacidades alcançadas pelos algoritmos FCA e DCA-AT, que operam com distância mínima de reuso fixa.

Por outro lado, ao eliminar a distância mínima de reuso decorrente das considerações conservadoras de localização e propagação, o nível médio de qualidade das chamadas tende a cair. Isto ocorre porque anteriormente grande parte das chamadas ocorria dentro da margem de projeto, possuindo nível de qualidade superior ao mínimo exigido. Ao permitir alocações com menor distância de reuso de canais, mais chamadas ocorrerão sem este nível de qualidade excessivo.

Dessa forma, a maior capacidade de tráfego dos algoritmos DCA-AI são acompanhadas de uma redução no nível médio de qualidade das chamadas. Este compromisso entre qualidade e capacidade foi reconhecido por outros trabalhos publicados [11,12,56].

Conforme citado em 3.2.1.3, algoritmos DCA-AI também tem sua capacidade beneficiada com uma melhor troncalização de canais que nos algoritmos FCA. A capacidade final dos algoritmos DCA-AI é portanto uma combinação entre o seu ganho de capacidade devido ao ganho de troncalização e o ganho devido à maior flexibilidade no reuso de canais.

3.2.2. Algoritmo DCA-AI "Maximum Packing" (DCA-AI-MP)

Embora o ganho de capacidade não seja o ponto principal de vantagem dos algoritmos DCA-AI, uma versão do algoritmo "Maximum Packing" de capacidade ótima foi sugerida para os algoritmos DCA-AI [11,16,38,39].

O algoritmo DCA-AI "Maximum Packing" (DCA-AI-MP) considera que o sistema possui conhecimento total do sistema: potências de transmissão de todos os TMs e ERBs, distâncias relativas e condições de propagação. A partir destes parâmetros, um algoritmo de alocação poderia testar as diversas combinações de alocação de forma a satisfazer a condição (3.13) para o máximo de chamadas possível.

Haas [38] sugeriu uma heurística mais simplificada para o processo de alocação, dado que a procura exaustiva por uma combinação ótima é impraticável.

Haas sugeriu o uso de uma matriz de compatibilidade similar à utilizada no algoritmo DCA-AT-MP. A matriz " MC_{AI} " é uma matriz quadrada com " T " colunas e linhas, onde " T " é o número de TMs ativos em um determinado instante no sistema.

$$MC_{AI} = \begin{bmatrix} 1 & c_{1,2} & \cdot & c_{u,v} & c_{1,T} \\ c_{2,1} & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & c_{T-1,T} \\ c_{T,1} & \cdot & \cdot & c_{T,T-1} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

...onde:

- T : número de TMs ativos em um determinado instante no sistema;
- $c_{u,v} = 0$ se os TMs " v " e " u " podem utilizar o mesmo canal simultaneamente⁴;
- $c_{u,v} = 1$ se os TMs " v " e " u " não podem utilizar o mesmo canal simultaneamente.

Note que, diferentemente da matriz de compatibilidade do algoritmo DCA-AT-MP, a matriz " MC_{AI} " reflete uma condição instantânea de interferência do sistema e depende da localização relativa dos TMs entre si e com relação às suas respectivas ERBs; portanto, a mesma varia à cada instante.

⁴ a matriz " MC_{AI} " reflete somente um interferente por TM, resultando em alocações otimistas. Haas mostrou que esta consideração representa erros de 8% a 32% quando comparada com a condição onde todos os interferentes são considerados.

A matriz " MC_{AI} " pode ser vista como um grafo onde TMs ativos são vértices do grafo e dois vértices são conectados se os TMs não puderem utilizar o mesmo canal. A figura 3.7 ilustra o conceito:

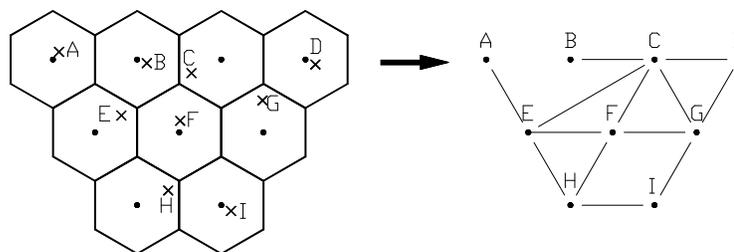


Fig. 3.7 - Similaridade entre compatibilidade de TMs e grafo. Os sinais "x" nas células hexagonais representam TMs.

Note no exemplo da figura 3.7 que os TMs A e B podem reutilizar o mesmo canal pois estão localizados próximos a suas respectivas ERBs, assim, o grafo não possui uma conexão entre os vértices A e B.

O problema de alocação de canais a TMs em um sistema celular é equivalente ao problema de coloração de um grafo, onde dois vértices conectados não podem utilizar a mesma cor. No problema em questão, dois TMs incompatíveis não podem estar utilizando o mesmo canal. Os canais são alocados seguindo conhecidas técnicas de coloração de grafos, podendo-se determinar o número mínimo de canais necessários para servir um determinado número de TMs ativos em um dado instante [38].

O algoritmo DCA-AI-MP proposto por Haas obviamente necessita de controle centralizado com conhecimento de todos os parâmetros, portanto possui interesse somente teórico. É interessante observar que neste algoritmo, à cada mudança na matriz de compatibilidade, ou seja, à cada início ou fim de chamada, à cada movimento de usuário ou à cada variação da componente de desvanecimento lognormal, diversas ou até todas as chamadas podem ter seus canais rearranjados.

O uso de um cenário particular e uma forma diferente de simulação dificulta a transposição dos resultados de capacidade alcançados por Haas [38]. A aplicação da heurística sugerida em cenários padrões e sob simulação baseada em eventos é um ponto interessante para pesquisa futura.

Outros trabalhos propuseram algoritmos centralizados com o mesmo objetivo de maximizar o número de TMs ativos nos canais do sistema [40,61]. Outros trabalhos propuseram algoritmos semi-centralizados, onde ERBs de uma mesma região trocavam informações para basear suas decisões de alocação de canal [57].

Conforme explicado anteriormente, algoritmos descentralizados são preferidos pois evitam o alto tráfego na rede de comunicação entre ERBs previsto para algoritmos centralizados, além de facilitar reconfigurações do sistema.

3.2.3. Algoritmos DCA-AI Descentralizados

3.2.3.1. Tipos de Algoritmos DCA-AI Descentralizados

O processo de alocação de uma chamada em um algoritmo DCA-AI descentralizado é composto das seguintes etapas (processo similar ao sugerido por [12,56]):

1. Seleção de ERB com a qual um TM trabalhará;
2. Determinação de canais disponíveis à alocação;
3. Seleção de canal a utilizar dentre os canais disponíveis;
4. Forma de uso do canal.

Em cada uma das etapas, os algoritmos DCA-AI podem adotar comportamentos distintos.

Com respeito à forma de seleção de ERB a utilizar, os algoritmos DCA-AI podem adotar facilidades de roteamento de chamadas, onde um TM é redirecionado para outra ERB caso uma ERB não consiga alocar um canal para o mesmo ("Direct Retry") [12,50].

A determinação de canal disponível pode ser feita a partir de inferências do SIR que a chamada teria se utilizasse o canal ou através da única medida de interferência recebida no canal. No primeiro caso, o algoritmo utiliza medidas de atenuação entre TM e ERB e medidas de interferência recebida no canal. A partir destes dados, o algoritmo pode inferir qual será o SIR da chamada se o canal for escolhido para uso. No segundo caso, o algoritmo possui somente medidas de interferência recebida. Durante esta fase, o algoritmo DCA-AI compara a medida de SIR ou interferência com um valor de limiar. Caso o canal possua medida que satisfaça o limiar, o mesmo é caracterizado como disponível. Note que existe uma diferença sutil entre ambas as formas de determinação de disponibilidade: no segundo caso, o valor absoluto da medida de interferência recebida no canal é utilizado na determinação; no primeiro caso, utiliza-se o valor relativo desta medida,

pois o valor de SIR depende do nível de sinal desejado recebido, que por sua vez depende da potência de transmissão e da atenuação entre TM e ERB.

Uma vez que se determine o conjunto de canais disponíveis, deve-se selecionar o canal a alocar deste conjunto. A partir da forma de seleção, pode-se identificar diversos tipos de algoritmos DCA-AI:

- Seleção do canal de melhor Qualidade (QUAL) [9, 17, 18, 20, 26, 27, 29, 34, 41, 56, 58, 60, 63, 65, 66]: seleciona o canal com melhor qualidade (SIR) dentre os canais vasculhados, desde que com qualidade superior à mínima requerida ("SIR_Aceit");
- Seleção do canal de melhor Preço (PREÇO) [27,56]: seleciona o canal com pior qualidade (SIR) dentre os canais vasculhados, desde que com qualidade superior à mínima requerida ("SIR_Aceit");
- Seleção Randômica (RANDOM) [11,58]: vasculha canais a partir de um ponto aleatório da lista de canais até encontrar um canal com qualidade superior à mínima requerida ("SIR_Aceit");
- Seleção de canal baseado em funções de Prioridade.

Dentre os algoritmos que selecionam o canal baseado em funções de Prioridade, podem-se citar os algoritmos que se baseiam em alocações passadas bem sucedidas. Um exemplo muito conhecido desta forma de algoritmo é o algoritmo de Segregação de Canais ("Channel Segregation" - CHANSO) [5, 10, 21, 23, 28, 52, 62, 66, 67]. Nestes algoritmos, procura-se utilizar mais freqüentemente canais que foram alocados com sucesso no passado.

A função de prioridade também pode se basear em outros parâmetros. O algoritmo de Partição de Reuso ("Reuse Partitioning"-RUP) fornece prioridade à alocação de canais que promovam a formação de diversos padrões distintos de reuso de acordo com a distância do TM à ERB [5,17,19,23,24,26, 27,39,41,56,58-60,64]. A fim de permitir a implementação distribuída, estes algoritmos se utilizam de medidas de atenuação no trajeto ERB-TM. Note que esta medida pode idealmente ser obtida através da comunicação da potência transmitida e medida de potência recebida.

Quanto à forma de uso, uma vez definido o canal, o mesmo pode ser utilizado com ou sem controle de potência. Pode-se definir inclusive se o controle de potência

será somente no sentido TM-ERB ou no sentido ERB-TM ou em ambos os sentidos. O algoritmo DCA-AI pode utilizar diferentes formas de controle de potência:

- Controle de Potência que mantém o sinal transmitido constante (esta condição é considerada como a condição "sem controle de potência" neste trabalho)
- Controle de Potência para manter sinal recebido constante [9, 17-19, 23, 24, 38, 56, 57];
- Controle de Potência para manter nível de SIR constante [5, 12, 32, 34, 58, 62, 63, 70].

No primeiro caso, o caso sem controle de potência, todos os TMs e ERBs estariam utilizando o canal transmitindo à máxima potência. No segundo caso, os TMs e/ou ERBs estariam controlando sua potência de transmissão para compensar as perdas por atenuação e desvanecimento. No terceiro caso, os TMs e/ou ERBs estariam ajustando sua potência de transmissão para que o sinal recebido seja sempre superior, de uma dada quantidade de dBs, ao nível de interferência recebido.

A forma de uso do canal exerce uma influência muito grande no sistema dado que potências de interferência menores permitem um aumento na capacidade do sistema aceitar novas chamadas. Note que no caso do algoritmo FCA, a distância fixa de reuso impossibilita que o mesmo possa tirar proveito da menor potência interferente.

A forma com que cada algoritmo DCA-AI procede em cada uma das etapas do processo de alocação pode afetar seu desempenho: capacidade, estabilidade e qualidade de chamadas. Dessa forma, ao analisar o desempenho das diversas formas de implementação, deve-se procurar analisar cada um desses efeitos em cada forma de implementação.

Este trabalho irá analisar em detalhes as diversas formas de seleção de canal e de uso de canal e como as diferentes formas afetam o desempenho global dos algoritmos DCA-AI distribuídos. Será considerado que os algoritmos não estarão utilizando roteamento de chamadas e que os mesmos decidem a disponibilidade de cada canal através de medidas de interferência de SIR. O estudo do efeito da variação destas considerações deve ser objeto de trabalhos futuros.

3.2.4. Análise Teórica

Conforme pode ser visto no item 3.2.1, o funcionamento de sistemas utilizando algoritmos DCA-AI é muito complexo. A sua análise teórica é portanto difícil, justificando o uso de simulações para avaliar o desempenho dos mesmos.

Embora não sejam exatas, as análises teóricas podem auxiliar no entendimento do funcionamento destes algoritmos, além de fornecer uma ordem de grandeza para o desempenho dos mesmos e permitir analisar a influência de cada parâmetro. Com esse intuito em mente, os algoritmos DCA-AI serão analisados teoricamente neste item. Serão analisados os casos sem controle de potência e com controle de potência para um algoritmo DCA-AI genérico.

Conforme mencionado anteriormente, o ganho de algoritmos DCA-AI sobre algoritmos FCA é resultado da combinação do ganho devido à melhor troncalização de canais e do ganho devido à flexibilização do reuso de canais. Este item irá considerar primeiramente somente o ganho devido à flexibilização do reuso de canais. Assim, a análise se refere à capacidade de um determinado canal no sistema e não do sistema como um todo.

Whitehead [56] sugeriu uma forma de compor o ganho devido à melhor troncalização de canais com o ganho devido à flexibilização do reuso de canais. Esta formulação será apresentada ao final do item, permitindo deduzir um limite máximo para o ganho de capacidade de algoritmos DCA-AI com relação aos algoritmos FCA.

Para as análises teóricas, foi considerado o modelo de propagação dado em (3.16). Este modelo de propagação foi utilizado pela maioria dos trabalhos na literatura, com diferentes coeficientes de atenuação e variâncias para o desvanecimento lognormal.

$$Pr = Pt \cdot d^{-\alpha} \cdot LF \quad (3.16)$$

...onde:

- Pr: potência recebida no TM ou ERB;
- Pt: potência transmitida pela ERB ou TM;
- d: distância entre o TM e a ERB;
- α : coeficiente de propagação;
- LF: desvanecimento lognormal entre o TM e a ERB.

3.2.4.1. Análise de Ganho de Capacidade devido à Flexibilização do Reuso de Canais - sem Controle de Potência

Supondo uma determinada área de serviço de abrangência do sistema celular, a capacidade de um canal em um sistema utilizando um determinado algoritmo DCA-AI será considerada, para fins desta análise teórica, como sendo o número máximo de usuários que conseguem operar neste canal dentro da área de serviço do sistema.

Ao relacionar o número de usuários ativos em um canal com o SIR enfrentado por estes usuários, pode-se analisar o comportamento de algoritmos DCA-AI. Os passos seguintes estabelecem esta relação e são baseados em análises similares de Whitehead [56] e Zander [39].

O SIR no sentido TM - ERB de uma determinada chamada sendo efetuada por um dos usuários ativos pode ser obtido pela relação (3.17): (formulação similar pode ser utilizada no sentido ERB-TM)

$$SIR_{TM_i-ERB_i} = \frac{P_{t_{TM_i}} \cdot d_{i,i}^{-\alpha} \cdot LF_{i,i}}{\sum_{j \neq i} P_{t_{TM_j}} \cdot d_{j,i}^{-\alpha} \cdot LF_{j,i}} \quad (3.17)$$

...onde:

- $SIR_{TM_i-ERB_i}$: SIR no sentido TM-ERB entre o TM "i" e a ERB "i".
- $P_{t_{TM_i}}$: potência transmitida pelo TM "i";
- $P_{t_{TM_j}}$: potência transmitida pelo TM "j";
- $d_{i,i}$: distância entre o terminal "i" e a ERB "i";
- $d_{j,i}$: distância entre o terminal "j" (interferente) e a ERB "i";
- α : coeficiente de atenuação de propagação;
- $LF_{i,i}$: parcela adicional de desvanecimento lognormal entre o móvel "i" e a ERB "i";
- $LF_{j,i}$: parcela adicional de desvanecimento lognormal entre o móvel "j" e a ERB "i";

Na formulação (3.17), considerou-se que o sistema estaria operando limitado pela interferência, com potências recebidas bem superiores ao nível de ruído.

Em um sistema sem controle de potência e sem considerar a influência dos desvanecimento lognormal, a relação (3.17) se reduz a:

$$SIR_{TM_i-ERB_i} = \frac{d_{i,i}^{-\alpha}}{\sum_{j \neq i} d_{j,i}^{-\alpha}} \quad (3.18)$$

Considerando que os usuários interferentes estarão a uma distância média "D" aproximadamente igual, a relação (3.18) se reduz a:

$$SIR_{TM_i-ERB_i} = \frac{d_{i,i}^{-\alpha}}{ni \cdot D^{-\alpha}} \quad (3.19)$$

...onde "ni" representa o número médio de usuários interferentes.

Supondo que as células no sistema tenham raio "R" e analisando a relação em dB, (3.19) pode ser escrita como:

$$SIR_{TM_i-ERB_i} (dB) = 10 \cdot \alpha \cdot \log_{10} \left(\frac{D}{\beta_i \cdot R} \right) - 10 \cdot \log_{10}(ni) \quad (3.20)$$

....onde " β_i " é um valor entre 0 e 1 que se refere à distância do TM "i" à ERB "i" em relação ao raio "R" da célula.

Manipulando a relação (3.20), chega-se à:

$$\frac{D}{\beta_i \cdot R} = 10^{\frac{(SIR_{TM_i-ERB_i} (dB) + 10 \cdot \log_{10}(ni))}{10 \cdot \alpha}} \quad (3.21)$$

...extraíndo o logaritmo sobre base 2 e simplificando:

$$\frac{D}{\beta_i \cdot R} = 2^{\frac{SIR_{TM_i-ERB_i} (dB) + 10 \cdot \log_{10}(ni)}{3 \cdot \alpha}} \quad (3.22)$$

...dividindo-se por 2, elevando-se ao quadrado e multiplicando-se por π ambos os lados da equação, chega-se à:

$$\pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \cdot \frac{\beta_i^2 \cdot R^2 \cdot 2^{\left(\frac{SIR_{TM_i-ERB_i} (dB) + 10 \cdot \log_{10}(ni)}{1,5 \cdot \alpha} \right)}}{4} \quad (3.23)$$

...que finalmente se resume a:

$$Area = k \cdot \beta_i^2 \cdot R^2 \cdot 2^{\left(\frac{SIR_{TM_i-ERB_i} (Db) + 10 \cdot \log_{10}(ni)}{1,5 \cdot \alpha} \right)} \quad (3.24)$$

...onde "Area" se refere à área de um círculo de raio "D/2" circundando a ERB "i" onde não existem usuários interferentes. Pode-se então definir a área ocupada por cada usuário no sistema. Considerou-se um raio de "D/2" a fim de se evitar áreas de superposição. O círculo circundando uma ERB (ou um TM na análise no sentido ERB-TM) pode ser chamado de "círculo de reuso" [39] ou "área de interferência" [56].

Dado que cada área corresponde a somente 1 usuário, a somatória das áreas não pode ser maior que a área de serviço total. A figura 3.8 auxilia no entendimento [39].

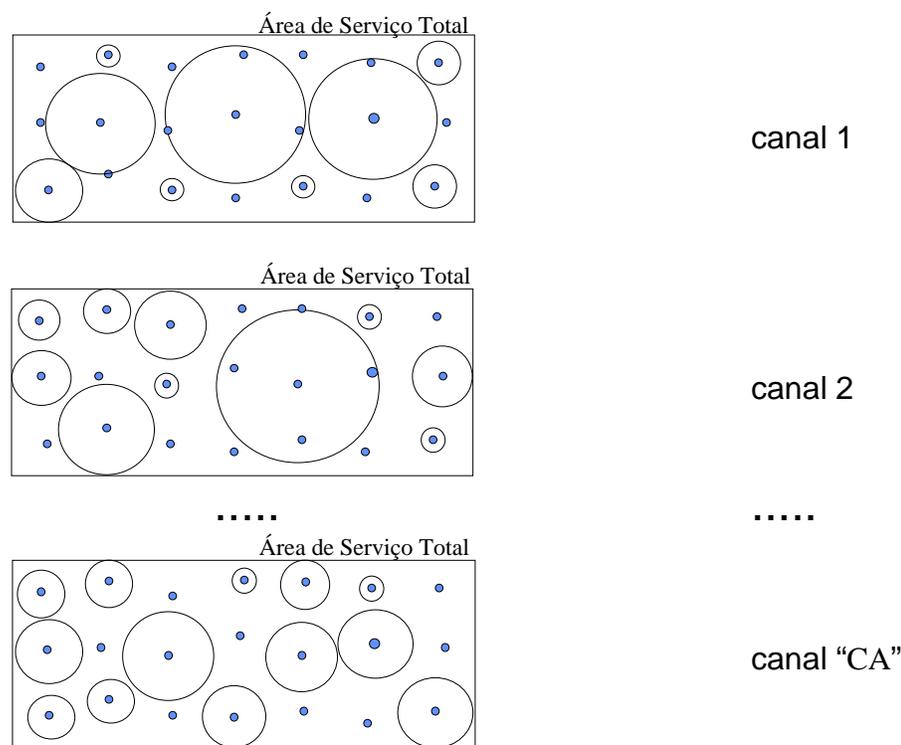


Fig. 3.8 - "Círculos de Reuso" em Algoritmos DCA-AI. Note que em cada canal, os círculos de reuso não se sobrepõe. Pontos sem círculos de reuso representam ERBs (ou TMs) inativos no canal. (figura extraída de [39])

Dessa forma, a capacidade de um canal depende inversamente das áreas ocupadas pelas chamadas. Isto é, quanto maior forem as áreas ocupadas por cada chamada utilizando o canal, menor será o número de chamadas que podem ocupar o canal para um determinado SIR.

A partir desta formulação, pode-se concluir diversos aspectos do funcionamento de algoritmos DCA-AI com respeito ao SIR das chamadas:

- Dado que a área de cada círculo de reuso circundando uma ERB utilizando o canal aumenta com o aumento de SIR(dB) da chamada, pode-se inferir que quanto maior o SIR médio das chamadas, maiores serão as áreas ocupadas por cada chamada e portanto menos usuários poderão utilizar o mesmo canal simultaneamente, reduzindo a capacidade do sistema.

- Se o sistema impuser um limiar de SIR mínimo para chamadas em andamento, impõe-se uma área mínima para cada círculo. Assim, sistemas

utilizando limiares menores tendem a possuir melhor capacidades de canal, melhorando portanto a capacidade final do sistema.

- A alocação de uma chamada em um canal pode ser representada como a inclusão de um círculo no conjunto de círculos de chamadas em andamento neste canal. Ao impor um limiar de SIR de Aceitação, impõe-se uma área mínima que deve ser utilizada por este círculo. Para a chamada ser aceita, o círculo correspondente deve se "encaixar" na área de serviço. Dessa forma, quanto maior o SIR de Aceitação maior será a área mínima que o círculo deverá possuir e portanto maior a chance de bloqueio desta chamada em um dado canal.

A formulação também ilustra a dependência do comportamento de algoritmos DCA-AI com outros parâmetros:

- Quanto maior o coeficiente de propagação " α ", menor será a área dos círculos de reuso circundando chamadas ativas e portanto maior será a capacidade do canal.

- Quanto menor for o raio "R" das células, menor será a Área ocupada pelos círculos circundando chamadas ativas e portanto maior será a capacidade do canal. Note que esta relação sugere o potencial de sistemas microcelulares.

Whitehead [56] utilizou uma formulação muito semelhante à apresentada e, utilizando um coeficiente de propagação " α " igual a 4, sugeriu a seguinte regra: a capacidade de um canal em algoritmos DCA-AI dobra à cada 6dB a menos no SIR médio das chamadas.

Zander [39] utilizou a formulação acima para deduzir um limite superior para a capacidade de algoritmos DCA-AI sem controle de potência.

3.2.4.2. Análise de Ganho de Capacidade devido à Flexibilização do Reuso de Canais - com Controle de Potência

A análise de algoritmos DCA-AI com controle de potência pode seguir linha similar à utilizada para o caso sem controle de potência. Isto é, será relacionada a área ocupada por cada chamada ativa em um determinado canal com o SIR de cada chamada.

O Controle de Potência a ser analisado é o que procura manter o sinal recebido sempre constante. Isto é, o Controle de Potência irá compensar a

atenuação entre a ERB e o TM, incluindo a parcela de desvanecimento lognormal. Supõe-se que o nível de potência constante recebido seja alto o suficiente para manter o sistema limitado à interferência, não sendo necessário considerar a parcela de ruído térmico.

Considerando que, no limiar da região de cobertura de uma célula, a ERB e o TM estarão operando à potência máxima, pode-se definir o nível constante de recepção (considerando a situação ideal sem desvanecimento lognormal):

$$Pr = Pt_{\max} \cdot R^{-\alpha} \quad (3.25)$$

Note que (3.25) define a potência de recepção constante como sendo igual ao nível de potência de recepção que ocorre em algoritmos sem controle de potência quando o usuário está operando na fronteira da célula (distância "R"). Isto significa que no caso sem controle de potência, os níveis de recepção são sempre mais altos que os encontrados no caso com controle de potência.

Seguindo este critério, o controle de potência afeta as potências transmitidas de TMs e ERBs da seguinte forma:

$$Pt_{TMi} \cdot d_{i,i}^{-\alpha} = Pr_{cte} \Rightarrow Pt_{TMi} = Pt_{\max} \cdot R^{-\alpha} \cdot \beta_i^{\alpha} \cdot R^{\alpha} = Pt_{\max} \cdot \beta_i^{\alpha} \quad (3.26)$$

Utilizando as relações (3.25) e (3.26) na relação (3.17), sem considerar o desvanecimento lognormal, chega-se à relação (3.27) para o SIR de uma chamada no caso com controle de potência:

$$SIR_{TMi-ERBi} = \frac{Pt_{\max} \cdot \beta_i^{\alpha} \cdot \beta_i^{-\alpha} \cdot R^{-\alpha}}{\sum_{j \neq i} Pt_{\max} \cdot \beta_j^{\alpha} \cdot d_{j,i}^{-\alpha}} \quad (3.27)$$

...que se reduz a...

$$SIR_{TMi-ERBi} = \frac{1}{R^{\alpha} \cdot \sum_{j \neq i} \left(\frac{\beta_j^{\alpha}}{d_{ji}^{\alpha}} \right)} \quad (3.28)$$

Considerando novamente que no estado estacionário os usuários interferentes estarão a uma distância "D" aproximadamente igual, a relação acima se reduz a:

$$SIR_{TMi-ERBi} = \frac{D^{\alpha}}{R^{\alpha} \cdot \sum_{j \neq i} \beta_j^{\alpha}} \quad (3.29)$$

Desenvolvendo a relação (3.29), chega-se à (3.30), análoga à relação (3.24) para o caso com controle de potência.

$$\text{Area} = k \cdot R^2 \cdot 2^{\left(\frac{\text{SIR}_{\text{TMI-ERBi}} (\text{dB}) + 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{j \neq i} (\beta_j^\alpha) \right)}{1,5 \cdot \alpha} \right)} \quad (3.30)$$

Utilizando o mesmo raciocínio que no caso sem controle de potência, a capacidade de um canal depende inversamente das áreas ocupadas pelas chamadas.

A similaridade entre as formulações (3.24) e (3.30) sugere que as conclusões sobre o impacto do SIR das chamadas, do coeficiente de propagação e do raio das células obtidas para o caso sem controle de potência também se aplicam para o caso com controle de potência. Isto é:

- quanto maior o SIR médio das chamadas, menor a capacidade do canal.
- sistemas utilizando menores limiares de SIR mínimo ("SIR_Min") tendem a possuir melhor capacidade de canal.
- quanto maior o limiar de SIR de Aceitação, maior a chance de bloqueio desta chamada em um dado canal.
- quanto maior o coeficiente de propagação " α ", maior será a capacidade do canal.
- quanto menor for o raio "R" das células, maior será a capacidade do canal.

No caso de algoritmos DCA-AI que fornecem procuram formar diversos padrões de reuso (algoritmo RUP), supondo o caso ideal onde todos os usuários utilizando o mesmo canal estariam à mesma distância da ERB; isto é, as parcelas " β " seriam iguais e a relação (3.30) se reduz à relação (3.24); portanto o desempenho do algoritmo RUP ideal com controle de potência é igual ao seu desempenho sem controle de potência [19].

3.2.4.3. Intervalo de Variação do Ganho Composto de Capacidade de Algoritmos DCA-AI

Conforme mencionado anteriormente, o ganho de capacidade de algoritmos DCA-AI se compõe da parcela referente à maior troncalização de canais e da parcela referente à melhor flexibilização do reuso de canais entre as células. Os itens 3.2.4.1 e 3.2.4.2 analisaram somente a parcela referente à flexibilização do

reuso de canais, não correspondendo ao desempenho final de capacidade que algoritmos DCA-AI possam possuir sobre algoritmos FCA.

Whitehead [56] propôs uma forma estimada de combinar as duas parcelas, se baseando na formulação de ganho de troncalização já apresentada no item 3.1.4.

Whitehead sugeriu que a flexibilização do reuso de canais pode ser vista como uma redução no número "N" de células do "cluster" (vide item 3.1.4), formando algo como um "N" efetivo ("Ne"). Considere que "N" possa ser definido pela relação entre o total de células no sistema e o total de células reutilizando o mesmo canal. Dessa forma, a flexibilização do reuso de canais permite um número maior de células reutilizando o mesmo canal, conseguindo um "Ne" efetivo menor.

Whitehead sugere que o "Ne" efetivo pode ser estimado por [56]:

$$Ne = \frac{N}{\min\left(N, 2^{\frac{\Delta FCA - \Delta DCA}{1.5\alpha}}\right)} \quad (3.31)$$

$$\Delta FCA = \overline{SIRFCA} - SIRFCA_{0,1} \quad (3.32)$$

$$\Delta DCA = \overline{SIRDCA} - SIRDCA_{0,1} \quad (3.33)$$

...onde:

- \overline{SIRFCA} : média da relação SIR nas chamadas no algoritmo FCA;
- \overline{SIRDCA} : média da relação SIR nas chamadas no algoritmo DCA-AI;
- $SIRFCA_{0,1}$: nível de SIR superior obtido por pelo menos 90% das chamadas obteve no algoritmo FCA.
- $SIRDCA_{0,1}$: nível de SIR superior obtido por pelo menos 90% das chamadas no algoritmo DCA.

O denominador da expressão (3.31) pode ser intuitivamente entendido ao lembrar que o número de células reutilizando um mesmo canal é inversamente proporcional à área ocupada pelos círculos de reuso das suas chamadas, que se relaciona com o SIR das chamadas através da relação (3.24) e (3.30). Ao dividir a área média ocupada pelos círculos de reuso dos algoritmos DCA-AI pela área média ocupada pelos círculos de reuso do algoritmo FCA, consegue-se uma estimativa para a relação entre o número de células reutilizando um mesmo canal nos 2 sistemas, chegando-se à relação (3.31). As relações (3.32) e (3.33) tentam

aproximar o valor da área média, dado que existe uma variação no SIR das chamadas em cada um dos algoritmos.

Utilizando este raciocínio, a relação (3.7) se transforma em:

$$\frac{\text{Erl_B}(\delta \cdot \text{CA}, \text{GOS})}{\text{Ne} \cdot \text{Erl_B}(\text{CA}/\text{N}, \text{GOS})} \leq \frac{\text{Cm}_{\text{DCA_AI}}}{\text{Cm}_{\text{FCA}}} \leq \frac{\text{Erl_B}(\text{CA}, \text{GOS})}{\text{Ne} \cdot \text{Erl_B}(\text{CA}/\text{N}, \text{GOS})} \quad (3.34)$$

Note que o número "Ne" somente é substituído na estimativa de capacidade dos algoritmos DCA_AI, permanecendo inalterada na capacidade dos algoritmos FCA.

A relação (3.34) pode ser utilizada para fornecer ordens de grandeza para os limites superiores e inferiores dos algoritmos DCA-AI.

3.2.5. Algoritmos Propostos na Literatura

Diversos trabalhos na literatura propuseram algoritmos DCA-AI e analisaram seu desempenho [5,9-14,16-20,22-29,32,34,35,37,39-42,56-68]. A maioria dos trabalhos tratou da análise do ganho de capacidade que algoritmos DCA-AI podem fornecer a sistemas celulares.

Entretanto, conforme bem observado por outros trabalhos [5,11,12,56], o critério de avaliação dos algoritmos não pode se limitar ao ganho de capacidade. Dado que algoritmos DCA-AI possuem uma certa instabilidade inerente ao processo de "intracell handoff", aspectos de instabilidade devem ser considerados no critério de avaliação [12]. Além disso, dado que os algoritmos DCA-AI não mais se utilizam das margens de projeto, as características de qualidade da chamada (relação SIR) também devem ser levadas em consideração no critério de avaliação.

Os diferentes critérios de avaliação utilizados nos trabalhos e as diferentes condições de simulação dificultam a comparação entre algoritmos [12,21,56] pois, conforme visto nos itens 3.1.4 e 3.2.4, a variação dos parâmetros pode acarretar em alta variação nos resultados finais. Conforme será visto neste item, os resultados de desempenho variam bastante de um trabalho para outro.

A maioria dos resultados se referem à condição de distribuição de tráfego uniforme, a menos que mencionado ao contrário.

3.2.5.1. Algoritmos DCA-AI Centralizados

Alguns trabalhos analisaram o desempenho de algoritmos DCA-AI centralizados, onde uma entidade central possuía o conhecimento da situação de todas as chamadas em curso e dos canais disponíveis do sistema.

Algoritmos DCA-AI centralizados devem possuir desempenho melhor que os algoritmos descentralizados pois os mesmos tem melhor condição de promover alocações ótimas. Ao conhecer a situação de cada canal disponível, um algoritmo centralizado pode alocar os canais de forma a sempre mantê-los os mais compactos possível, aumentando a capacidade do sistema. Note que o algoritmo centralizado pode facilmente criar a partição de reuso ("reuse partitioning"), criando diferentes padrões compactos de reuso. Além disso, algoritmos centralizados podem, em teoria, se utilizar do artifício de rearranjar chamadas em andamento para conseguir construir os padrões de reuso compactos.

Nettleton [40,61] simulou diferentes algoritmos DCA-AI centralizados. Seu trabalho reporta resultados de ganhos de capacidade variando de 150% a 300% sobre o algoritmo FCA. Nettleton levantou os resultados de qualidade média em cada algoritmo e comprovou o compromisso entre qualidade e capacidade, mostrando que os algoritmos DCA-AI tinham menor qualidade média do que a obtida pelo FCA em até 8dB.

A alta capacidade obtida por Nettleton pode ser justificada pelo fato de seu algoritmo permitir total rearranjo de chamadas à cada nova chamada no sistema. Além disso, o algoritmo sempre escolhia a configuração que maximizava o tráfego cursado pelo algoritmo, interrompendo, se preciso, chamadas em andamento. Adicionalmente, a simulação foi executada em um sistema de 19 células; maiores estudos devem ser feitos com maior número de células, pois o número de interferentes pode ser muito baixo em situações com poucas células.

3.2.5.2. Algoritmos DCA-AI Descentralizados

A maioria das propostas de algoritmos DCA-AI se concentrou em algoritmos descentralizados, dado que os mesmos evitam o problema de alto tráfego na rede de comunicação entre ERBs e não precisam de um poderoso processador central.

Os algoritmos propostos na literatura foram divididos conforme a classificação citada no item 3.2.3.1.

3.2.5.2.1. Seleção Baseada na Melhor Qualidade

Diversos trabalhos propuseram e analisaram algoritmos DCA-AI que procuram alocar o canal que forneça a melhor relação SIR [9, 17, 18, 20, 26, 27, 29, 34, 41, 56, 58, 60, 63, 65, 66].

Dentre os algoritmos que não se utilizaram de controle de potência, Goodman [20] encontrou resultados variando de 52% a 75% em sistema unidimensional de 20 e 10 canais respectivamente, confirmando a perda de troncalização com o aumento de canais.

Cheng [27] comparou um algoritmo DCA-AI que fornece maior prioridade à canais com menor interferência (o que forneceria a maior qualidade) com diversas variações de algoritmos DCA-AI de Melhor Qualidade e Melhor Preço. Apesar de Cheng [27] não considerar eventuais "intracell handoffs" nas chamadas em movimento, ao considerar a probabilidade de queda no critério de avaliação, Cheng concluiu que o algoritmo que procura alocar canal com menor interferência recebida é o que possui melhor desempenho conjunto.

Valenzuela [9] estudou um algoritmo da classe de Melhor Qualidade em sistema linear (unidimensional), com 2 células no "cluster" e coeficiente de propagação de 2. Com sistema operando com 10 canais, a 1% de probabilidade de bloqueio, Valenzuela encontrou um ganho de 46% sobre o FCA na situação sem controle de potência.

Muitos trabalhos consideraram a aplicação conjunta de controle de potência. Cada trabalho considerou um esquema de controle de potência e uma condição de simulação específica, dificultando ainda mais a comparação entre algoritmos.

Valenzuela também considerou a aplicação de controle de potência nos seus estudos. O modelo de controle de potência utilizado ajustava a potência de transmissão para manter o nível de recepção constante. Sob as mesmas condições anteriormente citadas, o ganho de capacidade sobre FCA foi de 115%, confirmando que algoritmos DCA-AI conseguem extrair maior capacidade da menor interferência co-canal causada pelo controle de potência [9]. O trabalho de Valenzuela apresenta

outro ponto de adicional interesse que são algumas discussões sobre o problema de variação do grau-de-serviço na área de cobertura do sistema.

Whitehead [56] estudou o comportamento do algoritmo de Melhor Qualidade em sistema com 36 células e 36 canais, com coeficiente de propagação de 4 e controle de potência para compensar variações na atenuação entre TM e ERB. Com o sistema FCA operando com 3 células no “cluster” ($N=3$), simulações resultaram em 45% de ganho sobre o FCA.

Serizawa [17,18] estudou o efeito do controle de potência em algoritmos de Melhor Qualidade. Considerando o controle de potência que procura manter nível de potência de recepção constante, Serizawa analisou os aspectos de interferência e queda de chamadas em andamento, concluindo que a aplicação do controle de potência em somente 1 direção (no sentido TM-ERB) pode trazer benefícios.

Argyropoulos [34,63] considerou situações de tráfego variável no tempo, simulando sistema com 64 células e 252 canais. Argyropoulos reconheceu o problema do tempo de alocação de canal, propondo um algoritmo que limitava a procura dentre os 3 melhores canais monitorados pela ERB. Utilizando um controle de potência discreto, e com ajuste contínuo baseado no SIR atual da chamada, o algoritmo DCA-AI proposto encontrava praticamente 0% de probabilidade de bloqueio enquanto o algoritmo FCA era sujeito a 14% de probabilidade de bloqueio. O trabalho de Argyropoulos fornece ainda resultados com respeito à instabilidade de algoritmos que utilizam controle de potência contínuo baseado no SIR das chamadas [34].

Ishii [58] também considerou controle de potência contínuo baseado no SIR das chamadas, fornecendo comparações de desempenho entre diferentes variantes de algoritmos de Melhor Qualidade. Ishii fornece resultados sobre capacidade, estabilidade e qualidade de chamadas.

3.2.5.2.2. Seleção Randômica

Muitos trabalhos consideraram o algoritmo DCA-AI randômico como base de comparação com um dado algoritmo sendo proposto [5,10,24,57]. Entretanto, a definição exata ou detalhes do funcionamento do algoritmo randômico não eram fornecidos, dado que a ênfase era na descrição do algoritmo sendo proposto.

Whitehead [56] utilizou definição do algoritmo randômico similar à utilizada neste trabalho. Utilizando o mesmo cenário descrito em 3.2.5.2.1, com controle de potência, o algoritmo randômico alcançou um ganho de capacidade de 61% sobre o FCA, melhor inclusive que o algoritmo de Melhor Qualidade.

Em uma outra análise, Beck [11] também propôs um algoritmo DCA-AI que se encaixa na categoria de algoritmos randômicos conforme definido neste trabalho. Beck analisou como algoritmos DCA-AI randômicos respondem à variação dos parâmetros, analisando em detalhes aspectos de instabilidade. Em um cenário de 49 células, 119 canais, com mobilidade de usuários, sem considerar controle de potência, o algoritmo randômico resultou em ganho de capacidade de 23% sobre um algoritmo FCA com 7 células no “cluster” . Este resultado foi obtido para a situação onde o DCA-AI randômico estava com parâmetros ajustados para oferecer baixa probabilidade de interferência, similar à do algoritmo FCA. Beck forneceu também resultados do ganho de capacidade do algoritmo DCA-AI randômico caso tal ajuste não fosse feito; isto é, se somente a probabilidade de bloqueio fosse tomada como critério de análise. O ganho de capacidade neste caso seria superior a 130%. O trabalho também analisou o impacto da variação do número de canais no sistema, confirmando que o aumento de canais reduz o ganho de capacidade dos algoritmos DCA-AI sobre o algoritmo FCA. Com 196 canais, o algoritmo DCA-AI randômico conseguiu somente 5% de ganho de capacidade sobre o FCA.

3.2.5.2.3. Seleção Baseada no Melhor Preço

Whitehead [56] também simulou o algoritmo DCA-AI de melhor preço sob o mesmo cenário, com controle de potência, que os algoritmos randômico e de Melhor Qualidade, encontrando 70% de capacidade adicional quando comparado com o FCA.

Cheng [27] também estudou o comportamento do algoritmo de Melhor Preço, comparando-o inclusive com o algoritmo de Melhor Qualidade e concluindo que este último possui melhor desempenho. Apesar de sua análise não considerar "intracell handoffs", Cheng considerou a probabilidade de interferência como parte do grau-de-serviço. Esta é a razão por Cheng encontrar melhor desempenho no algoritmo de Melhor Qualidade.

3.2.5.2.4. Seleção com Prioridade Baseada em Alocações Passadas

Diversos trabalhos analisaram ou utilizaram o algoritmo "Channel Segregation" como referência de análise de seus algoritmos [5,10,21,23,52,62,66,67].

Akaiwa [10] analisou em detalhes a capacidade do algoritmo "Channel Segregation" sem controle de potência em comparação com o algoritmo FCA. Em um cenário linear (unidimensional), com somente 6 células e 12 canais, seu algoritmo "Channel Segregation" alcançou 100% de capacidade sobre o algoritmo FCA com 3 células no "cluster". Já no cenário bidimensional de 81 células e 72 canais, o ganho de capacidade reduziu para 62% sobre o algoritmo FCA com 9 células no conjunto interferente. Akaiwa também analisou o impacto da redução no número de transceptores em cada ERB. Note que os algoritmos DCA-AI são geralmente analisados sem bloqueio por falta de transceptores. Akaiwa reduziu gradativamente o número de transceptores equipados em cada ERB, concluindo que, no sistema de 72 canais, o mesmo ganho de capacidade pode ser conseguido com somente 18 transceptores em cada ERB. Note que o algoritmo FCA utilizou, neste caso, somente 8 transceptores.

Apesar do merecido mérito em propor o algoritmo "Channel Segregation", Akaiwa [10] não mencionou aspectos de interferência, queda e qualidade de chamadas, aspectos fundamentais para uma perfeita análise dos algoritmos.

Hamabe [5] comparou o desempenho do algoritmo "Channel Segregation" com o desempenho do algoritmo Randômico. Hamabe não explicita o cenário de simulação, mas apresenta resultados que mostram que ambos os algoritmos alcançaram praticamente a mesma capacidade para a mesma probabilidade de bloqueio. Hamabe analisa a taxa de interferência de chamadas, mostrando que o algoritmo "Channel Segregation" fornece taxas de interferência bem inferiores à fornecida pelo algoritmo Randômico.

Ishikawa [62] também analisa o desempenho do algoritmo "Channel Segregation" sem controle de potência contra o algoritmo FCA e o algoritmo RUP (vide item 3.2.5.2.5) em sistema hexagonal de 61 células, 70 canais e utilizando um coeficiente de atenuação de 3,5. Ishikawa analisa em detalhes características de probabilidade de interferência e qualidade das chamadas. Com respeito ao algoritmo "Channel Segregation", resultados de simulação mostraram que o mesmo conseguiu

ganho de capacidade de 40% sobre o FCA com 7 células no “cluster” . Apesar da dificuldade em comparar resultados entre cenários de simulação diferentes, pode-se observar que este resultado não contradiz o resultado obtido por Akaiwa [10], já que este considerou 9 células no “cluster” , aumentando a capacidade do algoritmo DCA-AI relativa ao FCA, conforme visto em 3.1.4.3.2.

Os resultados de Ishikawa também consideraram o ajuste do nível de SIR para aceitação de chamadas ("SIR_Aceit.") no algoritmo DCA-AI para que o mesmo fornecesse a mesma probabilidade de queda de chamada por "intracell handoff". Nesta condição, o algoritmo "Channel Segregation" resultou em aproximadamente 1% de queda de chamadas, próximo ao encontrado pelo FCA.

Borst [66] também analisou o desempenho do algoritmo "Channel Segregation" sem controle de potência contra o algoritmo FCA de 7 células no “cluster” em sistema hexagonal de 98 células, 63 canais e utilizando um coeficiente de atenuação de 3,5; obtendo 56% de capacidade adicional sobre o algoritmo FCA.

Furukawa [23] analisou o desempenho do algoritmo "Channel Segregation" com controle de potência contra o algoritmo FCA com 12 células no “cluster” e contra o algoritmo RUP (vide item 3.2.5.2.5) em sistema hexagonal de 84 células, 84 canais e utilizando um coeficiente de atenuação de 3,5. Em suas simulações, Furukawa adicionou 2,5dB de margem no SIR de Aceitação de novas chamadas ("SIR_Aceit") no algoritmo "Channel Segregation" para que o mesmo oferecesse a mesma probabilidade de queda de chamadas que o algoritmo FCA (0,5%). Nestas condições, o algoritmo "Channel Segregation" simulado resultou em 145% de capacidade adicional ao FCA. O ganho de capacidade foi bem superior aos anteriormente citados devido ao controle de potência e ao maior número de células no “cluster” . O trabalho de Furukawa também é de interesse por analisar o número de canais que o algoritmo teve de monitorar antes de alocar o canal. Esta é uma medida importante para se avaliar o impacto de algoritmos DCA-AI no tempo de alocação de canais.

Zenkner [67] analisou o comportamento do algoritmo "Channel Segregation" com controle de potência contra o algoritmo FCA com 7 células no “cluster” em sistema hexagonal com 49 células e 147 canais no sistema. No caso sem controle de potência, o algoritmo "Channel Segregation" mostrou desempenho pior que o algoritmo FCA; enquanto este resultava em 5% de probabilidade de bloqueio, o algoritmo "Channel Segregation" resultou em 15% para o mesmo tráfego. Ao aplicar

um controle de potência que busca balancear as relações SIR no sistema, o algoritmo "Channel Segregation" apresentou somente 36% de capacidade adicional ao FCA. Os baixos resultados encontrados por Zenkner podem ser justificados pelo alto número de canais no sistema. Ao utilizar remapeamento de células para evitar o efeito de borda, pode-se também justificar resultados mais conservadores.

3.2.5.2.5. Seleção com Prioridade Baseada na Partição de Reuso ("Reuse Partitioning")

Os algoritmos que procuram construir a partição de reuso de canais ("Reuse Partitioning" ou RUP) foram estudados por diversos trabalhos na literatura [5,17,19,23,24,26, 27,39,41,56,58-60,64].

Serizawa [19] apresentou uma análise teórica completa do desempenho de algoritmos RUP. Serizawa analisou teoricamente tanto o caso com controle de potência como o caso sem controle de potência. Considerando o controle de potência que mantém o nível de sinal constante, Serizawa provou que o desempenho era o mesmo que no caso sem controle de potência. Além disso, o trabalho analisa os impactos de alocações imperfeitas no desempenho de algoritmos RUP chegando à conclusão de que, quando se estabelece a partição de reuso perfeita, existe um limite para a degradação do SIR em chamadas existentes causada pela alocação de novas chamadas. Dessa forma, pode-se adicionar margens para reduzir as probabilidades de interferência.

A análise de Serizawa considera alocações perfeitas. Isto somente seria possível através de algoritmos centralizados.

Kanai [24] foi um dos primeiros trabalhos a propor um algoritmo RUP descentralizado. Kanai propôs o algoritmo ARP ("Autonomous Reuse Partitioning" - Partição de Reuso Autônoma"), sem controle de potência, que consiste no seguinte algoritmo que indiretamente resulta na partição de reuso procurada:

- 1-todas as ERBs possuem a mesma lista de canais, ordenada da mesma forma.
- 2-quando um TM requisita um canal para uma ERB, a disponibilidade dos canais é vasculhada segundo a ordem preestabelecida.

3-o primeiro canal a satisfazer o critério de disponibilidade é adotado para a chamada. Se nenhum canal atender o critério de disponibilidade, a chamada é bloqueada.

Devido à sua funcionalidade, o algoritmo ARP também foi referenciado na literatura como o algoritmo "Primeiro Canal Disponível" (FA - "First Available" ou "LOWEST") [56].

Em um sistema de 64 células e 70 canais, o algoritmo ARP foi comparado com o algoritmo FCA de 7 células no "cluster". ARP alcançou 105% de ganho de capacidade sobre o FCA para 3% de probabilidade de bloqueio. Kanai estudou o comportamento da probabilidade de interferência, resultando em 2,9% para a condição simulada; entretanto Kanai não explicitou o desempenho do algoritmo ARP com respeito à probabilidade de queda de chamadas. Provavelmente a probabilidade de bloqueio apresentada também considera o bloqueio de chamadas em "intracell handoff".

O trabalho de Kanai foi muito referenciado na literatura [5,17,23,56,62,64] e diferentes trabalhos analisaram este algoritmo em outras condições [23,56].

Whitehead [56] simulou o algoritmo ARP (referenciado como "LOWEST") no mesmo cenário já citado no item 3.2.5.2.1 e comparou-o com algoritmos de Melhor Qualidade, Melhor Preço e Randômico. O algoritmo ARP foi o que mostrou o melhor desempenho dentre todos eles, resultando em 79% de capacidade sobre o algoritmo FCA. Apesar da dificuldade em comparar algoritmos simulados em diferentes ambientes, pode-se dizer que este resultado não está em desacordo com o resultado de Kanai pois Whitehead considerou menos células no "cluster", o que, conforme já explicado, piora o desempenho relativo.

Enquanto o algoritmo ARP atinge a condição de Partição de Reuso indiretamente através da procura seqüencial de canais, Furukawa [23] sugeriu o algoritmo SORP ("Self Organizing Reuse Partitioning" - Partição de Reuso com Auto-organização) que forma a Partição de Reuso de forma mais direta. Furukawa sugere que cada ERB deve possuir uma tabela que relaciona cada canal com um nível de potência recebida no sentido TM-ERB. A fim de alcançar a condição de partição de reuso, o mesmo canal deve ser alocado em todas as células para TMs localizados aproximadamente à mesma distância da ERB. Isto significa que, em um sistema de distribuição uniforme de células, a tabela deve ser a mesma entre células. A fim de evitar qualquer forma de pré-planejamento celular, com o algoritmo SORP, cada

ERB construiria sua tabela de forma autônoma através de um processo de atualização contínua do conteúdo da tabela baseado em medições de potência recebida em cada canal (vide [23] para maiores detalhes). Durante o funcionamento do sistema, a decisão por qual canal a alocar é simples: a partir do nível de potência recebida no sentido TM-ERB, a ERB decide qual canal a alocar através de simples consulta à sua tabela. Caso o SIR inferido no canal esteja acima do mínimo requerido, tanto no sentido TM-ERB como no sentido ERB-TM, o canal é alocado, caso contrário, tenta-se alocar o próximo canal.

Furukawa [23] simulou o algoritmo SORP e comparou-o com os algoritmos ARP, "Channel Segregation" e FCA. Nas mesmas condições que citadas no 3.2.5.2.4, e considerando a condição com controle de potência, o algoritmo SORP obteve 250% de capacidade adicional ao FCA e 10% a mais que o algoritmo ARP; esses resultados referem-se à condição de 3% de probabilidade de bloqueio e 0,5% de probabilidade de queda por falha em "intracell handoff". O alto ganho de capacidade sobre o FCA pode ser justificado pelo controle de potência e pelo maior número de células no "cluster" do algoritmo FCA. Note que o ganho reportado ainda se encontra dentro do limite de capacidade teórico sugerido por Whitehead na relação (3.34). A partir de medidas de distribuição de SIR obtidas por Furukawa, obtém-se ΔFCA de 10dB e $\Delta SORP$ de 4dB (vide item 3.2.4.3 para definições). Resolvendo (3.34) utilizando-se os parâmetros utilizados por Furukawa (84 canais, 12 células no "cluster", coeficiente de atenuação de 3,5 e 3% de probabilidade de bloqueio), chega-se a um limite máximo para a relação de capacidade de 4,25; ou seja 325% de capacidade adicional ao FCA.

Ishikawa [62] propôs o algoritmo MOP-ACA ("Multiple Overlay Priority - Adaptive Channel Allocation" ou Alocação Adaptativa de Canais com Prioridade Múltipla), um algoritmo DCA-AI que combina traços de algoritmos RUP com algoritmos que se baseiam no sucesso de alocações passadas. O funcionamento do algoritmo MOP-ACA funciona da seguinte forma [62]:

- 1-todos os canais são divididos em diversos grupos de canais;
- 2-cada grupo de canais é associado a uma determinada distância TM-ERB;
- 3-cada ERB possui uma tabela de prioridades para cada grupo de canais;
- 4-quando um TM requisita um canal para uma ERB, a ERB decide qual grupo de canais a utilizar baseado na distância que a separa do TM.

5-uma vez selecionado o grupo, a alocação do canal do grupo segue o mesmo princípio que o algoritmo "Channel Segregation".

Ishikawa comparou a performance do algoritmo MOP-ACA com o algoritmo "Channel Segregation" (vide item 3.2.5.2.4) e o algoritmo FCA. Utilizando o mesmo cenário descrito em 3.2.5.2.4, na condição sem controle de potência, o algoritmo MOP-ACA alcançou 71% de ganho de capacidade sobre o algoritmo FCA a 3% de probabilidade de bloqueio. Nesta condição, o algoritmo MOP-ACA resultava também em menos que 1% de probabilidade de queda de chamadas por "intracell handoff". Note que o ganho de capacidade do MOP-ACA foi inferior ao alcançado pelo algoritmo ARP simulado por Kanai (105%), apesar de ambos estarem utilizando condições semelhantes de simulação.

Takenaka [64] sugeriu o algoritmo ACCA ("All-Channel Concentric Allocation" - Alocação Concêntrica de Canais) para construir a partição de reuso automaticamente. O funcionamento do algoritmo ACCA é bem semelhante ao algoritmo SORP proposto por Furukawa [23], entretanto, o mesmo possui tabelas de canais por potência recebida, previamente calculadas. Em um sistema de 144 células, 70 canais e coeficiente de atenuação de 3,5, Takenaka simulou o algoritmo ACCA comparando-o com o algoritmo FCA com 7 células no "cluster". No caso sem controle de potência, o algoritmo ACCA alcançou 150% de capacidade adicional ao FCA a 3% de probabilidade de bloqueio. Este resultado considerou uma probabilidade de queda de chamadas inferior a 0,5%. No caso com controle de potência baseado no SIR da chamada, suas simulações alcançaram ganho de 240% de capacidade sobre o FCA a 3% de probabilidade de bloqueio. Takenaka não analisou a qualidade das chamadas, não sendo possível verificar se o ganho obtido se encontra dentro do teoricamente previsível.

3.2.5.3. Discussão dos Resultados Encontrados na Literatura

Conforme pode-se notar neste item, os diversos trabalhos se concentraram na análise da capacidade adicional que algoritmos DCA-AI podem fornecer sobre o algoritmo-referência FCA. Apesar de muitos deles reconhecerem a importância e necessidade da análise dos aspectos de qualidade e estabilidade do sistema, estes aspectos foram deixados em segundo plano.

Pode-se notar que diferentes ambientes de simulação e diferentes tipos de controle de potência utilizados dificultam a comparação entre algoritmos. Poucos trabalhos consideraram a simulação de vários tipos de algoritmos sobre o mesmo cenário e condições. Whitehead [56] simulou 4 tipos de algoritmos, entretanto, somente para a condição com controle de potência.

Apesar de muitos trabalhos analisarem o funcionamento de algoritmos DCA-AI com controle de potência, poucos analisaram o efeito isolado do controle de potência no desempenho do algoritmo [9,17,24,64,67]. Além disso, os diferentes tipos de controle de potência utilizados dificultam a análise deste efeito.

A maioria dos trabalhos considerou modelo hexagonal de células. Conforme [5,9,12], este modelo não é adequado para sistemas microcelulares, devendo-se utilizar outros modelos. O mesmo pode-se dizer do modelo de propagação; a maioria dos algoritmos consideraram modelos simples de atenuação, com coeficientes de atenuação entre 3,5 e 4; análises adicionais de desempenho devem ser feitas com modelos mais condizentes com o ambiente microcelular.

Os sistemas celulares modelados consistiam somente de células omnidirecionais, poucos trabalhos analisaram o uso de setores em células [13,28,29]. Além disso, a grande maioria dos trabalhos não consideram o bloqueio por falta de transceptores, considerando que as ERBs estariam equipadas com número de transceptores igual ao número de canais no sistema. Obviamente o custo dos transceptores adicionais é proibitivo. Alguns trabalhos analisaram o impacto da redução no número de transceptores [10,13,18,22,61]; entretanto, tal análise foi realizada somente nas condições e algoritmos destes trabalhos, devendo a mesma ser estendida para outros algoritmos e condições.

A maioria dos trabalhos considerou um número de canais relativamente pequeno, análises com maior número de canais [8,34,63] devem ser realizadas.

Além disso, a maioria dos resultados não considerou a mobilidade de usuários. Os trabalhos que consideraram a mobilidade de usuários [11-13,29,34,59,61,63,66,67] não consideraram a mesma situação sem mobilidade, impossibilitando uma clara comparação e conclusão sobre o impacto da mobilidade no desempenho dos algoritmos DCA-AI. Note que este é um aspecto de suma importância para algoritmos DCA-AI; pois, dado que os mesmos se baseiam em medições de interferência para a alocação, o movimento de usuários pode causar grandes variações no nível de interferência recebido.

3.2.6. Benefícios de Algoritmos DCA-AI

Conforme visto no item 3.2.1 e comprovado por estudos já publicados, os algoritmos DCA-AI permitem a flexibilização do reuso de canais, permitindo os seguintes benefícios potenciais sobre algoritmos FCA:

- planejamento automático de freqüências;
- ajuste automático à reconfigurações do sistema;
- funcionamento distribuído;
- adaptabilidade às variações de tráfego;
- maior troncalização.

Entretanto, a fim de alcançar tais benefícios, as seguintes pendências devem ser resolvidas.

3.2.7. Dificuldades de Implementação

As seguintes dificuldades são previstas para a implementação de algoritmos DCA-AI:

- **definição do funcionamento do canal de controle:** note-se que até o momento não se mencionou como o canal de controle funcionaria [52]. Este é um aspecto do sistema que não tem sido muito estudado e permanece como uma questão a ser respondida. Em um recente trabalho, Hansen [42] sugere algoritmos DCA-AI híbridos, com canais fixos e canais dinâmicos, de forma similar à sugerida por Cox [44] nos algoritmos DCA-AT. Dessa forma, o canal de controle seria um dos canais fixos. Entretanto, se a alocação do canal de controle for feita de forma fixa, ainda seria necessário o planejamento de freqüências para este canal.

- **longo tempo para conexão:** muitos trabalhos consideraram que tanto a ERB como o TM seriam capazes de vasculhar a condição de interferência de cada canal no sistema. O grande número de freqüências existente no sistema pode causar um enorme tempo para se iniciar uma conexão [11,12]. Este problema é ainda mais crítico nas mudanças de canais de chamadas em andamento (“intracell handoffs”).

- **medidas de relação SIR/erros de medida:** a maioria dos trabalhos citados considerou a relação SIR como critério de disponibilidade. Entretanto, tal

medida não é fácil de se obter em canais analógicos pois a interferência se mistura com o sinal desejado. Mesmo em sistemas digitais, onde o SIR pode ser inferido pela taxa de erro no canal, erros nesta medida podem afetar o desempenho dos algoritmos DCA-AI.

- **mudança de frequência em transceptores:** a maioria dos trabalhos considerou que os transceptores seriam capazes de se ajustar em qualquer frequência do sistema [52]. Entretanto, combinadores de transmissão e recepção são compostos por cavidades, e estas devem ser ajustadas para uma determinada frequência. Mesmo que se utilizem combinadores auto-ajustáveis, o ajuste mecânico dos mesmos demanda um tempo considerável [10].

- **complexidade em TMs:** a maioria dos trabalhos considerou que o TM estaria participando do processo de alocação de chamada. Esta consideração exige uma complexidade adicional nos TMs, exigindo pelo menos durante os primeiros anos de implementação, um custo adicional nos mesmos.

4. Análise de Desempenho de Algoritmos DCA Adaptativos à Interferência em Sistemas FDMA/Analógicos

4.1. Foco de Pesquisa

Este item irá analisar o desempenho de algoritmos DCA em Sistemas FDMA / Analógicos.

Conforme pode-se verificar nos itens 3.1.5 e 3.2.5, uma série de trabalhos analisaram o desempenho de algoritmos DCA. Entretanto, os resultados foram obtidos sobre condições diversas, dificultando um entendimento e avaliação global a respeito dos algoritmos. Este trabalho analisará os diversos tipos de algoritmos DCA nas mesmas condições. Este trabalho se restringirá à análise dos algoritmos DCA Adaptativos a Interferência por estes possuírem maior potencial para implementação futura.

Procurou-se separar a contribuição do Método de Alocação de Canais da contribuição do Controle de Potência pois ambos representam fenômenos diferentes [12]. Adicionalmente, além de considerar o ganho de capacidade, procurou-se obter medidas adicionais de desempenho relativas à estabilidade e qualidade das chamadas, tais como probabilidade de queda de chamadas, número médio de "intracell handoffs" por chamada e qualidade das chamadas (média e no momento da Alocação).

O importante aspecto da mobilidade será analisado em separado, no mesmo cenário, permitindo uma comparação clara e detalhada do impacto deste aspecto no desempenho dos algoritmos DCA.

Por fim, o impacto no desempenho dos algoritmos DCA causado pela limitação de transceptores nas ERBs será analisado, sendo possível determinar o número mínimo de transceptores necessários em cada ERB.

No item 4.1.1 são apresentados em detalhes o funcionamento de cada um dos algoritmos considerados na análise. O item 4.1.2. define claramente o ambiente de simulação utilizado para a obtenção dos resultados e o item 4.1.3 define em detalhes as medidas de desempenho utilizadas na análise.

A análise de desempenho sem controle de potência é apresentada no item 4.2 e a aplicação do controle de potência no item 4.3.

O impacto da mobilidade, com e sem controle de potência, é analisado no item 4.4, e o impacto da limitação do número de transceptores nas ERBs é analisado por fim no item 4.5.

4.1.1. Algoritmos de Alocação de Canais Considerados

Dado que cada tipo de algoritmo DCA possui sua particularidade, procurou-se simular um algoritmo de cada um dos tipos apresentados no item 3.2.3.1 a fim de avaliar como o mesmo se comportava em relação aos outros algoritmos.

Os algoritmos de Alocação de Canais considerados foram:

- FCA (Alocação Fixa de Canais)
- DCA de Melhor Qualidade (QUAL);
- DCA de Melhor Preço (PREÇO);
- DCA Randômico (RANDOM);
- DCA de Segregação de Canais ("Channel Segregation" - CHANSG);
- DCA de Partição de Reuso ("Reuse Partitioning" - RUP);

Os fluxogramas a seguir definem claramente o funcionamento de cada algoritmo. O mesmo fluxograma serve tanto para o início de novas chamadas como para a realocação de chamadas em "intracell handoffs".

4.1.1.1. Algoritmo FCA (Alocação Fixa de Canais)

Mesmo na simulação do algoritmo FCA, consideraram-se os efeitos de propagação e desvanecimento. Portanto, eventuais interferências excessivas decorrentes da imperfeição inerente do planejamento de frequências foram simuladas, podendo ocorrer que o SIR de uma chamada em andamento caia abaixo de um limiar. Neste caso, mesmo no algoritmo FCA, ocorre o rearranjo de canais ("intracell handoffs").

A figura 4.1 ilustra o fluxograma do Algoritmo FCA considerado.

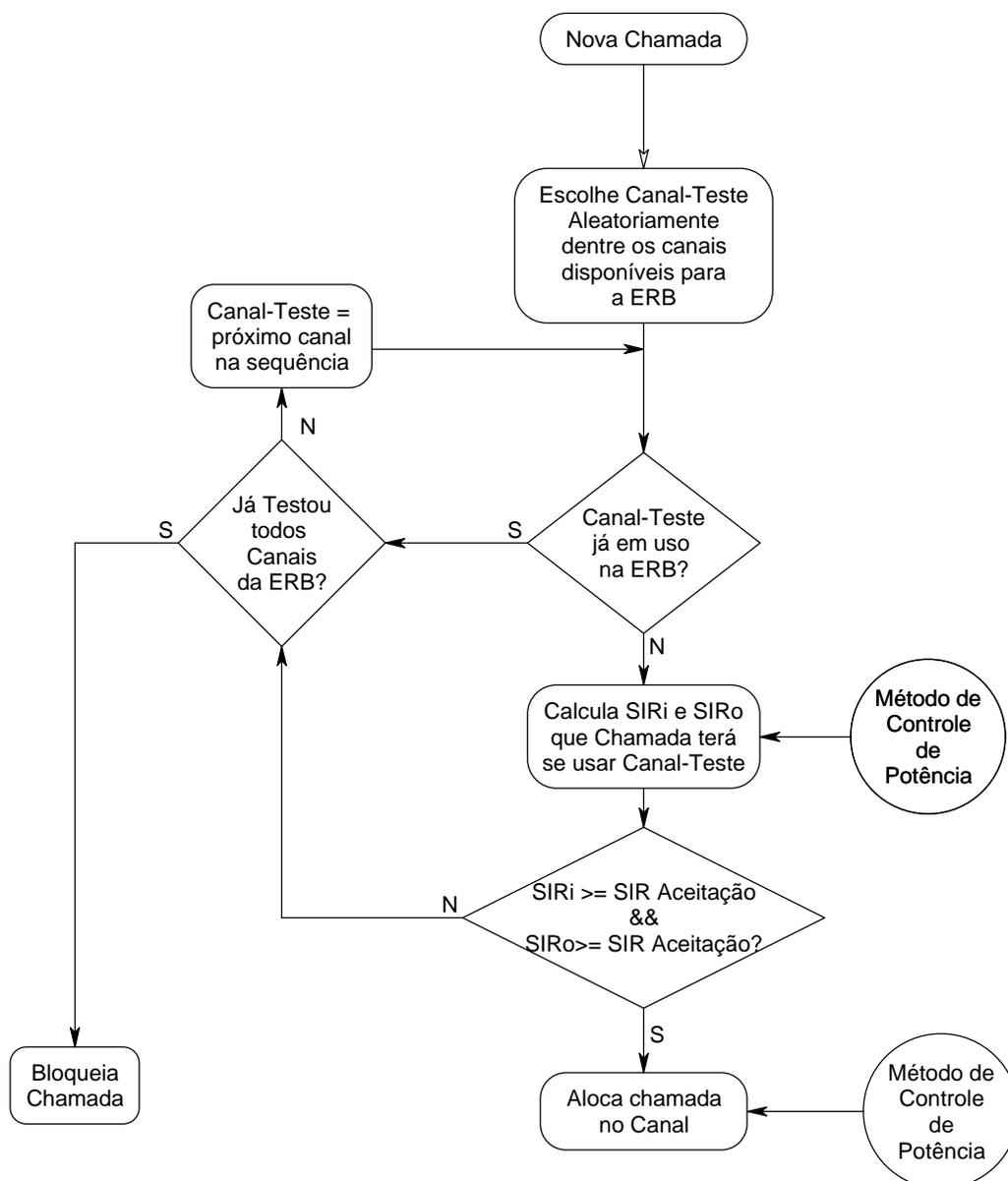


Fig. 4.1 - Fluxograma para Algoritmo FCA considerado.
(SIR_i: SIR no sentido TM-ERB; SIR_o: SIR no sentido ERB-TM)

A única diferença na simulação do algoritmo FCA para qualquer um dos algoritmos DCA foi que o FCA tinha plano de frequências já definido antes da simulação; isto é, o número de canais e os canais que cada ERB podia utilizar foram definidos previamente e de forma fixa.

Observe que o algoritmo FCA também verifica se o SIR da chamada está maior que o limiar mínimo ("SIR_Aceit.") antes de alocá-la. Assim, pode ocorrer bloqueio de chamadas mesmo com canais livres.

4.1.1.2. Algoritmo DCA de Melhor Qualidade (QUAL)

O algoritmo DCA de Melhor Qualidade prefere alocar canais com a melhor relação SIR dentre os canais disponíveis, desde que a relação SIR seja superior à mínima relação SIR necessária (SIR de Aceitação).

A figura 4.2 ilustra o fluxograma do Algoritmo DCA QUAL considerado.

Deve-se observar que a procura por canais com melhor qualidade não impede que o algoritmo QUAL aloque canais com SIR baixo.

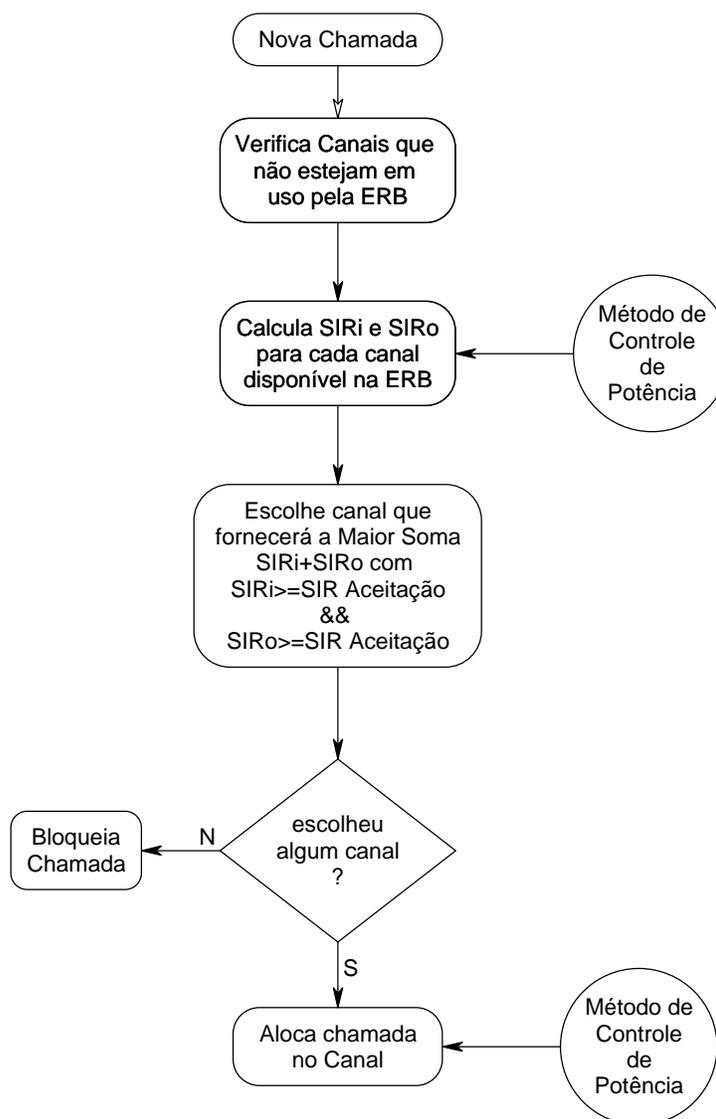


Fig. 4.2 - Fluxograma de Algoritmo DCA de Melhor Qualidade (QUAL) considerado.

4.1.1.3. Algoritmo DCA de Melhor Preço (PREÇO)

O algoritmo DCA que Procura Melhor Preço prefere alocar canais com a menor relação SIR dentre os canais disponíveis, desde que a relação SIR seja superior à mínima relação SIR necessária (SIR de Aceitação). Deve-se observar que a procura por canais com pior qualidade não impede que o algoritmo PREÇO aloque canais com SIR alto. A figura 4.3. ilustra o fluxograma do algoritmo considerado.

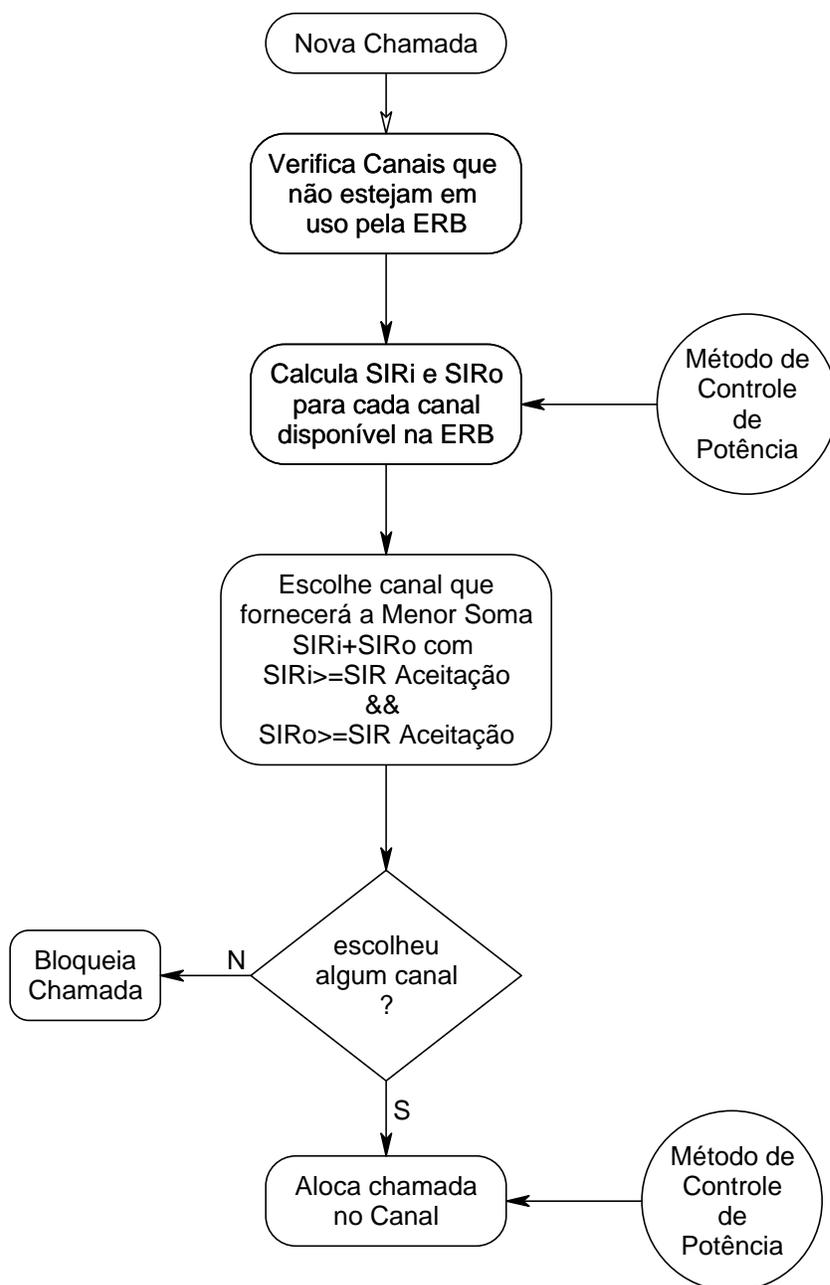


Fig. 4.3 - Fluxograma para Algoritmo DCA de Melhor Preço (PREÇO) considerado.

4.1.1.4. Algoritmo DCA Randômico

O algoritmo DCA Randômico irá alocar o primeiro canal disponível que tiver SIR superior ao SIR de Aceitação. A ordem de procura é aleatória.

A figura 4.4 ilustra o fluxograma do Algoritmo DCA considerado:

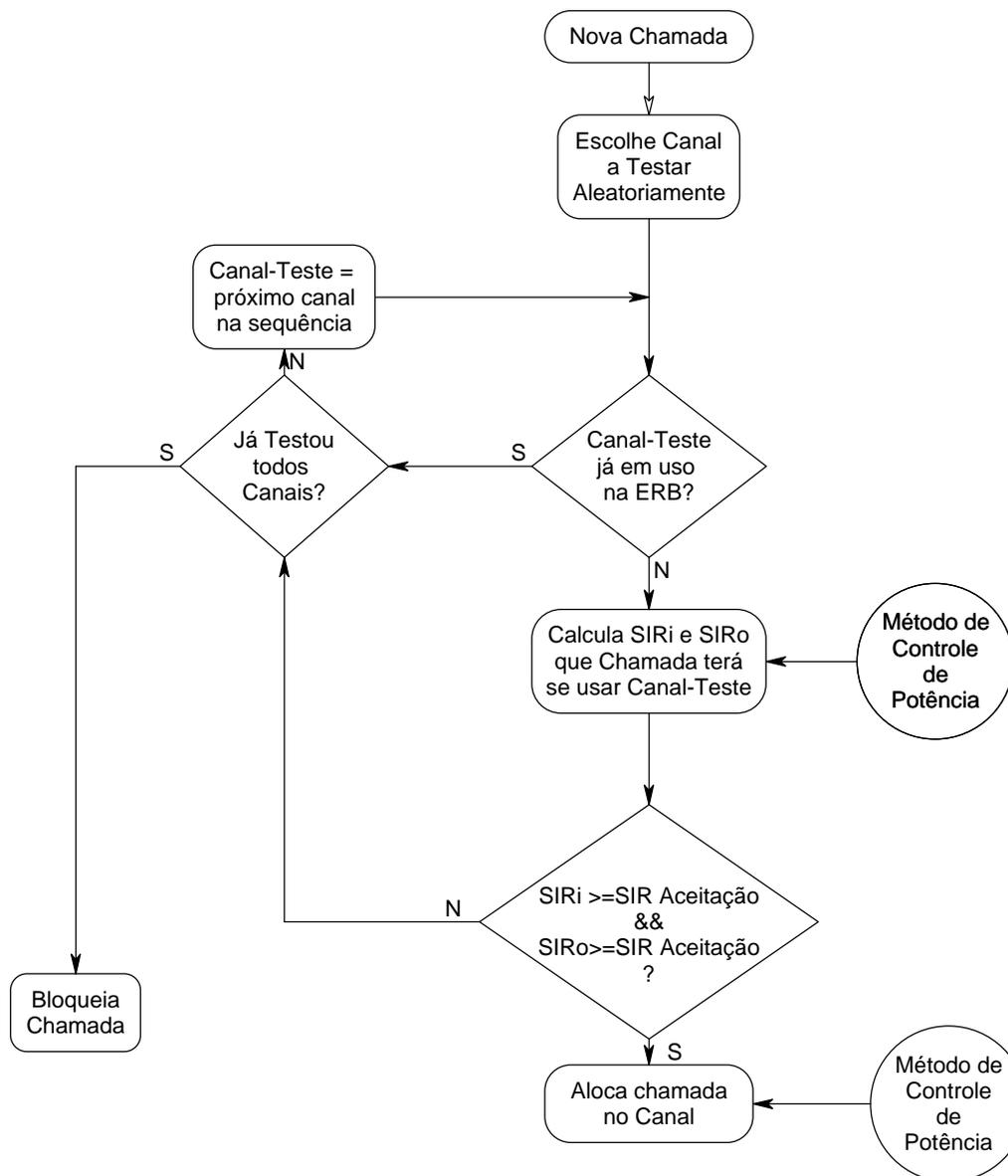


Fig. 4.4 - Fluxograma para Algoritmo DCA Randômico (RANDOM) considerado.

Note que o fluxograma para o algoritmo DCA-RANDOM é bem parecido com o algoritmo FCA. A única diferença entre ambos é que o algoritmo RANDOM pode alocar qualquer canal dentre todos os canais do sistema.

4.1.1.5. Algoritmo DCA de Segregação de Canais (“Channel Segregation” - CHANSG)

O algoritmo DCA com Prioridade para Alocações Passadas considerado neste trabalho será o algoritmo de Segregação de Canais (“Channel Segregation”). Este algoritmo irá preferir alocar canais que tenham sido alocados com sucesso na ERB no passado baseado na regra proposta por Akaiwa [5,10,21]. A alocação também é condicionada ao SIR do canal ser superior ao SIR de aceitação.

Cada ERB irá manter uma tabela com a prioridade de cada um dos canais. À medida que as chamadas são alocadas ou bloqueadas na ERB, a tabela de prioridades é atualizada. A prioridade de alocação de uma chamada é dada pela seguinte regra:

$$PRI = \frac{NS(ERB, canal)}{NT(ERB, canal)} \quad (4.1)$$

...onde:

- PRI: prioridade para alocação de "canal" na "ERB" considerada;
- NS(ERB,canal): número de vezes passadas que "ERB" conseguiu alocar "canal" com sucesso;
- NT(ERB,canal): número de vezes passadas que "ERB" tentou alocar neste "canal".

Note que a prioridade "PRI" sempre estará entre 0 e 1.

A figura 4.5 ilustra o fluxograma do Algoritmo DCA "Channel Segregation" considerado.

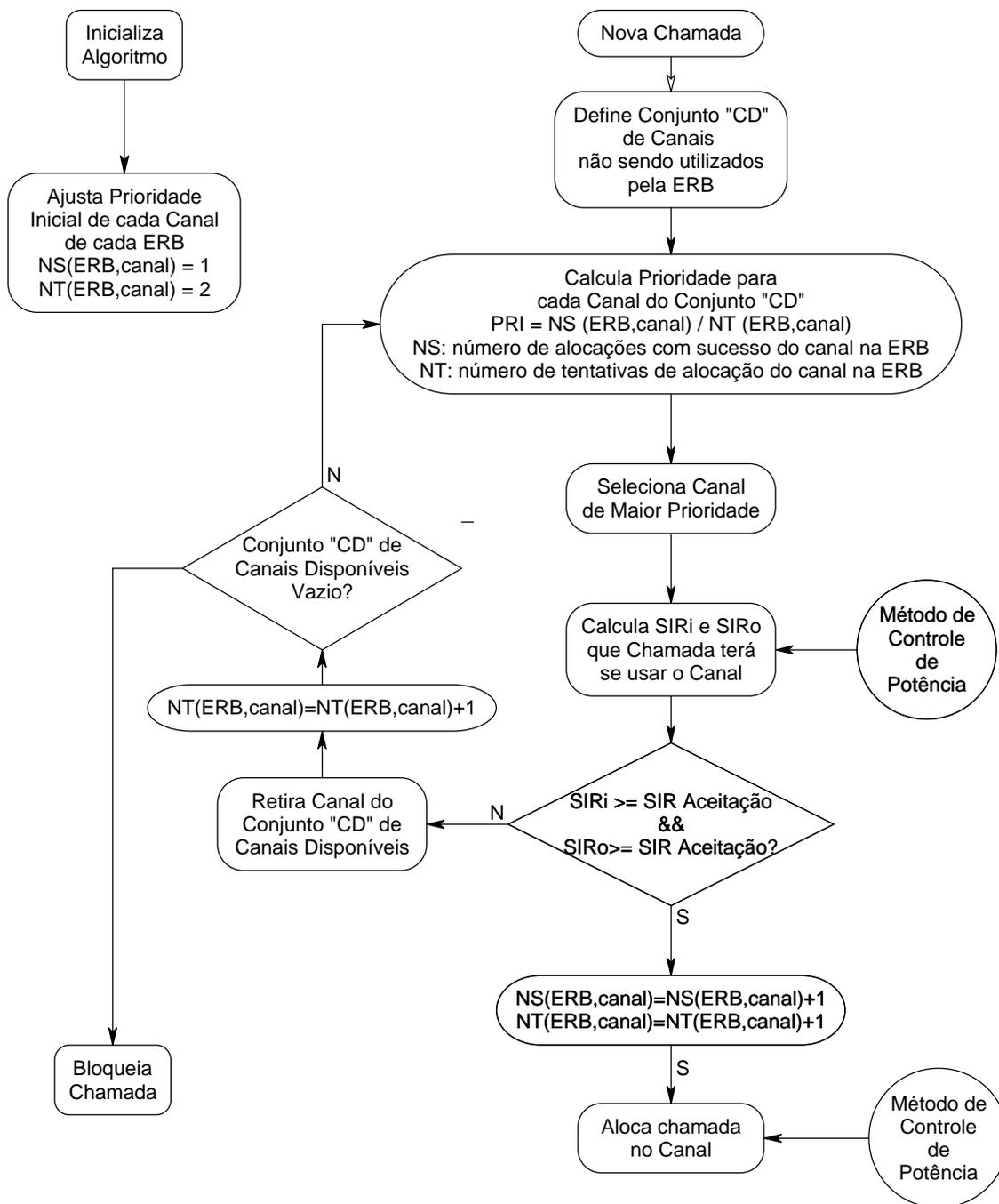


Fig. 4.5 - Fluxograma para Algoritmo DCA de Segregação de Canais ("Channel Segregation" - CHANSG) considerado.

4.1.1.6. Algoritmo DCA de Partição de Reuso ("Reuse Partitioning" - RUP)

O algoritmo DCA de Partição de Reuso irá preferir alocar canais de forma a criar diversos padrões de reuso no sistema. Conforme já explicado no item 3.2.1.4, usuários que recebem sinais com baixa atenuação podem reutilizar o mesmo canal mais frequentemente no sistema do que usuários que recebem sinais com alta atenuação. Assim, baseado no nível de sinal que o usuário recebe, o algoritmo tenta encaixá-lo em um determinado canal pertencente a um determinado padrão de reuso. A figura 4.6 ilustra o fluxograma do Algoritmo DCA de Partição de Reuso (RUP) considerado. Este algoritmo segue o algoritmo sugerido por Takenaka [64].

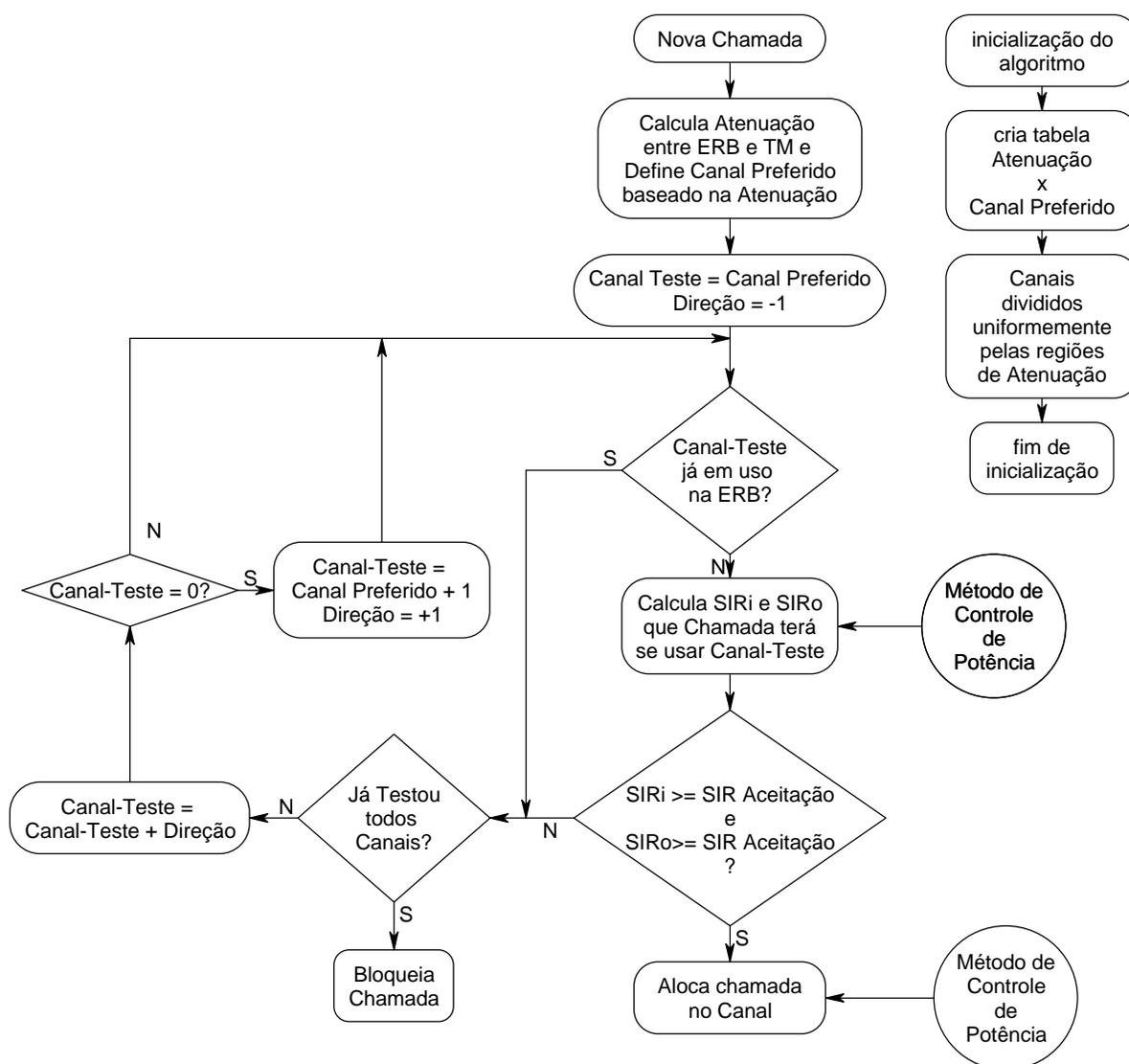


Fig. 4.6 - Fluxograma para Algoritmo DCA de Partição de Reuso ("Reuse Partitioning" - RUP) considerado.

4.1.2. Cenário de Simulação

A fim de avaliar o desempenho de cada algoritmo DCA no que diz respeito ao algoritmo FCA e entre si, foram executadas diversas simulações dos algoritmos citados no item 4.1.1. sobre o mesmo cenário de simulação e sobre as mesmas condições de sistema.

O cenário de simulação utilizado para os resultados apresentados se encontra nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 :

características do sistema celular:	
numero de ERBs:	196
numero de canais:	70 ⁵
distribuição de ERBs:	regular e hexagonal
# ERBs na coordenada x do plano de ERBs:	14
# ERBs na coordenada y do plano de ERBs:	14
tratamento de bordas:	toroidal (células da borda são vizinhas entre si) ⁶
escala do gradil:	70 metros
distância entre ERBs:	2100 metros

Tabela 4.1 - Cenário de Simulação: Características do Sistema Celular Simulado

características de geração de chamadas:	
distribuição de tráfego gerado:	uniforme
mobilidade de usuários:	considerada somente no item 4.4. Nos outros itens, usuários estão fixos durante a chamada.
duração média das chamadas:	100 segundos
taxa de geração de chamadas:	9,9 a 45,0 chamadas por segundo
chamadas simuladas após alcançar estado estacionário:	de 30000 a 50000 chamadas

Tabela 4.2 - Cenário de Simulação: Características de Geração de Chamadas

⁵ apesar deste número representar um valor relativamente baixo ao número de canais total dos sistemas celulares analógicos (AMPS), o mesmo foi utilizado por 2 razões básicas: a) limitações do simulador. b) possibilidade de comparação com resultados já publicados na literatura, permitindo validação dos resultados.

⁶ ao utilizar o modelo toroidal, os sinais propagados que alcançam a borda da área sendo simulada continuam na borda oposta. A fim de evitar que o sinal gerado na ERB cause interferência nela mesma, limitou-se o alcance dos sinais propagados a 10,5km. Note que tal limitação não compromete a simulação pois, na situação simulada, o nível de sinal recebido a uma distância de 10,5km já estaria muito abaixo dos níveis de interferência dominantes.

Modelamento da Propagação: ⁷	
topografia do terreno:	totalmente plano
coeficiente de atenuação ("α"):	4,0
cálculo da atenuação em função da distância ("dist") (em dB):	$10 \cdot \alpha \cdot \log_{10}(dist)$
variância do desvanecimento lognormal:	6,0 dB
potência efetivamente radiada (ERP) do TM:	200dB acima do nível de ruído ⁸
potência efetivamente radiada (ERP) da ERB:	200dB acima do nível de ruído
controle de potência no Terminal Móvel:	nível de potência de recepção constante (quando aplicado)
controle de potência na ERB:	nível de potência de recepção constante (quando aplicado)

Tabela 4.3 - Cenário de Simulação: Características do Modelamento de Propagação.

Acesso ao Sistema	
limiar de SIR para Aceitação ⁹ ("SIR_Aceit.", "SIR_Intraho", "SIR_Interho"):	de 15 a 29 dB
limiar de SIR mínimo ("SIR_Min"): ¹⁰	15 dB
escolha de ERB:	ERB de melhor sinal ¹¹
redirecionamento de chamadas entre ERBs:	não considerado; se ERB não conseguir suportar chamada, a mesma é bloqueada.

Tabela 4.4 - Cenário de Simulação: Características de Acesso ao Sistema.

4.1.3. Medidas de Desempenho

O desempenho de sistemas de telefonia é geralmente analisado através da medida da probabilidade de bloqueio; isto é, a razão média entre o número de chamadas negadas e o número total de chamadas geradas. Através desta medida, pode-se determinar a capacidade de usuários que podem usufruir do sistema sob um determinado grau-de-serviço. Tal medida também têm sido utilizada diversas vezes para a avaliação da quantidade de usuários que um sistema celular pode

⁷ ao se aplicar cada um dos algoritmos, considerou-se as mesmas condições do sistema, incluindo as condições de propagação e desvanecimento em cada ponto da área de serviço.

⁸ utilizaram-se potências efetivamente radiadas muito superiores ao nível de ruído para que este último não influa nos resultados. Está-se considerando o sistema sendo limitado por interferência, portanto o nível de sinal recebido em qualquer parte da ERB é bem superior ao nível de ruído.

⁹ o limiar de SIR para Aceitação foi o mesmo tanto para a alocação de chamadas novas como para a realocação de chamadas em "intracell handoff" ou em "intercell handoff".

¹⁰ o limiar de SIR mínimo representa o menor SIR que uma chamada pode sustentar; "intracell handoff" é iniciado para toda chamada cujo SIR caia abaixo deste nível.

¹¹ a conexão com a ERB que proporciona ao TM o melhor sinal não implica que a ERB escolhida seja a ERB mais próxima. Esta diferença ocorre devido ao desvanecimento lognormal.

usufruir. Entretanto, embora tal medida seja suficiente para a determinação da capacidade em sistemas de telefonia fixa, a mesma não é suficiente para analisar completamente o desempenho de sistemas celulares.

As peculiaridades de um sistema celular e seu algoritmo de alocação exigem que este seja analisado através de uma série de medidas adicionais. As medidas consideradas fundamentais para a análise, e que foram consideradas neste trabalho, são:

- probabilidade de bloqueio de novas chamadas;
- probabilidade de interrupção (queda) de chamadas em andamento;
- qualidade das chamadas (relação Sinal-Interferência SIR);
- probabilidade da chamada sofrer interferência que a force à mudança de canal ("intracell handoffs").

O uso único da medida de probabilidade de bloqueio pode levar a conclusões imprecisas quanto ao desempenho de algoritmos de alocação em sistemas celulares, pois a mesma não reflete o comportamento com respeito aos outros parâmetros, igualmente importantes no desempenho de um sistema.

A obtenção das estimativas das medidas de desempenho utilizadas neste trabalho segue as formulações (4.2) a (4.9).

$$\text{Pr ob(bloqueio_novas_chamadas)} = \frac{\text{fluxo_chamadas_bloqueadas}}{\text{fluxo_chamadas_geradas}} \quad (4.2)$$

$$\text{Pr ob(queda_por_falha_int raho)} = \frac{\text{fluxo_queda_falha_int raho}}{\text{fluxo_chamadas_alocadas}} \quad (4.3)$$

$$\text{Pr ob(queda_por_falha_int erho)} = \frac{\text{fluxo_queda_falha_int erho}}{\text{fluxo_chamadas_alocadas}} \quad (4.4)$$

$$\text{Pr ob(chamada_sofrer_int raho)} = \frac{\text{fluxo_chamadas_em_int raho}}{\text{fluxo_chamadas_alocadas}} \quad (4.5)$$

A figura 4.7 auxilia no entendimento, mostrando como cada medida é obtida. Os termos das equações (4.2) a (4.5) podem ser identificados nesta figura.

¹² a medida efetivamente obtida nas simulações foi calculada através de $\text{Pr ob(chamada_sofrer_int raho)} = \frac{\text{\#chamadas_1_ou_+_int raho}}{\text{\#chamadas_alocadas}}$, que se aproxima de (4.5) quando a média de intracell handoffs por chamada é menor que 1.

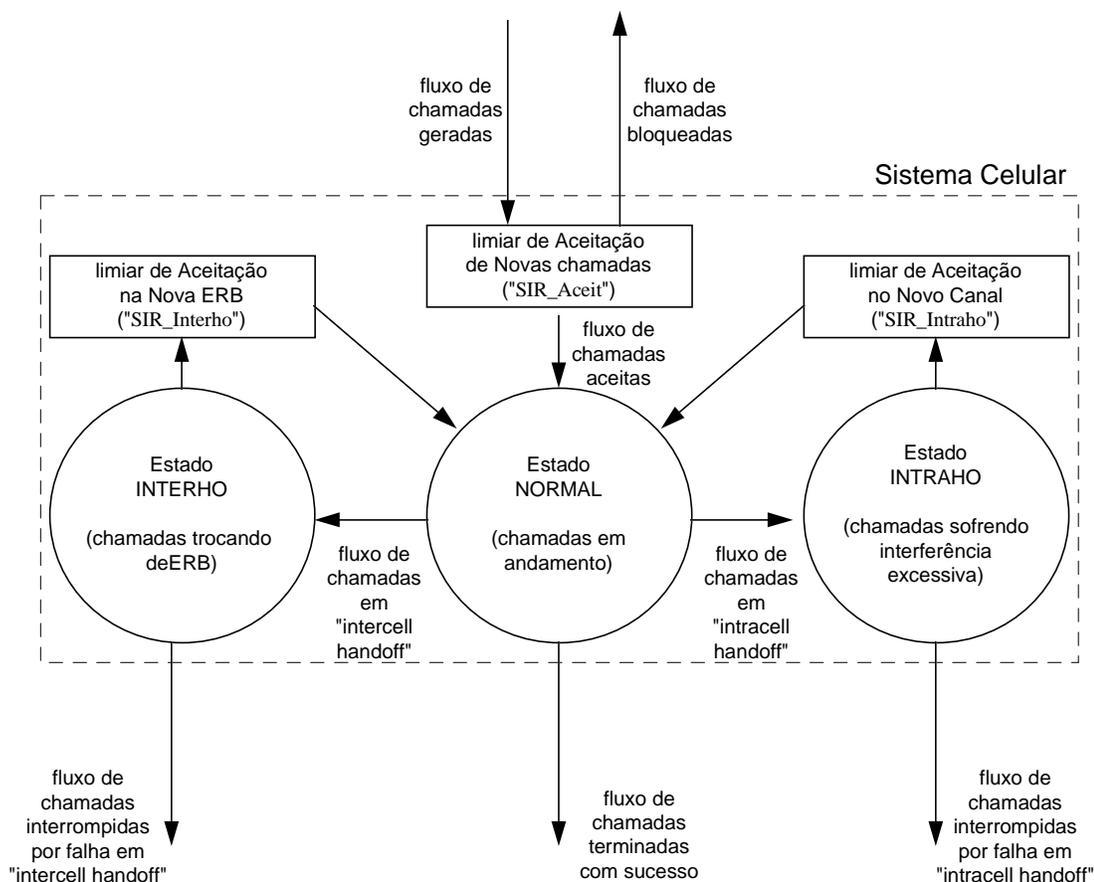


Fig. 4.7 - Diagrama de Fluxos de chamadas no Sistema Celular utilizando algoritmo DCA-AI.

Além das medidas de probabilidade, foram obtidas as seguintes medidas adicionais:

$$\#_med_intraho / chamada = \frac{\#intraho_total}{\#chamadas_completadas_sucesso} \quad (4.6)$$

...onde:

- $\#_med_intraho / chamada$: é o número médio de "intracell handoffs" que as chamadas completadas com sucesso sofreram.
- $\#intraho_total$: é o total de "intracell handoffs" contados dentre as chamadas completadas com sucesso.

$$SIRmed = \frac{\sum SIRmed_ch_u}{\#chamadas_completadas_sucesso} \quad (4.7)$$

...onde "SIRmed" representa a média dos SIRs médios das chamadas completadas com sucesso, e "SIRmed_ch_u" representa o SIR médio da chamada "u" completada com sucesso, dado por (4.8).

$$\text{SIRmed_ch}_u = \int_{\text{durch}_u} \text{SIR_ch}_u(t) \cdot dt \quad (4.8)$$

...onde:

- durch_u : representa o tempo de duração da chamada "u" no sistema
- $\text{SIR_ch}_u(t)$: representa o SIR instantâneo da chamada "u" no instante de tempo "t".

As equações (4.7) e (4.8) são válidas tanto no sentido TM-ERB como no sentido ERB-TM. Em todas as simulações, estas medidas de qualidade foram obtidas em ambos os sentidos. Histogramas de distribuição do SIR médio das chamadas (" SIRmed_ch_u ") também foram coletados para cada cenário, em ambos os sentidos de transmissão. Os histogramas foram coletados com precisão de 1dB. A partir dos histogramas, foi levantado o nível de SIR que englobou 10% do conjunto de SIRs médios das chamadas completadas (nível " $\text{SIR}_{10\%}$ ").

Além das medidas de SIR médio das chamadas completadas com sucesso, coletou-se também o SIR no momento da alocação das chamadas, obtido através da estimativa apresentada em (4.9).

$$\text{SIRaloc} = \frac{\sum \text{SIRaloc_ch}_u}{\# \text{chamadas_alocadas}} \quad (4.9)$$

...onde " SIRaloc " representa a média dos SIRs de alocação das chamadas alocadas, e " SIRaloc_ch_u " representa o SIR de alocação de uma determinada chamada "u" alocada no sistema.

A medida de SIR de alocação também foi obtida tanto no sentido TM-ERB como no sentido ERB-TM. Histogramas de distribuição de SIR de alocação também foram coletados em cada cenário.

4.2. Análise de Desempenho de Algoritmos DCA-AI: Sem Controle de Potência

Para que o efeito devido à forma de alocação não fosse influenciado pelo efeito do controle de potência, simulou-se primeiramente a condição sem Controle de Potência, isto é, com ERBs e TMs transmitindo sempre à máxima potência e de forma fixa durante toda a duração da chamada.

Os 5 tipos de algoritmos DCA foram simulados juntamente com o algoritmo FCA. Todos as simulações mantiveram o mesmo ambiente de simulação conforme descrito no item 4.1.2.

Para este cenário, será primeiramente analisado o comportamento dos algoritmos DCA-AI na situação de máxima capacidade. Durante esta análise, dado que todos os algoritmos estarão operando sob os mesmos parâmetros, será possível uma comparação do comportamento entre algoritmos DCA-AI.

Será visto que a situação de máxima capacidade não é recomendada devido a problemas de qualidade e estabilidade. Posteriormente, serão apresentados os resultados de desempenho dos algoritmos com os parâmetros de SIR de Aceitação ajustados para equalização de estabilidade e qualidade.

Ao final do item, os resultados obtidos serão confrontados com a análise teórica do item 3.2.4 e com resultados de trabalhos publicados na literatura.

4.2.1. Comportamento de Algoritmos DCA-AI na Condição de Máxima Capacidade

A fim de analisar a máxima capacidade que algoritmos DCA-AI podem oferecer sobre o FCA, todos os algoritmos consideraram o mesmo limiar de SIR para Aceitação de novas chamadas (15dB) e este igual ao limiar mínimo de SIR requerido (15dB).

Variou-se a carga de tráfego gerada nas simulações e a partir dos resultados das simulações, pode-se levantar o gráfico de probabilidade de bloqueio de cada algoritmo em função do tráfego gerado.

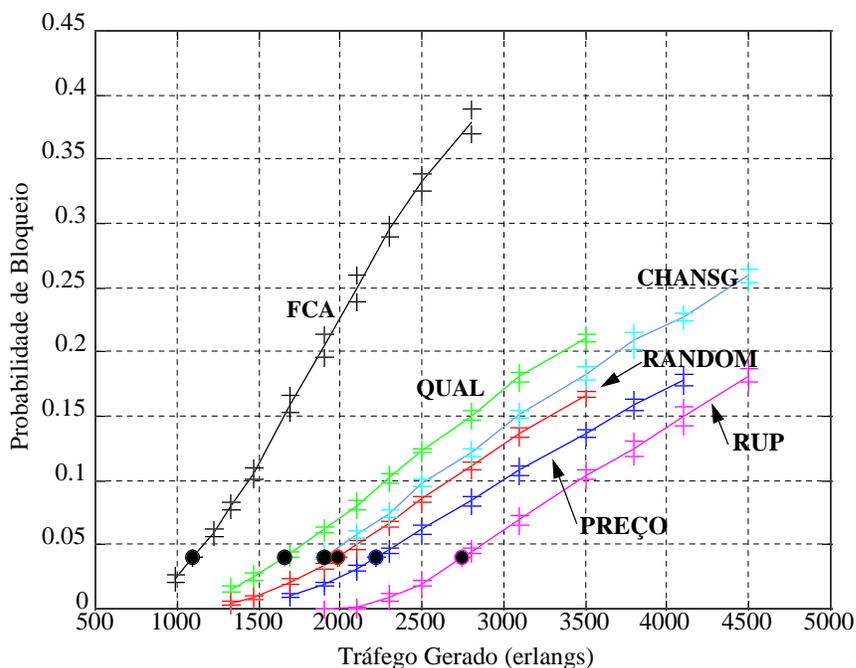


Fig. 4.8 - Probabilidade de Bloqueio de Algoritmos FCA e DCA-AI na condição de máxima capacidade, sem controle de potência.¹³

A figura 4.8 mostra que os algoritmos DCA adaptativos a interferência, sob as condições simuladas, oferecem redução na probabilidade de bloqueio se comparados com o algoritmo FCA. Observando o comportamento de cada algoritmo DCA sob o mesmo tráfego gerado de 2100 Erlangs no sistema, pode-se observar na figura 4.8 que, enquanto o algoritmo FCA operava com 25% de probabilidade de bloqueio, o algoritmo de Melhor Qualidade (QUAL) operava com 8%, algoritmo "Channel Segregation" (CHANSG) operava com 6%, algoritmo randômico (RANDOM) com 5%, algoritmo de Melhor Preço (PREÇO) com 3%, e algoritmo de Partição de Reuso (RUP) operava com probabilidade de bloqueio praticamente nula.

O algoritmo FCA mostrou probabilidade de bloqueio ligeiramente superior ao previsto pela teoria de Erlang-B (24,7%). Esta ligeira diferença se justifica pelo fato do FCA somente alocar canais acima do limiar SIR de aceitação. Embora tal SIR-mínimo já estivesse sendo garantido pela separação pré-programada de canais, o desvanecimento lognormal faz com que algumas chamadas gerem interferência acima da planejada em outras ERBs co-canais, evitando que o canal seja utilizado pela mesma. O uso de limiares de SIR em 15dB levou em consideração o

¹³ Os sinais de "+" circundando as curvas mostradas nos gráficos apresentados neste trabalho representam o intervalo de 90% de confiança. Os círculos nas curvas deste e dos gráficos subsequentes deste item indicam a medida quando o sistema está operando a 4% de probabilidade de bloqueio.

desvanecimento lognormal, a fim de que tais interferências sejam minimizadas, causando uma degradação mínima na probabilidade de bloqueio do FCA.

Conforme já explicado no item 3, a menor probabilidade de bloqueio dos algoritmos DCA adaptativos à interferência se deve principalmente a dois fatores: melhoria na troncalização dos canais do sistema e maior flexibilidade na distância mínima de reutilização de canais entre células. Dado que todos os algoritmos tinham à disposição todos os canais do sistema, a diferença entre desempenhos é justificada pelas diferenças na flexibilidade resultante de cada algoritmo em alocar usuários utilizando o mesmo canal (capacidade de compactação).

O algoritmo QUAL mostrou o pior desempenho em comparação com os outros algoritmos DCA; isto se deve basicamente à sua característica de alocar sempre o canal disponível de melhor qualidade (SIR). Ao alocar o canal de melhor qualidade, o algoritmo QUAL termina por alocar o mesmo canal para usuários muito separados geograficamente, de forma a garantir um alto SIR. A separação dos usuários utilizando o mesmo canal não permite que o canal seja reutilizado diversas vezes no sistema, diminuindo a chance de futuras alocações no sistema.

De forma análoga, o algoritmo PREÇO apresentou uma das mais baixas probabilidades de bloqueio pois procura sempre alocar o canal disponível com pior qualidade acima do limiar de aceitação. Esta filosofia de alocação aproxima usuários utilizando o mesmo canal, permitindo uma maior compactação no uso do canal e conseqüentemente aumentando a chance de futuras alocações no sistema.

Apesar do algoritmo PREÇO procurar alocar os canais de forma a aproximar usuários, tal filosofia não garante que um canal esteja compactado da melhor forma possível, pois a indisponibilidade de canais com baixos SIR faz com que canais com SIR alto também sejam alocados no canal, perturbando sua compactação.

O algoritmo RUP se concentra em alocar canais de forma a formar os diversos padrões compactos de reutilização de canais. Tal enfoque foi reconhecido por muitos trabalhos [5,23,24,39,56,62,64] como sendo o enfoque que proporciona o melhor desempenho conforme visto no item 3.2.5. Dado que o algoritmo RUP proporciona uma maior compactação que o algoritmo PREÇO e os outros algoritmos DCA, o mesmo forneceu a menor probabilidade de bloqueio.

Dado que o algoritmo RANDOM não procura alocar o canal de melhor nem o de pior SIR, o mesmo termina por alocar canais com SIR, em média, entre os algoritmos QUAL e PREÇO. Dessa forma, consegue-se uma compactação

intermediária entre os mesmos, justificando o resultado intermediário. Kanai [24] e Whitehead [56] também reconheceram que o algoritmo RANDOM possui um desempenho melhor que o FCA.

O algoritmo CHANSG ("Channel Segregation"), baseado em alocações passadas, tem como principal objetivo permitir que as próprias ERBs definam os próprios canais a utilizar. A forma de definição das prioridades de cada canal em cada ERB é feita de forma semelhante a uma rede neural artificial, onde as diversas chamadas ocorridas em cada ERB podem ser encaradas como entradas e as prioridades dos diversos canais como pesos. Com os pesos iniciais definidos como sendo iguais a $\frac{1}{2}$ e com as entradas aleatórias, não se pode garantir que os pesos/prioridades convergirão para uma configuração correspondente ao padrão de reutilização mais compacto, muito menos aos múltiplos padrões para máxima compactação, devido à própria aleatoriedade da entrada. Caso esta "rede neural" tivesse sido "treinada" previamente com entradas especificamente estudadas, os pesos/prioridades poderiam alcançar valores correspondentes a uma situação de maior compactação. A aleatoriedade das entradas nesta "rede neural" sem treinamento justifica a probabilidade de bloqueio semelhante à do algoritmo RANDOM.

A figura 4.9 apresenta histogramas de SIR das chamadas que podem auxiliar no entendimento do comportamento dos algoritmos DCA-AI. Os histogramas de SIR se referem à condição de 2100 Erlangs de tráfego gerado em cada algoritmo. Mostram-se somente os histogramas de SIR no sentido TM-ERB pois os histogramas para o sentido ERB-TM são bem semelhantes.

O histograma de SIR das chamadas no momento da alocação confirmam que o algoritmo PREÇO, seguido do algoritmo RUP, alocam canais com baixo SIR; enquanto o algoritmo QUAL aloca canais com alto SIR, de forma semelhante ao algoritmo FCA. Algoritmos RANDOM e CHANSG mostraram histogramas intermediários e semelhantes.

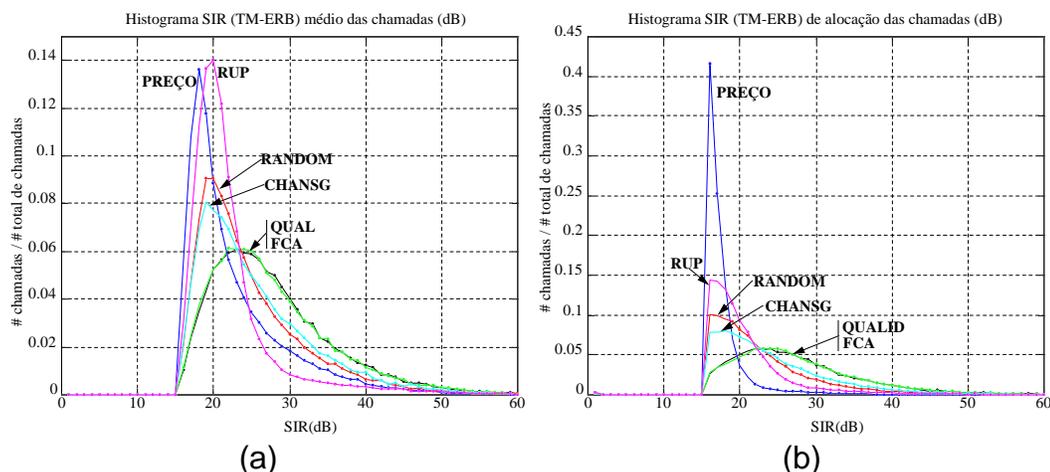


Fig. 4.9: Histogramas de SIR (TM-ERB) das chamadas nos algoritmos DCA-AI sem controle de potência, ajustados para máxima capacidade, sob o mesmo tráfego gerado.

- (a): histograma de SIR (TM-ERB) médio das chamadas bem sucedidas e
 (b): histograma de SIR (TM-ERB) de alocação das chamadas alocadas.

O histograma do SIR médio das chamadas completadas com sucesso correlaciona-se com a capacidade dos algoritmos. Note que o algoritmo RUP é o algoritmo que consegue concentrar mais usuários com SIR baixo no sistema. Embora o algoritmo PREÇO se concentre em abaixar o SIR das chamadas, o histograma mostra que o algoritmo PREÇO também aloca muitas chamadas com SIR médio alto, justificando sua maior probabilidade de bloqueio com relação a RUP.

O histograma de SIR das chamadas no algoritmo QUAL mostra que grande parcela das chamadas tiveram SIR médio muito superior ao SIR mínimo. O histograma mostra que a distribuição de SIR médio é bem distribuída, possuindo boa parcela de chamada com altos SIRs (superiores a 40dB). Tal comportamento justifica a maior probabilidade de bloqueio de QUAL.

4.2.2. Análise de Ganho de Capacidade de Algoritmos DCA-AI na Condição de Máxima Capacidade

A redução na probabilidade de bloqueio pode ser encarada como ganho de capacidade ao se considerar o mesmo nível de probabilidade de bloqueio. A 4% de probabilidade de bloqueio, os diferentes tipos de algoritmos DCA forneceram os seguintes ganhos de capacidade sobre o algoritmo FCA:

Algoritmo	ganho de capacidade sobre FCA (a 4% de prob. bloqueio)
Melhor Qualidade (QUAL):	52%
Randômico (RANDOM):	81%
Melhor Preço (PREÇO):	104%
"Channel Segregation" - (CHANSO):	74%
Partição de Reuso - (RUP)	151%

Tabela 4.5 - Ganhos de capacidade de algoritmos DCA-AI sobre algoritmo FCA com parâmetros ajustados para máxima capacidade, em sistema operando sem controle de potência.

Se fosse considerado somente o ganho de capacidade para a avaliação dos algoritmos, poderia-se chegar à conclusão que os algoritmos RUP e PREÇO são os algoritmos DCA mais indicados para sistemas celulares, fornecendo ganhos superiores a 100%. Entretanto, tal conclusão pode estar equivocada pois outras medidas de desempenho devem ser avaliadas antes de se chegar à conclusões definitivas.

Os itens a seguir mostram o desempenho dos algoritmos DCA nas outras medidas de desempenho, evidenciando que as mesmas não podem ser desprezadas.

4.2.2.1. Qualidade (SIR) Média das Chamadas

Para vários níveis de tráfego gerados, obtiveram-se também valores de SIR médio e de SIR de alocação de cada chamada processada para cada algoritmo conforme definido no item 4.1.3. A figura 4.10 mostra como a média destas medidas varia com a carga de tráfego. Foram mostradas somente as curvas referentes aos valores de SIR no sentido TM-ERB pois os valores no sentido inverso foram bem semelhantes.¹⁴

A fim de verificar qual a qualidade média das chamadas com os algoritmos operando a 4% de probabilidade de bloqueio, cada curva da figura 4.10 possui um círculo sobre o ponto representando a condição de operação de 4% de probabilidade de bloqueio para cada algoritmo.

¹⁴ Em média, as chamadas possuíam a mesma relação SIR em ambos os sentidos (TM-ERB e ERB-TM), com ligeira diferença positiva para o SIR no sentido ERB-TM. A diferença pode ser explicada pelo fato das ERBs possuírem posições bem definidas e espaçadas; enquanto que os TMs podem assumir diversas posições dentro de uma região de cobertura de uma ERB. Assim, o sentido TM-ERB

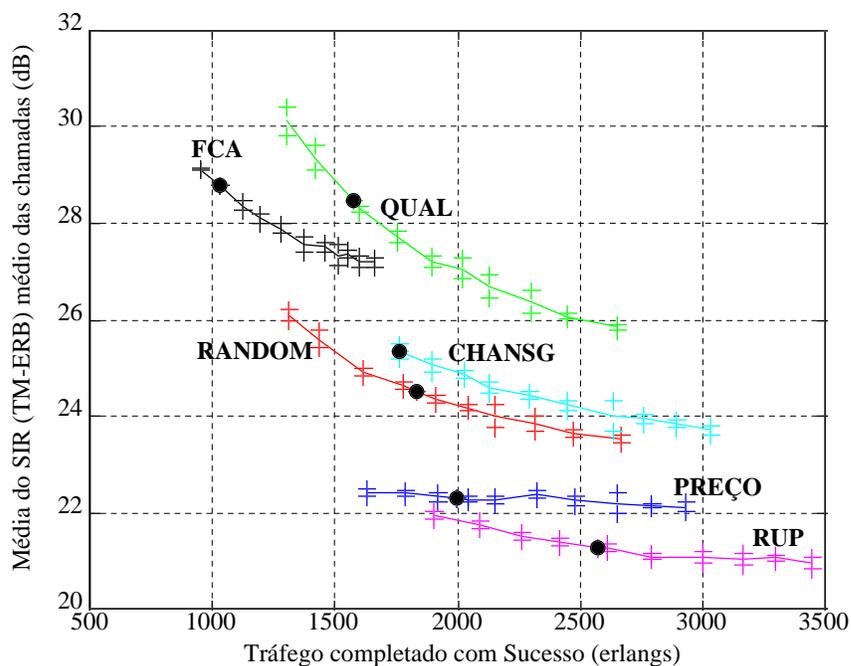


Fig. 4.10: Médias do SIR médio das chamadas bem sucedidas em sistemas DCA-AI sem controle de potência ajustados para máxima capacidade.

Através da figura 4.10, pode-se observar que os algoritmos RUP e PREÇO possuem valores de SIR médio das chamadas muito inferiores aos valores encontrados no algoritmo FCA ou no algoritmo QUAL. Os algoritmos RANDOM e CHANSG possuem valores intermediários de SIR médio.

Ao comparar os pontos da figura 4.10 com os resultados da tabela 4.5, pode-se observar que existe uma correlação entre os valores médios de SIR e o ganho de capacidade. Enquanto o algoritmo RUP possuiu o melhor ganho de capacidade, este possuiu o menor nível médio de SIR médio. Da mesma forma, o algoritmo QUAL possuiu o pior ganho de capacidade, mas resultou em um alto nível de SIR médio. Este compromisso entre qualidade e capacidade também foi verificado na literatura [56].

Ao comparar as figuras 4.10 e 4.8, pode-se verificar que o compromisso entre qualidade e capacidade (ou probabilidade de bloqueio) é válida em vários pontos de tráfego gerado. A partir destas figuras, pode-se verificar que a mesma característica de "compactar" usuários em um mesmo canal dos algoritmos RUP e PREÇO que lhes fornece baixa probabilidade de bloqueio também lhes fornece uma qualidade de chamadas pior pois, ao compactar chamadas, os usuários estão mais próximos e portanto geram níveis de interferência altos. O mesmo raciocínio pode ser estendido

aos algoritmos QUAL, RANDOM e CHANSG. O alto valor de SIR médio encontrado em FCA é justificado pela separação geográfica fixa imposta entre ERBs co-canais.

Pode-se observar também na figura 4.10 o comportamento decrescente das curvas de SIR com o aumento de tráfego. Este comportamento é decorrente da interferência co-canal adicional gerada pelo maior tráfego sendo alocado.

Conforme observado, algoritmos DCA-AI com altos ganhos de capacidade podem estar associados à baixa qualidade das chamadas. Se a qualidade das comunicações for considerada como um critério de desempenho, comparações de capacidade de tráfego não podem ser feitas sem se considerar uma equalização adequada da qualidade das chamadas entre os diversos algoritmos.

4.2.2.2. Estabilidade de Chamadas

Conforme explicado no item 3.2, uma chamada executa uma mudança de canal na célula ("intracell handoff") quando não é mais possível se conseguir a qualidade (nível SIR) mínima desejada no canal em uso.

Observe que a análise do comportamento do sistema em relação aos "intracell handoffs" é importante pois este reflete a estabilidade das chamadas no sistema. Além disso, "intracell handoffs" causam maior processamento nas ERBs¹⁵. Sob outro ponto de vista, a queda de uma chamada em andamento pode representar uma insatisfação do usuário maior do que se a chamada não tivesse nem iniciado.

Assim, os resultados de ganho de capacidade dos algoritmos DCA-AI sobre o algoritmo FCA mostrados na tabela 4.5 não podem ser considerados sem uma análise da estabilidade dos mesmos.

A medida de probabilidade de queda de uma chamada devido a "intracell handoffs" foi obtida para diversos níveis de tráfego gerado, conforme definido no item 4.1.3. A figura 4.11 mostra as curvas resultantes da probabilidade de queda de chamadas devido à falha no "intracell handoff" para cada um dos algoritmos em diferentes situações de tráfego.

¹⁵ atualmente as ERBs não possuem inteligência para alocar chamadas. Está-se supondo que em uma implementação descentralizada, as ERBs possuirão inteligência para alocar chamadas em sua própria célula. Assim, um maior número de "intracell handoffs" exigirá uma maior carga de processamento nas ERBs.

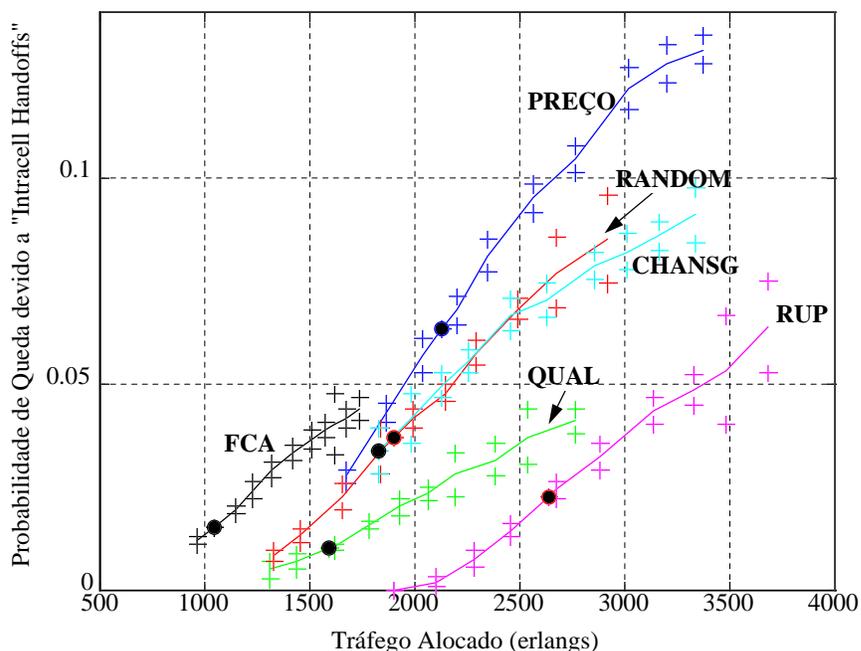


Fig. 4.11: Probabilidade de queda de chamadas em andamento devido à falha em "intracell handoff" nos algoritmos operando sem controle de potência e ajustados para máxima capacidade.

A probabilidade de queda de uma chamada por falha em "intracell handoff" depende fortemente da probabilidade das chamadas sofrerem interferência excessiva que as forcem a um "intracell handoff"; isto é, se nenhuma chamada sofrer "intracell handoff", não haverá queda.

Assim, decidiu-se analisar a probabilidade de queda de chamadas em conjunto a probabilidade de uma chamada sofrer "intracell handoffs". A figura 4.12 mostra as curvas resultantes da probabilidade de uma chamada sofrer "intracell handoff", conforme definido em 4.1.3, para cada um dos algoritmos em diferentes situações de tráfego.

Os círculos nas curvas das figuras 4.11 e 4.12 indicam o ponto referente às probabilidades de queda e de chamada sofrer "intracell handoff" de cada algoritmo quando operando em 4% de probabilidade de bloqueio. Os resultados destas figuras e os da tabela 4.5 foram transferidos para a tabela 4.6 a fim de permitir uma melhor análise.

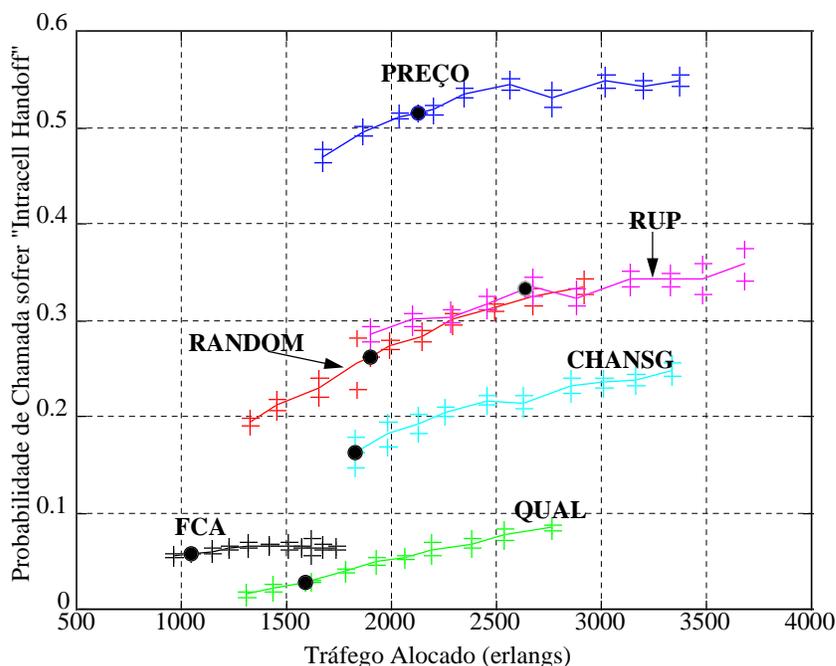


Fig. 4.12: Probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" nos algoritmos operando sem controle de potência e ajustados para máxima capacidade.

Algoritmo	ganho de capacidade sobre FCA (%)	probabilidade e de queda por "intracell handoff" (%)	probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" (%)
FCA	-	1,5	6,0
Melhor Qualidade (QUAL):	52	1,0	2,5
Randômico (RANDOM):	81	3,8	26,3
Melhor Preço (PREÇO):	104	6,4	51,5
"Channel Segregation" - (CHANSG):	74	3,5	16,0
Partição de Reuso - (RUP)	151	2,2	33,0

Tabela 4.6 - Probabilidade de queda por falha em "intracell handoff" e probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" com parâmetros ajustados para máxima capacidade, em níveis de tráfego para 4% de probabilidade de bloqueio, com algoritmos operando sem controle de potência.

A tabela 4.6 mostra que a estabilidade dos algoritmos deve ser considerada juntamente com a análise de ganho de capacidade, pois os algoritmos DCA-AI com parâmetros ajustados à máxima capacidade possuem probabilidade de queda de chamadas maior que a do algoritmo FCA. Isto significa, novamente, que a comparação da tabela 4.5 não é justa com o algoritmo FCA, sugerindo a necessidade de equalização dos parâmetros dos algoritmos.

As figuras 4.11 e 4.12 também permitem uma comparação de desempenho entre os algoritmos DCA-AI. Pela figura 4.12, pode-se observar que a probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff” aumenta com o aumento de carga. Tal fato era esperado pois quanto maior a carga, maior a chance de uma chamada alocada gerar interferência excessiva em uma outra chamada em andamento.

Pode-se observar também que, em todos níveis de tráfego simulados, o algoritmo PREÇO foi o algoritmo mais instável; isto é, com maior probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff”. Os algoritmos RANDOM e RUP tiveram estabilidade semelhante. Note que, embora os algoritmos CHANSG e RANDOM possuam probabilidade de bloqueio semelhantes para um mesmo tráfego, o algoritmo CHANSG supera o algoritmo RANDOM com respeito à estabilidade [5]. O algoritmo QUAL foi o que se mostrou mais estável, até mais estável que o FCA em níveis de tráfego mais baixos. Este desempenho relativo entre os algoritmos pode ser explicado pela maneira que cada algoritmo aloca as chamadas. Algoritmos que alocam chamadas com SIR muito próximos do limiar de SIR mínimo terão maior probabilidade de sofrer “intracell handoff”, pois pequenas interferências adicionais podem degradar o SIR da chamada a um nível inferior ao SIR mínimo. Isto significa que quanto maior for a margem entre o SIR de uma chamada e o SIR mínimo, menor a chance desta chamada sofrer um “intracell handoff”.

Observando os histogramas de SIR da figura 4.9-b, nota-se que os algoritmos QUAL e FCA são os algoritmos que geralmente alocam chamadas com alto SIR, possuindo portanto alta margem de SIR; justificando assim a baixa probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff” nestes algoritmos. Por outro lado, o algoritmo PREÇO aloca chamadas com SIR próximo do SIR mínimo; a pequena margem confirma a alta probabilidade de “intracell handoff”.

A figura 4.11 mostra a probabilidade de queda resultante de cada algoritmo. Observando o comportamento das curvas nas situações de tráfego simuladas, pode-se notar que o algoritmo PREÇO foi o que mostrou o pior desempenho dentre todos os algoritmos DCA; provavelmente devido à sua alta probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff”. Os algoritmos RANDOM e CHANSG tiveram comportamento semelhante apesar do algoritmo CHANSG possuir uma menor probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff”. A baixa probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff” permitiu uma menor probabilidade de queda no algoritmo QUAL. O algoritmo RUP mostrou um ótimo desempenho de probabilidade

de queda, apesar do mesmo possuir altas taxas de chamadas sofrendo "intracell handoff". Tal resultado mostra que o algoritmo RUP é um algoritmo muito estável, pois apresenta baixa probabilidade de queda para um alto ganho de capacidade. Pode-se sugerir uma justificativa para o ótimo desempenho de estabilidade do algoritmo RUP: sua característica de rearranjar suas chamadas. Apesar do algoritmo RUP sempre tentar alocar as novas chamadas de forma compacta, formando os múltiplos padrões de reuso, a aleatoriedade das chamadas não permite que os melhores canais sejam alocados a todo instante. Assim, algumas chamadas podem estar alocadas de forma não compacta. O "intracell handoff" de chamadas representaria uma oportunidade para o algoritmo RUP realocar esta chamada em um canal mais compacto que o anterior. Esta hipótese deve ser verificada futuramente.

Para auxiliar a análise de estabilidade, levantou-se em cada simulação o número médio de "intracell handoffs" por chamada. Tal medida, conforme definida no item 4.1.3, considera somente as chamadas que foram completadas com sucesso. Os resultados estão apresentados na figura 4.13.

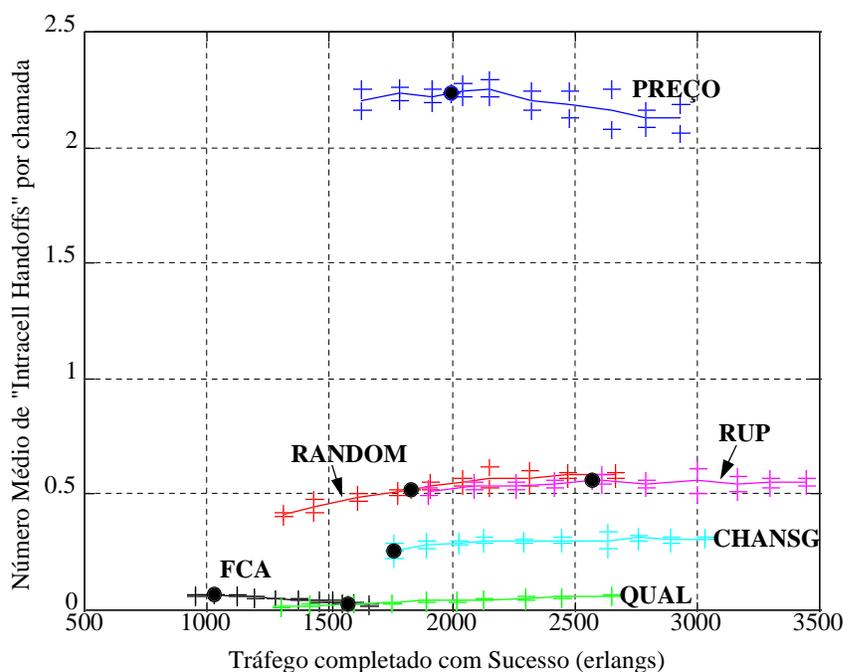


Fig. 4.13: Número médio de "intracell handoffs" por chamada bem sucedida nos algoritmos operando sem controle de potência e ajustados para máxima capacidade.

Os resultados da figura 4.13 mostram comportamento bem semelhante ao comportamento da figura 4.12, referente à probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff". Isto era esperado pois, quanto maior esta probabilidade, maior a média de "intracell handoffs" que uma chamada executará.

4.2.2.3. Resumo das Observações

Conforme visto, a avaliação de capacidade de tráfego baseada somente na medida de probabilidade de bloqueio pode levar a conclusões imprecisas. Por exemplo, poderia-se concluir que o algoritmo PREÇO seria um ótimo algoritmo DCA, entretanto, o mesmo possui alta probabilidade de interferência, baixa qualidade nas chamadas e alta taxa de queda de chamadas. Deve-se então comparar o algoritmo FCA com algoritmos DCA nos mesmos níveis de qualidade e estabilidade. Tal comparação foi feita e está relatada no item seguinte.

O fato de todos os algoritmos estarem operando sob as mesmas condições e parâmetros permitiu a comparação entre os mesmos em diversos níveis de tráfego. Dessas comparações, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Algoritmos que tentam "compactar" mais usuários em um mesmo canal (como os algoritmos RUP e PREÇO) mostraram menor probabilidade de bloqueio de novas chamadas.

- Existe um compromisso entre a probabilidade de bloqueio e a qualidade das chamadas em um algoritmo. Este compromisso foi sugerido por Whitehead [56] e verificado pelas simulações em todos os algoritmos DCA-AI. A forma como o algoritmo aloca as chamadas determina em que ponto de equilíbrio o sistema se encontra; isto é, enquanto o algoritmo QUAL incentiva alta qualidade do sistema, gerando alta probabilidade de bloqueio, os algoritmos PREÇO e RUP incentivam baixa qualidade do sistema com baixa taxa de bloqueio.

- A estabilidade dos algoritmos DCA-AI é um critério fundamental de análise. Algoritmos que alocam chamadas com níveis de SIR muito próximos ao SIR mínimo tendem a ter maior probabilidade de ocorrência de "intracell handoffs" e portanto maior número médio de "intracell handoffs" por chamada. Quanto maior forem estas medidas, menor é a estabilidade do sistema, pois a troca de canal pode representar uma queda da chamada, além de poder causar "intracell handoffs" em seqüência. Os histogramas de SIR de alocação são uma importante ferramenta para análise da

estabilidade dos algoritmos. Os histogramas da figura 4.9-(b) confirmam comportamentos como os mostrados pelos algoritmos QUAL e PREÇO.

- O bom desempenho do algoritmo RUP sugere que a capacidade de rearranjo de um algoritmo também influencia na estabilidade de um algoritmo DCA. Algoritmos que não conseguem rearranjar sua rede tendem a perder mais usuários (em queda) do que algoritmos que, durante os "intracell handoffs" rearranjam melhor suas redes, tornando-as mais compactas.

4.2.3. Comportamento de Algoritmos DCA-AI com Parâmetros Ajustados para Melhor Qualidade das Chamadas e Estabilidade do Sistema

Conforme visto no item 4.2.1, comparações de desempenho de capacidade entre algoritmos DCA e contra o algoritmo FCA somente podem ser feitas considerando-se aspectos de qualidade e estabilidade. Neste item serão ajustados os parâmetros dos algoritmos de forma que todos os algoritmos tenham os mesmos níveis de qualidade e estabilidade quando operando a 4% de probabilidade de bloqueio.

Após a equalização, será possível comparar o desempenho de capacidade de tráfego dos algoritmos.

4.2.3.1. Critério de Equalização de Algoritmos

De forma a nivelar os níveis de qualidade e estabilidade dos algoritmos, manteve-se o limiar de SIR mínimo ("SIR_min") e aumentou-se os limiares de SIR de Aceitação ("SIR_Aceit" e "SIR_Intraho"). Ao aumentar estes parâmetros, aumenta-se a média do SIR das chamadas. Além disso, a diferença entre o SIR de Aceitação e o SIR mínimo fornece uma margem para interferência. Isto é, interferências eventuais diminuirão o SIR mas podem não causar "intracell handoff" pois o SIR pode ainda estar acima do SIR mínimo. Assim, o aumento dos níveis de SIR de Aceitação permite aumentar a qualidade das chamadas de um algoritmo, além de tornar o algoritmo mais estável [11,19,23,24,26,66].

A fim de nivelar a qualidade das chamadas nos diferentes algoritmos, uma alternativa seria aumentar os níveis de SIR de Aceitação até que o SIR médio das chamadas em cada algoritmo fosse igual a um determinado valor. Tal procedimento

entretanto não seria justo com os algoritmos DCA, pois a distribuição de SIR difere entre algoritmos, conforme visto na figura 4.9. Seguindo a premissa de que qualidade excessiva não é fundamental, decidiu-se equalizar o nível de qualidade garantido para que no máximo 10% das chamadas tenham nível de qualidade (SIR) entre o nível referência de SIR e o nível de SIR mínimo. Tal nível será referenciado como nível "SIR_10%". Portanto, a fim de realizar uma comparação justa, os algoritmos tiveram seus parâmetros ajustados para que forneçam o mesmo nível "SIR_10%" [56]. O SIR de Aceitação de cada algoritmo foi então ajustado para que o nível "SIR_10%" iguale-se a um SIR referência de 21 dB, mantendo-se o nível de SIR mínimo em 15dB. O ajuste dos níveis de SIR de aceitação foi encontrado de forma empírica; à cada 1dB de aumento, verificou-se o nível "SIR_10%" do algoritmo, tanto no sentido TM-ERB quanto no sentido ERB-TM.

Deve-se ressaltar que o nível de SIR de Aceitação foi aumentado tanto para a aceitação de novas chamadas ("SIR_Aceit") como para a aceitação de chamadas em "intracell handoff" em um novo canal ("SIR_Intraho"). Este último SIR de Aceitação também foi ajustado a fim de evitar sucessivos "intracell handoffs" em uma chamada, pois se a mesma trocasse para um canal com qualidade marginal, a mesma provavelmente seria interrompida novamente.

Com respeito à estabilidade dos algoritmos, decidiu-se ajustar os parâmetros de SIR de Aceitação para que todos os algoritmos tivessem probabilidade de queda de chamadas por falha em "intracell handoff" igual ou menor que 2% quando estivessem operando com 4% de probabilidade de bloqueio. Note que com esta equalização, os algoritmos terão a mesma probabilidade de chamada completada com sucesso. A equalização com respeito a estabilidade foi também considerada em [5,11,37,64,66].

A tabela 4.7 mostra os níveis de SIR de aceitação encontrados em cada algoritmo para se conseguir um nível "SIR_10%" igual a 21dB, com probabilidade de queda igual ou inferior a 2%. Neste cenário, o fator limitante de equalização foi o nível "SIR_10%", isto é, com níveis de SIR de aceitação menores, poderia-se ter equalizado os algoritmos com respeito a estabilidade somente.

Algoritmo	Nível de SIR de aceitação p/ "SIR_10%" = 21dB e P(queda) ~ 2% (dB)
FCA	17
Melhor Qualidade (QUAL)	16
Melhor Preço (PREÇO)	20
Randômico (RANDOM)	19
"Channel Segregation" (CHANSG)	19
Partição de Reuso (RUP)	20

Tabela 4.7 - Níveis de SIR de Aceitação ("SIR_Aceit" e "SIR_Intraho") ajustados para equalização de estabilidade e qualidade em algoritmos sem controle de potência.

Os algoritmos foram resimulados para diversas cargas sob o mesmo ambiente de simulação, diferindo somente no parâmetro de SIR de aceitação.

4.2.3.2. Verificação da Equalização

Antes de verificar a probabilidade de bloqueio e o ganho de capacidade que cada algoritmo alcançou, apresentam-se as figuras 4.14 e 4.15 que, respectivamente, apresentam a probabilidade de queda de chamadas por falha em "intracell handoff" e os histogramas de SIR obtidos. O círculo nas curvas da figura 4.14 indicam a probabilidade de queda que o algoritmo sofre quando operando em nível de tráfego de 4% de probabilidade de bloqueio. Os histogramas da figura 4.15 são histogramas obtidos no nível de tráfego de 4% de probabilidade de bloqueio e os círculos nos histogramas indicam o nível "SIR_10%".

Analisando a figura 4.14, percebe-se que todos os algoritmos estão com probabilidade de queda próxima a 2%, confirmando a equalização. Comparando a figura 4.14 com a figura 4.11, pode-se observar que as probabilidades de queda em todos os algoritmos sofreram um decréscimo com o aumento do SIR de Aceitação, tornando os algoritmos mais estáveis. Conforme será visto mais adiante, a principal razão para tal decréscimo foi a redução na probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoffs".

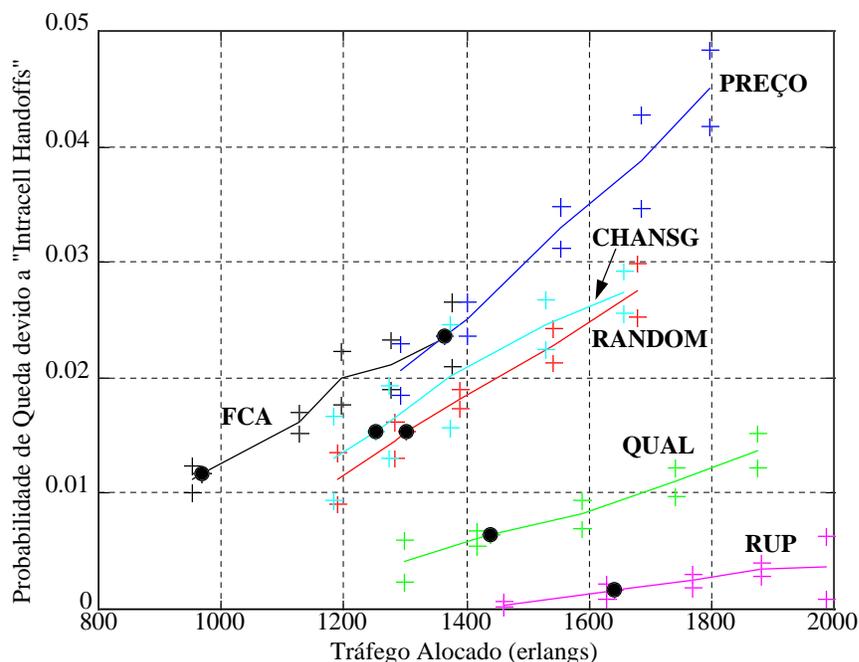


Fig. 4.14: Probabilidade de queda de chamadas em andamento devido a falha em "intracell handoff" nos algoritmos operando sem controle de potência e com parâmetros ajustados para equalização de qualidade e estabilidade.

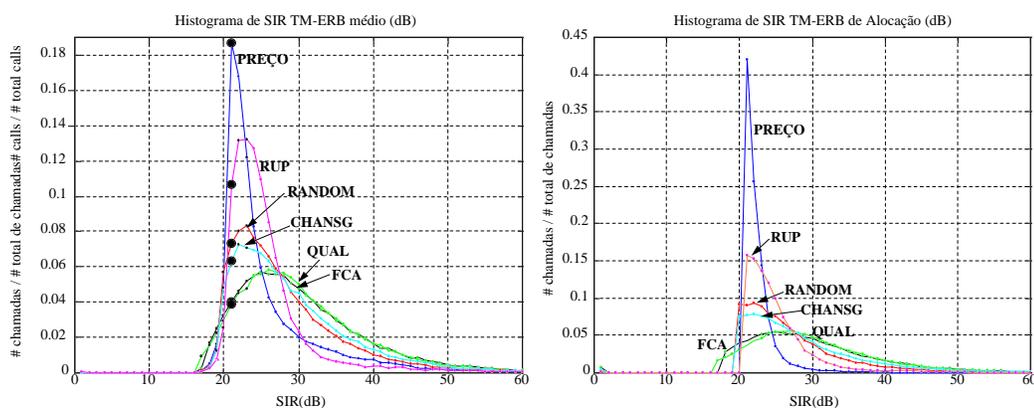


Fig. 4.15: Histogramas de SIR (TM-ERB)¹⁶ das chamadas nos algoritmos DCA-AI sem controle de potência, ajustados para equalização de qualidade e estabilidade.
 (a): histograma de SIR (TM-ERB) médio das chamadas e
 (b): histograma de SIR (TM-ERB) de alocação das chamadas.

Os círculos nos histogramas da figura 4.15-a confirmam a equalização do nível de "SIR_{10%}" entre os algoritmos; entretanto, deve-se observar que o nível de SIR médio não está necessariamente equalizado. Observando as curvas de histograma do SIR no momento da Alocação (figura 4.15-b), pode-se confirmar os diferentes SIRs de Aceitação para cada algoritmo.

¹⁶ O formato encontrado no sentido ERB-TM foi semelhante.

A fim de avaliar melhor o impacto do maior SIR de Aceitação nos algoritmos, a tabela 4.8 mostra a média do SIR médio das chamadas sob o mesmo tráfego de 1900 Erlangs, antes e depois do aumento do SIR de Aceitação em cada algoritmo¹⁷:

Algoritmo	Média do SIR médio das chamadas bem sucedidas (níveis de tráfego de 1900 Erl)	
	ajuste para máxima capacidade (dB)	ajuste para equalização (dB)
FCA	27,6	28,0
Melhor Qualidade (QUAL)	27,7	28,2
Melhor Preço (PREÇO)	22,4	24,8
Randômico (RANDOM)	24,6	26,5
"Channel Segregation" (CHANSO)	25,4	27,5
Partição de Reuso (RUP)	21,9	25,0

Tabela 4.8 - Efeito da equalização de qualidade na média do SIR médio do sentido (TM-ERB)¹⁸ das chamadas em sistema operando sem controle de potência.

Comparando os valores de média de SIR médio das chamadas antes e depois da equalização apresentados na tabela 4.8, pode-se notar que o aumento de SIR de Aceitação acarreta um aumento do SIR médio das chamadas. Os aumentos de SIR variaram conforme o aumento no limiar de SIR de alocação. Os algoritmos QUAL e FCA tiveram aumentos por volta de 0,4dB, um pequeno aumento equivalente ao pequeno aumento no SIR de Aceitação; os algoritmos RANDOM e CHANSO tiveram aumentos de aproximadamente 2dB; o algoritmo PREÇO teve aumento de 2,4dB, enquanto o algoritmo RUP teve aumento de aproximadamente 3dB. Estes aumentos também são condizentes com o maior aumento de SIR de Aceitação.

O aumento dos valores de SIR eram esperados pois o aumento de SIR de Aceitação afeta diretamente o SIR das chamadas alocadas, que por sua vez tem forte influência na medida de SIR médio.

Dado que os algoritmos estavam equalizados com respeito à estabilidade e à qualidade, pode-se analisar a probabilidade de bloqueio de cada um deles e o ganho de capacidade sobre o algoritmo FCA resultante.

¹⁷ deve-se observar que esta tabela não deve ser utilizada para comparação entre algoritmos, somente para análise do efeito do maior SIR de Aceitação no desempenho.

¹⁸ Os valores alcançados no sentido ERB-Terminal foram bem semelhantes e portanto não foram apresentados.

4.2.3.3 Capacidade de Tráfego

Na figura 4.16 se encontra a probabilidade de bloqueio para novas chamadas na condição de equalização de qualidade e estabilidade.

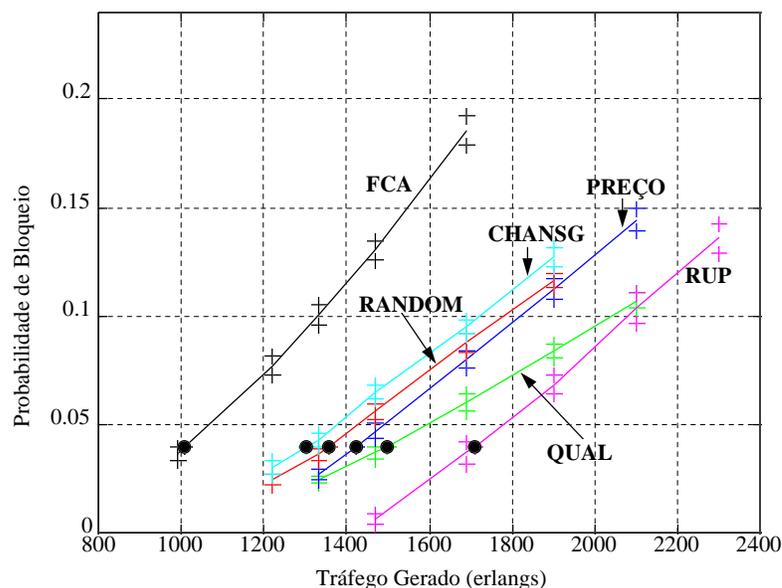


Fig. 4.16: Probabilidade de Bloqueio de Algoritmos FCA e DCA-AI com parâmetros ajustados para equalização de qualidade e estabilidade em sistema operando sem controle de potência.

Considerando o nível de 4% de probabilidade de bloqueio (marcado com um círculo em cada curva), pode-se encontrar o novo ganho de capacidade dos algoritmos e a diferença com relação à capacidade anterior ao aumento de SIR de Aceitação. A tabela 4.9 apresenta os resultados encontrados.

A tabela 4.9 apresenta também a diferença percentual entre os tráfegos suportados por cada algoritmo antes e depois da equalização. Note que o aumento de SIR de Aceitação provocou uma queda de capacidade em todos os algoritmos DCA, sendo a queda maior foi sentida nos algoritmos com maiores aumentos de SIR de Aceitação. Tal comportamento era esperado pois, ao aumentar o SIR de Aceitação de novas chamadas, incentiva-se a alocação de TMs, quando utilizando o mesmo canal, mais espaçados entre si para se garantir o maior SIR requerido. O maior espaçamento entre usuários prejudica a compactação do canal, baixando a capacidade do sistema. A queda de capacidade com aumento de SIR de Aceitação foi também verificada em [11,24,64].

Algoritmo	ganho de capacidade ¹⁹ sobre FCA (%)	efeito da equalização (a 4% de probabilidade de bloqueio) (%)
FCA	-	-7
Melhor Qualidade (QUAL):	49	-10
Randômico (RANDOM):	34	-32
Melhor Preço (PREÇO):	41	-36
"Channel Segregation" (CHANSG)	29	-32
Partição de Reuso (RUP)	70	-37

Tabela 4.9 - Ganhos de capacidade de algoritmos DCA-AI sobre algoritmo FCA e redução na capacidade com o ajuste dos parâmetros para equalização de estabilidade e qualidade, em sistema operando sem controle de potência.

Comparando os novos ganhos de capacidade, verifica-se que o algoritmo RUP é novamente o algoritmo que obteve o maior ganho de capacidade. O algoritmo QUAL mostrou capacidade superior aos outros algoritmos, anteriormente superiores a ele. A razão para tal melhoria foi que QUAL sofreu um pequeno aumento no SIR de Aceitação (16dB), enquanto que o restante dos algoritmos tiveram seu SIR de Aceitação aumentado para 19 ou 20dB. A alocação de chamadas com SIR entre 16 e 20dB garantiu um melhor desempenho para o algoritmo QUAL.

Observando os histogramas de SIR médio dos algoritmos QUAL e FCA na figura 4.15-(a), pode-se observar uma grande similaridade entre os mesmos, sugerindo que o algoritmo QUAL tenha seu ganho sobre o algoritmo FCA justificado principalmente pelo aumento na troncalização; similar a um algoritmo DCA adaptativo à interferência. A ordem de grandeza do ganho (49%) é bem similar aos valores encontrados pelos algoritmos DCA adaptativos ao tráfego conforme visto no item 3.1.5.

4.2.3.4 Outras Medidas de Desempenho

Apesar do item 4.2.3.2. mostrar que os algoritmos DCA possuíam estabilidade equalizada, é interessante observar a probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" e o número médio de "intracell handoffs" por chamada na

¹⁹ dado que o aumento de SIR de Aceitação foi feito de 1 em 1 dB e que a determinação do nível SIR_{10%} foi baseada em histograma de precisão de 1dB, os valores de ganho não devem ser considerados absolutamente, devendo ser utilizados somente para fins de comparação.

condição equalizada. A figura 4.17 apresenta estas medidas de desempenho nesta condição.

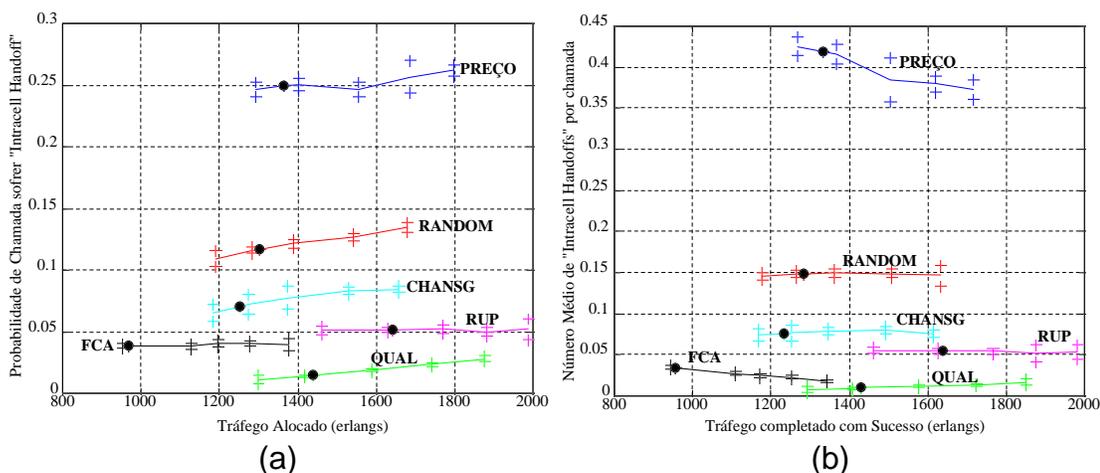


Fig. 4.17: Medidas adicionais de estabilidade em algoritmos ajustados para equalização de qualidade e estabilidade em sistema operando sem controle de potência.

(a) Probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff";

(b) número médio de "intracell handoffs" por chamada bem sucedida.

Os círculos nas curvas da figura 4.17 indicam os valores das medidas quando o sistema opera na condição de 4% de probabilidade de bloqueio. Pode-se observar que, embora os algoritmos estejam equalizados com respeito à probabilidade de queda, os algoritmos RUP e QUAL mostraram probabilidades de chamada sofrer "intracell handoff" e número médio de "intracell handoffs" por chamada bem inferiores aos mostrados pelos outros algoritmos. Isto mostra que estes algoritmos combinam melhor os desempenhos de capacidade, qualidade e estabilidade do que os outros algoritmos.

A fim de avaliar melhor o impacto do maior SIR de Aceitação na estabilidade dos algoritmos, a tabela 4.10 apresenta os valores de probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" e número médio de "intracell handoffs" para chamadas bem sucedidas sob o mesmo tráfego gerado de 1900 Erlangs antes e depois do aumento do SIR de Aceitação em cada algoritmo²⁰:

²⁰ deve-se observar que esta tabela não deve ser utilizada para comparação entre algoritmos, somente para análise do efeito do maior SIR de Aceitação no desempenho.

Algoritmo	probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" (@1900 Erl) (%)		número médio de "intracell handoff" por chamada bem sucedida (@1900 Erl)	
	máx. capacidade	equalizado	máx. capacidade	equalizado
FCA	7	4	0,04	0,02
Melhor Qualidade (QUAL):	4	2	0,03	0,01
Randômico (RANDOM):	25	13	0,51	0,15
Melhor Preço (PREÇO):	50	26	2,23	0,38
"Channel Segregation" (CHANSG)	16	8	0,26	0,08
Partição de Reuso (RUP)	28	5	0,51	0,05

Tabela 4.10 - Efeito da equalização na probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff" e no número médio de "intracell handoffs" por chamada em sistema operando sem controle de potência.

Comparando os resultados da tabela 4.10, pode-se notar que o aumento no SIR de Aceitação causa redução na probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff" em todos os algoritmos, embora o algoritmo PREÇO ainda mantenha uma probabilidade relativamente alta. A queda na probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff" ocorre principalmente porque os algoritmos alocaram as chamadas com uma margem maior de SIR capaz de melhor suportar interferências, conforme pode-se verificar ao comparar os histogramas das figuras 4.15-b e 4.9-b. O menor tráfego sendo cursado na condição equalizada também contribui com a redução, mas não é o fator principal, pois, conforme visto nas figuras 4.12 e 4.17, a probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" não varia muito com a variação do tráfego cursado.

Ao comparar as figuras 4.13 e 4.17 (b), pode-se verificar que a menor probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff" se reflete diretamente no número médio de "intracell handoffs" por chamada completada. Conforme mostrado na tabela 4.10, o aumento do SIR de aceitação provocou uma queda no número médio de "intracell handoffs" por chamada, especialmente nos algoritmos PREÇO (queda de 2,23 intrahos/chamada em média para 0,38 intrahos/chamada) e no algoritmo RUP (queda de 0,51 intrahos/chamada para 0,05 intrahos/chamada).

4.2.3.5 Validação dos Resultados Obtidos

A fim de validar os resultados obtidos, os mesmos foram comparados com resultados publicados na literatura, conforme apresentados no item 3.2.5, e com os limites teóricos, conforme visto no item 3.2.4.

4.2.3.5.1. Validação Teórica

Antes de aplicar a relação (3.34) (vide item 3.2.4.3), deve-se obter a estimativa para o número efetivo de células no "cluster" ("Ne").

A tabela 4.11 apresenta os dados para cálculo e os resultados para cada um dos algoritmos DCA-AI considerados²¹:

Algoritmo	Média do SIR médio (dB)	nível SIR_10% (dB)	Ne ²²	limite inferior ²³	limite superior
				$\frac{Cm_{DCA-AI}}{Cm_{FCA}}$	$\frac{Cm_{DCA-AI}}{Cm_{FCA}}$
FCA	29,9	21	-	-	-
Melhor Qualidade (QUAL):	29,6	21	6,76	0,51	1,58
Randômico (RANDOM):	27,5	21	5,49	0,62	1,95
Melhor Preço (PREÇO):	25,1	21	4,16	0,82	2,57
"Channel Segregation" (CHANSO)	28,6	21	6,24	0,55	1,71
Partição de Reuso (RUP)	25,1	21	4,16	0,82	2,57

Tabela 4.11 - Limites Teóricos para algoritmos DCA-AI simulados.

Os limites de ganho de capacidade são facilmente obtidos ao subtrair-se 1 (um) de cada um dos limites apresentados na tabela 4.11, podendo-se observar que os resultados apresentados na tabela 4.9 estão dentro dos limites teóricos.

A formulação do item 3.2.4.1 também pode ser utilizada para validação dos resultados. Dado que o número médio de usuários utilizando um dado canal pode ser relacionado com o SIR das chamadas através do cálculo das "áreas de reuso" (vide relação (3.24)), a relação entre o número de usuários ativos de um mesmo algoritmo com diferentes características de SIR pode ser comprovada pela relação entre suas "áreas de reuso". Simplificando a relação (3.24) e retirando os termos

²¹ os valores apresentados na tabela 4.11 se referem a valores obtidos sob o tráfego que gera 4% de probabilidade de bloqueio em cada algoritmo.

²² obtido através das relações (3.31), (3.32) e (3.33) do item 3.2.4.3.

²³ foi utilizado " δ "=0,37 conforme tabela 3.1.

constantes ou de média constante, a relação entre capacidade de um mesmo algoritmo com diferentes características de SIR pode ser dada pela relação (4.10).

$$\Delta C = 2^{\frac{\Delta \text{SIR}}{1,5\alpha}} \quad (4.10)$$

...onde " ΔSIR " representa a variação de SIR entre duas condições simuladas de um mesmo algoritmo, e " ΔC " representa a variação do número médio de usuários suportados por cada canal do sistema. Conforme explicado no item 3.2.4, esta relação somente considera o ganho devido à adaptabilidade à interferência não considerando o ganho de troncalização. Dessa forma, a mesma deve ser utilizada idealmente sob o mesmo nível de troncalização. Assim, esta relação não pode ser utilizada na comparação de capacidades entre algoritmos, nem na comparação entre dois pontos de operação distintos do mesmo algoritmo.

Dado que os desempenhos de máxima capacidade e com equalização estão sob pontos de troncalização similares, esta relação pode ser utilizada. Assim, comparou-se os valores médios de SIR obtidos antes e depois do aumento no SIR de Aceitação, sob 4% de probabilidade de bloqueio, com as respectivos números médio de usuários dos algoritmos, a fim de confirmar a relação (4.10) e validar os resultados. As tabelas 4.12 e 4.13 apresentam os resultados.

Algoritmo	número médio de usuários ativos (máx. capacidade)	número médio de usuários ativos (equalizado)	diferença (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	1610	1458	-9,4
Randômico (RANDOM):	1802	1278	-29,1
Melhor Preço (PREÇO):	2051	1362	-33,6
"Channel Segregation" (CHANSG)	1760	1240	-29,5
Partição de Reuso (RUP)	2614	1646	-37,0

Tabela 4.12: Diferenças do número médio de usuários ativos entre as condições de máxima capacidade e com equalização, medidas obtidas a 4% de probabilidade de bloqueio.

Algoritmo	SIR médio condição de máxima capacidade ²⁴ (dB)	SIR médio condição com equalização (dB)	diferença teórica (4.10) (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	28,3	29,4	-11,9
Randômico (RANDOM):	24,5	27,5	-29,3
Melhor Preço (PREÇO):	22,4	25,0	-25,9
"Channel Segregation" (CHANSG)	25,3	28,5	-30,9
Partição de Reuso (RUP)	21,3	25,1	-35,5

Tabela 4.13: Diferenças teóricas esperadas entre as condições de máxima capacidade e com equalização, a partir da relação (4.10), medidas obtidas a 4% de probabilidade de bloqueio.

As tabelas 4.12 e 4.13 mostram que os resultados obtidos estão em pleno acordo com a aproximação teórica do item 3.2.4.1. Inclusive, os resultados obtidos na simulação demonstram que as aproximações utilizadas no item 3.2.4 são aproximações válidas.

As discrepâncias entre os valores teóricos e obtidos na simulação podem ser explicadas ao observar que a formulação do item 3.2.4.1 não considera a possibilidade de "intracell handoffs" e queda de chamadas. Os valores de SIR médio obtidos consideram somente chamadas completadas com sucesso. Como o algoritmo PREÇO possuía uma probabilidade de queda de chamadas maior no caso de máxima capacidade do que no caso equalizado, o SIR médio no caso de máxima capacidade mostrou um valor ligeiramente mais alto devido à queda de chamadas com baixo SIR. Sob outro ponto de vista, pode-se encarar que a maior queda de chamadas força o sistema para um outro estado de troncalização, pois mais chamadas novas são aceitas. Assim, as comparações teóricas de variação de capacidade devem ser feitas preferencialmente em condições de menor probabilidade de queda de chamadas.

4.2.3.5.2. Comparação com Resultados Apresentados na Literatura

Comparou-se o desempenho dos algoritmos simulados aqui com resultados de desempenho relatados na literatura. Dada a alta dependência dos resultados com

²⁴ resultados extraídos da figura 4.10.

o cenário simulado, comparou-se somente trabalhos da literatura que tenham simulado algoritmo e cenário parecidos aos simulados neste trabalho.

Ishikawa [62] simulou o algoritmo CHANSG em cenário bem parecido ao simulado neste trabalho encontrando 40% de ganho de capacidade sobre o algoritmo FCA respectivamente. O resultado de ganho obtido por Ishikawa foi superior ao aqui encontrado provavelmente porque o mesmo não considerou a equalização da qualidade, considerando somente a equalização de probabilidade de queda (vide fig. 11 na referência [62]).

Conforme mencionado no item 4.1.1.6, o algoritmo RUP simulado neste trabalho segue o mesmo algoritmo apresentado por Takenaka em [64]. Se a comparação for feita com o algoritmo RUP equalizado, a capacidade encontrada (8,9 Erlangs/célula, 70% de ganho sobre o FCA) é bem inferior à encontrada por Takenaka (14 Erlangs/célula, 150% de ganho sobre o FCA). Embora Takenaka tenha considerado 70 canais e 7 células no conjunto de células interferentes da mesma forma que aqui, seu cenário teve características que podem justificar a diferença no ganho. Além disso, Takenaka não mencionou aspectos de qualidade ou equalização da mesma em seu trabalho, mencionando somente que o SIR de Aceitação tinha sido ajustado para oferecer uma probabilidade de queda por "intracell handoff" de 0,5%. Dado que o algoritmo RUP aqui simulado estava com baixa probabilidade de queda por falha devido à "intracell handoff" (vide tabela 4.6), o resultado obtido na condição de máxima capacidade (vide tabela 4.5) pode ser comparado com o resultado de Takenaka [64], chegando-se ao mesmo resultado. Entretanto, é necessário simular na mesma condição que Takenaka para confirmar a validação.

4.2.4. Resumo das Observações

Ao aumentar o SIR de Aceitação, aumenta-se diretamente o SIR no momento de alocação das chamadas, e por sua vez aumenta-se o SIR médio resultante das chamadas, aumentando a qualidade das mesmas.

O aumento do SIR de alocação das chamadas implica também em alocar usuários que utilizam o mesmo canal mais afastados geograficamente. Tal afastamento piora a compactação da alocação no canal, degradando a capacidade do sistema.

Mantendo-se o SIR mínimo, o aumento do SIR de alocação de chamadas gera uma margem de SIR para as mesmas, permitindo que elas sejam mais resistentes às perturbações de sinais interferentes. Tal margem causa a redução na probabilidade de ocorrência de "intracell handoffs", causando por sua vez um decréscimo no número médio de "intracell handoffs" por chamada. Como a probabilidade de queda é diretamente afetada pela probabilidade de ocorrência de "intracell handoff", o aumento de SIR de aceitação causa a redução na probabilidade de queda, aumentando a estabilidade do sistema. Este compromisso entre capacidade e estabilidade do sistema também foi reconhecida por [11].

Levando-se em consideração medidas como qualidade e estabilidade, pode-se avaliar melhor o ganho de capacidade de algoritmos DCA adaptativos à interferência sem controle de potência.

O ganho de capacidade encontrado na situação de máxima capacidade superestimava o desempenho de algoritmos DCA. Considerando o mesmo nível "SIR_10%" e probabilidade de queda aproximadamente igual a 2%, os algoritmos DCA alcançaram ganhos variando de 29% a 70%, dentro dos intervalos teóricos, sendo que o algoritmo RUP foi o que forneceu o melhor ganho de capacidade (70%).

O compromisso entre SIR das chamadas e ganho de capacidade devido à adaptabilidade à interferência pode ser facilmente verificado através da formulação (4.10). Tais resultados validam as aproximações feitas no item 3.2.4 e os resultados obtidos nas simulações. Verificou-se ainda que os ganhos de capacidade sobre o FCA obtidos estão dentro dos limites teóricos. Além disso, os resultados encontrados estão na mesma ordem de grandeza que os resultados encontrados em outros trabalhos na literatura.

4.3. Análise quanto a Forma de Uso do Canal: Controle de Potência

O Controle de Potência permite que TMs próximos à ERB possam reduzir sua potência de transmissão com o intuito de evitar interferência excessiva em outras chamadas na rede. Além disso, o controle de potência reduz a qualidade excessiva das chamadas em andamento. Os algoritmos DCA tiram proveito desta redução, trocando qualidade excessiva por capacidade adicional.

Os resultados obtidos no item 4.2 consideraram que todos os TMs e todas as ERBs estavam sempre transmitindo à sua máxima potência. Este item tem como objetivo analisar o efeito da aplicação do controle de potência nos algoritmos DCA considerados.

O item 4.3.1 descreve melhor como foi o modelo de controle de potência utilizado. No item 4.3.2. se analisa o efeito isolado do controle de potência nos algoritmos DCA-AI; nesta análise se confrontarão resultados de simulações onde a única modificação foi o controle de potência. Dessa forma, pode-se analisar o efeito exclusivo do controle de potência em cada algoritmo. O item 4.3.3. irá comparar o desempenho dos algoritmos DCA-AI entre si, permitindo observar como o controle de potência mudou a relação entre os mesmos.

O item 4.3.4. analisa o ganho de capacidade que os algoritmos DCA-AI oferecem sobre o algoritmo FCA, considerando-se os aspectos de estabilidade e qualidade das chamadas. Os resultados para a condição de máxima capacidade também serão apresentados para fins ilustrativos.

Concluindo a análise, comparam-se os resultados com a análise teórica e com trabalhos já publicados na literatura no item 4.3.5.

O cenário de simulação foi o mesmo utilizado para obtenção dos resultados do item 4.2, descritos no item 4.1.2. A única diferença entre as simulações é a utilização do controle de potência. As medidas de desempenho utilizadas também foram as mesmas descritas no item 4.1.3.

4.3.1. Detalhes do Controle de Potência Simulado

Dentre os diversos tipos de controle de potência, foi simulado o controle de potência que considera o nível de potência de recepção constante. Conforme explicado no item 3.2.3.1, este tipo de controle de potência compensa a atenuação entre ERB e TM, mantendo o nível de potência de recepção constante em um determinado valor previamente acertado no sistema. O controle de potência foi aplicado em ambos os sentidos do canal.

Nas simulações, foi considerado que o TM e a ERB estariam transmitindo à potência máxima quando o TM estivesse operando na fronteira da região de cobertura da ERB. Esta potência foi a mesma utilizada nas simulações do caso sem controle de potência.

Dessa forma, o nível de recepção constante foi fixado em um valor que correspondia ao nível de recepção quando o TM estivesse localizado na fronteira da célula e transmitindo à máxima potência. Este valor era bem acima do nível de ruído térmico (76dB acima). À medida que o TM se aproxima da ERB, sua potência de transmissão diminui gradativamente, mantendo sempre o nível de recepção constante. Assim, sua potência de transmissão será sempre igual ou inferior à potência de transmissão utilizada no caso sem controle de potência. A figura 4.18 auxilia o entendimento.

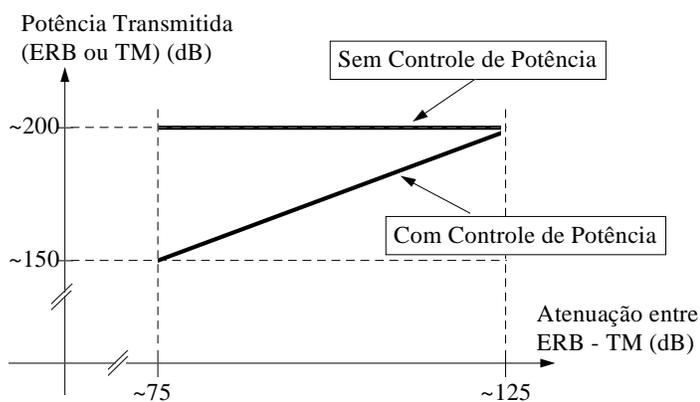


Fig. 4.18 - Variação da potência transmitida nas simulações de controle de potência.

Conforme mostrado na figura 4.18, o intervalo de variação do controle de potência é de aproximadamente 50dB, que corresponde também à diferença entre a atenuação máxima e mínima utilizada dentro de uma célula simulada típica. Ao utilizar níveis de potência bem acima do nível de ruído térmico, garante-se que o sistema ainda continue limitado pela interferência.

4.3.2. Efeito do Controle de Potência

A fim de verificar o efeito isolado do controle de potência, deve-se comparar o desempenho dos algoritmos DCA-AI antes e depois da aplicação do controle de potência. Para que outros fatores não influenciem no resultado, a comparação foi feita sob o mesmo tráfego gerado e sob os mesmos parâmetros de simulação.

Os algoritmos FCA e DCA-AI foram simulados na condição de máxima capacidade pois os parâmetros de SIR de Aceitação devem ser os mesmos também.

A tabela 4.14 apresenta os resultados das simulações nestas condições. A comparação de cada algoritmo foi feita sob níveis de tráfego não necessariamente iguais. Portanto, comparações entre algoritmos não podem ser feitas através desta tabela.

Algoritmo	tráfego gerado (Erl)	prob. de bloqueio (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
FCA							
NPC ²⁵	1220	5,9	1,9	6,0	0,06	28,4	28,4
BPC ²⁶	1220	6,1	0,9	7,7	0,08	25,2	25,2
Melhor Qualidade (QUAL)							
NPC	3100	18,1	3,7	7,7	0,05	26,1	26,1
BPC	3100	5,1	7,7	40,4	0,86	19,4	19,6
Randômico (RANDOM)							
NPC	3100	13,7	7,7	32,4	0,58	23,6	23,7
BPC	3100	3,9	8,6	48,9	1,31	18,9	18,9
Melhor Preço (PREÇO)							
NPC	3100	10,8	10,4	53,0	2,16	22,2	22,3
BPC	3100	2,9	10,1	59,2	2,17	18,5	18,4
"Channel Segregation" (CHANSG)							
NPC	3100	15,2	7,0	21,4	0,30	24,2	24,3
BPC	3100	4,0	8,3	47,5	1,22	19,0	19,0
Partição de Reuso (RUP)							
NPC	3100	6,9	3,2	32,3	0,55	21,1	21,1
BPC	3100	3,5	7,6	49,6	1,32	18,8	18,9

tabela 4.14 - efeito da introdução do controle de potência nos algoritmos FCA e DCA-AI.

Baseado nos resultados da tabela 4.14, pode-se observar que o controle de potência permitiu a redução da probabilidade de bloqueio em todos os algoritmos DCA-AI. Por outro lado, a probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff" e a probabilidade de queda de chamadas por falha em "intracell handoff" aumentou consideravelmente na maioria deles.

Pode-se observar que todos os algoritmos tiveram seu nível de qualidade médio (SIR médio) reduzido. Observe que, apesar do controle de potência reduzir o nível da potência interferente entre chamadas utilizando o mesmo canal, o nível de

²⁵ caso sem controle de potência

²⁶ caso com controle de potência

signal desejado também diminui, podendo diminuir inclusive em até 50 dB. O controle de potência portanto evita chamadas com SIRs excessivos, reduzindo a média dos SIRs.

Embora as chamadas gerem menos potência interferente, as mesmas ficam mais susceptíveis à interferência pois o seu nível de SIR em média é menor do que no caso sem controle de potência, diminuindo a sua proteção. Caso o número médio de usuários interferentes se mantivesse o mesmo, a perda na margem de SIR não impactaria tanto, conforme pode ser visto nas medidas de estabilidade para o algoritmo FCA na tabela 4.14.

Entretanto, a menor potência interferente facilita a alocação de novas chamadas em sistemas DCA-AI. A fim de entender melhor o porquê deste efeito, observe que um TM operando em uma célula em um sistema sem controle de potência dificulta a alocação de qualquer outro TM em uma de suas células vizinhas, independentemente de sua localização relativa à ERB (vide figura 4.19-a).

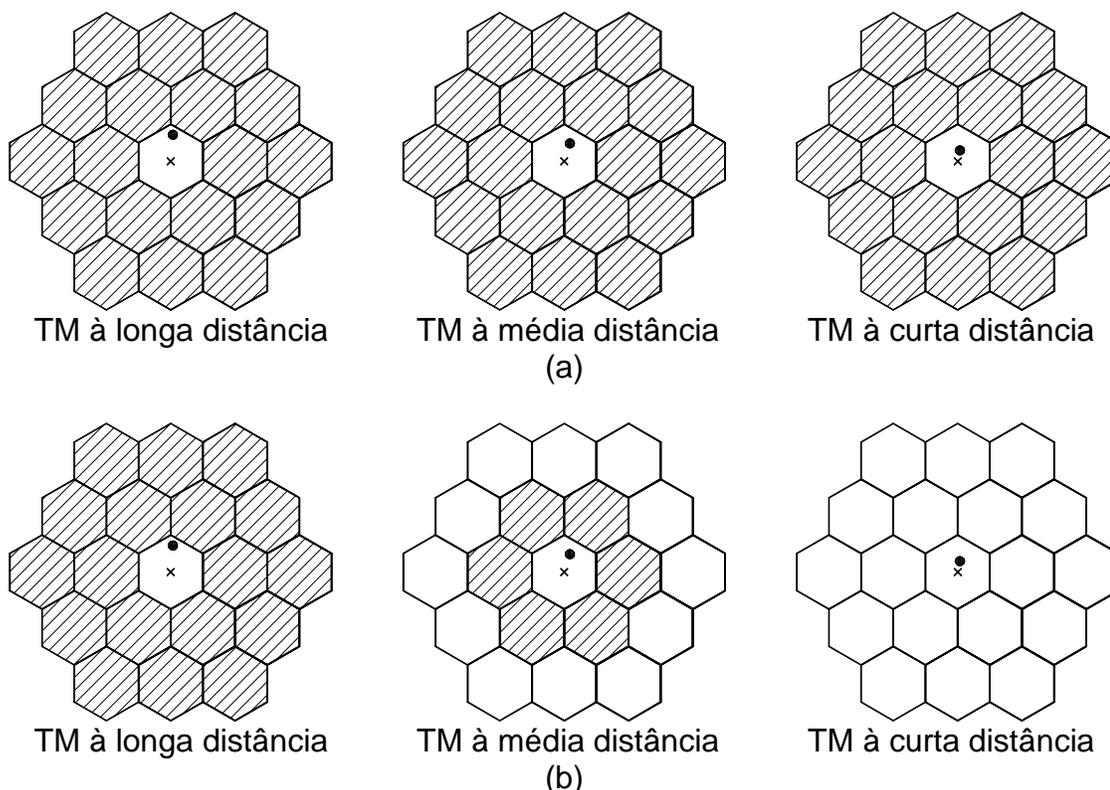


Fig. 4.19 - Controle de Potência permitindo menor probabilidade de bloqueio.

Hexágono central sendo usado por ERB ("x") e TM ("•").

Hexágonos tracejados: sem permissão para reutilizar mesmo canal.

Hexágonos em branco: com permissão para reutilizar mesmo canal.

(a): Sistema sem controle de potência.

(b): Sistema com controle de potência.

Em um sistema celular com controle de potência, o mesmo efeito somente ocorrerá se o TM estiver operando na fronteira da célula. Se o mesmo estiver operando à meia distância da ERB, somente as células mais próximas terão dificuldade de alocação; e se o mesmo estiver operando próximo à ERB, praticamente não haverá empecilho à alocação de chamadas nas ERB vizinhas (vide figura 4.19-b).

Note ainda no exemplo da figura 4.19, que o fato do controle de potência permitir a alocação da chamada não garante que a mesma não irá gerar interferência excessiva na chamada em andamento na célula central.

O algoritmo FCA não consegue se aproveitar da menor potência interferente para melhorar sua capacidade devido à divisão rígida dos canais baseada no pior caso. Portanto sua probabilidade de bloqueio praticamente se manteve a mesma, piorando ligeiramente, provavelmente devido à maior influência do desvanecimento lognormal dificultando o aparecimento de algumas chamadas.

Os algoritmos DCA-AI conseguem tirar proveito da menor potência interferente para alocar mais chamadas. Note na tabela 4.14 que todos os algoritmos DCA-AI tiveram suas probabilidades de bloqueio bastante reduzidas.

O maior fluxo de entrada de novas chamadas combinados com o menor SIR das chamadas provoca um aumento considerável na probabilidade das chamadas sofrerem interferência excessiva, forçando-as a "intracell handoffs". Note na tabela 4.14 que todos os algoritmos tiveram aumento na probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff". O algoritmo PREÇO foi o menos penalizado com o controle de potência em sua probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" dado que mesmo sem controle de potência suas chamadas já possuíam pouca margem de SIR. Pela mesma razão, justifica-se o comportamento desta medida de desempenho nos outros algoritmos. Note que a estabilidade do algoritmo QUAL sofre bastante com a introdução do controle de potência no sistema, tendo sua probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" passando de 7,7% para 40,4% na situação simulada. Além do fato do algoritmo estar aceitando muito mais chamadas (vide probabilidade de bloqueio do algoritmo QUAL), suas chamadas não mais possuem a grande margem de SIR que estava presente no caso sem controle de potência.

A probabilidade de queda de chamadas devido a falha no "intracell handoff" também aumentou na maioria dos algoritmos DCA-AI. O algoritmo PREÇO foi o único que se manteve praticamente no mesmo nível de probabilidade de queda de

chamadas; devido ao menor impacto do controle de potência na probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff". O aumento na probabilidade de queda das chamadas é principalmente devido ao maior fluxo de chamadas em "intracell handoff". Note que a menor potência interferente também beneficia a realocação de uma chamada em "intracell handoff", entretanto, embora a chance de uma chamada não encontrar um canal disponível tenha caído pela redução da potência interferente, a maior incidência de "intracell handoffs" provoca o aparecimento de mais quedas. Note também que a maior probabilidade de queda beneficia o surgimento de novas chamadas, diminuindo a probabilidade de bloqueio. Isto ilustra a forte dependência entre as medidas de desempenho.

Pode-se observar na tabela 4.14 que o algoritmo RUP foi o que menos se beneficiou com a utilização do controle de potência. O efeito do controle de potência na probabilidade de bloqueio foi bem menor que nos outros algoritmos. Este comportamento pode ser verificado em outros tráfegos gerados (por exemplo: a 3800 Erlangs, a probabilidade de bloqueio sem controle de potência foi de 12,5%, reduzindo para 10% com controle de potência). Tal comportamento pode ser explicado através da teoria de algoritmos RUP ideais. Conforme verificado no trabalho de Serizawa [19], em um sistema com algoritmo RUP operando na condição ideal, todos os TMs que utilizam um determinado canal estão à mesma distância da ERB. Dessa forma, dado que o controle de potência compensa a atenuação entre TM e ERB e considerando que os TMs deste canal estariam sofrendo a mesma atenuação, todos os usuários estariam transmitindo à mesma potência; assim, o SIR fica independente da potência transmitida, da mesma forma que no caso sem controle de potência. A característica distribuída do algoritmo RUP simulado e a aleatoriedade de surgimento das chamadas nas diversas células do sistema não permitem que os canais estejam nesta condição ideal. Entretanto, o algoritmo RUP simulado procura se aproximar desta condição, justificando a pequena diferença entre o algoritmo sem e com controle de potência.

Os histogramas de SIR médio e SIR de alocação de chamadas antes e após a aplicação do controle de potência, sob o mesmo tráfego, foram obtidos e estão apresentados na figura 4.20. Mostram-se somente os histogramas de SIR no sentido TM-ERB pois os histogramas para o sentido ERB-TM são bem semelhantes.

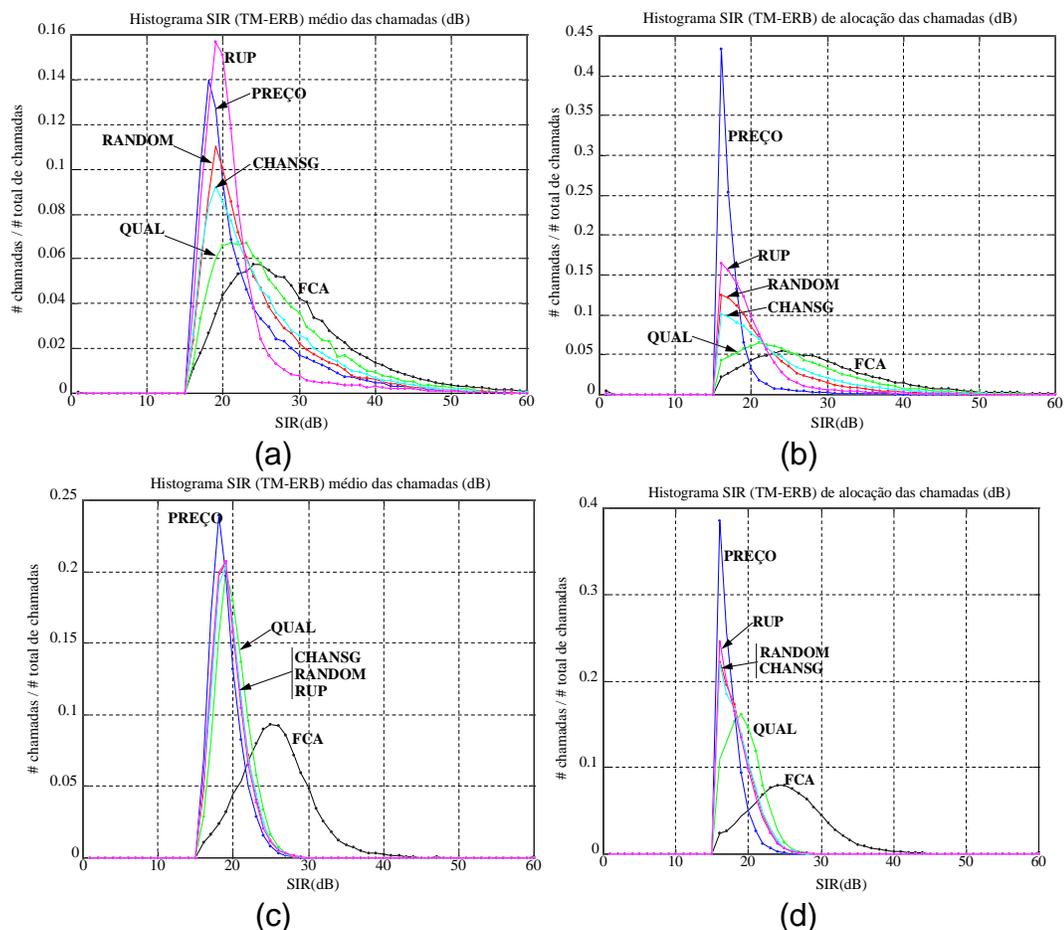


Fig. 4.20 Histogramas de SIR antes e após a aplicação do controle de potência, sob o mesmo tráfego.

- (a): Histograma de SIR médio de algoritmos sem controle de potência;
- (b): Histograma de SIR de alocação de algoritmos sem controle de potência;
- (c): Histograma de SIR médio de algoritmos com controle de potência;
- (d): Histograma de SIR de alocação de algoritmos com controle de potência;

Ao comparar os histogramas de SIR médio antes e depois da aplicação do controle de potência (figuras 4.20-a e 4.20-c respectivamente), pode-se observar a diminuição na quantidade de chamadas com SIR muito grande. Enquanto no caso sem controle de potência os níveis SIR das chamadas podiam chegar a 50dB, ao utilizar o controle de potência, os níveis SIR dificilmente ultrapassam 30dB. Além disso, pode-se observar uma grande concentração nos histogramas de SIR entre 15dB e 25dB.

A grande concentração dos histogramas de SIR de alocação (figuras 4.20-b e 4.20-d) em níveis próximos ao nível de SIR mínimo explica a maior probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" nos algoritmos com controle de potência. A ausência de níveis de SIR excessivos confirmam a redução do nível de sinal desejado causada pelo controle de potência.

4.3.3. Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-AI

Conforme ilustrado nos itens 3.1.4 e 3.2.4, o desempenho dos algoritmos DCA-AI variam muito com a variação dos parâmetros de simulação. Assim, os desempenhos entre algoritmos DCA-AI são melhor comparados sob condições de simulação idênticas, diferindo somente o algoritmo em si. A tabela 4.15 apresenta resultados dos algoritmos DCA-AI com controle de potência simulados sob o mesmo tráfego, permitindo a comparação.

Algoritmo	prob. de bloqueio (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
QUAL-BPC	5,1	7,7	40,4	0,86	19,4	19,6
RANDOM-BPC	3,9	8,6	48,9	1,31	18,9	18,9
PREÇO-BPC	2,9	10,1	59,2	2,17	18,5	18,4
CHANSO-BPC	4,0	8,3	47,5	1,22	19,0	19,0
RUP-BPC	3,5	7,6	49,6	1,32	18,8	18,9

Tabela 4.15 - Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-AI sob o mesmo tráfego gerado (3100 Erlangs).

Pode-se verificar na tabela 4.15 que o desempenho relativo entre algoritmos DCA-AI observado no caso sem controle de potência (vide item 4.2) não se repetiu. Os algoritmos DCA-AI com controle de potência possuem desempenho semelhante em muitas medidas de desempenho. O algoritmo PREÇO foi o que forneceu a menor probabilidade de bloqueio, mas também foi o que forneceu a maior instabilidade. O algoritmo QUAL mostrou novamente comportamento em extremo oposto ao algoritmo PREÇO, oferecendo uma probabilidade de bloqueio e estabilidade ligeiramente superiores. Os algoritmos RANDOM, RUP e CHANSO mostraram praticamente desempenhos iguais, com ligeira vantagem para o algoritmo RUP.

Este resultado é um resultado importante pois sugere que algoritmos mais simples como os algoritmos RANDOM e QUAL possam ser utilizados com desempenhos próximos ao de algoritmos mais complexos, como os algoritmos RUP ou CHANSO.

4.3.4. Análise de Capacidade

Da mesma forma que na análise sem controle de potência efetuada no item 4.2, a fim de verificar a aplicação das conclusões já tomadas para o caso com controle de potência, analisou-se o impacto do uso de controle de potência com diferentes limiares de SIR de aceitação de novas chamadas.

Assim, simularam-se os algoritmos com SIRs de Aceitação de novas chamadas ("SIR_Aceit") e de chamadas em "intracell handoff" ("SIR_Intraho") iguais ao SIR mínimo (15dB) (condição de máxima capacidade) e posteriormente aumentou-se o nível SIR de aceitação. A margem entre os SIRs de Aceitação e o SIR mínimo foi aumentada gradativamente até se igualar o nível "SIR_10%" e reduzir a probabilidade de queda resultante entre todos os algoritmos DCA e FCA (condição de equalização). O valor dos níveis de SIR de Aceitação para conseguir a equalização resultaram iguais a 19dB para cada um dos algoritmos. Neste nível, cada algoritmo DCA conseguiu aproximadamente 3% ou menos de probabilidade de queda com o mesmo nível "SIR_10%" que o algoritmo FCA.

4.3.4.1. Probabilidade de Bloqueio

A capacidade adicional que os algoritmos DCA equalizados possuem sobre o algoritmo FCA pode ser obtida através da análise de probabilidade de bloqueio. Posteriormente, serão verificadas as outras medidas de performance na situação equalizada.

Com os algoritmos equalizados, a probabilidade de bloqueio indica a capacidade dos algoritmos ao considerar o tráfego cursado por cada um deles à mesma probabilidade de bloqueio. A figura 4.21 ilustra a probabilidade de bloqueio encontrada por cada algoritmo, em diversos tráfegos gerados, nas condições de máxima capacidade e de equalização.

Pode-se observar pela figura 4.21 que os algoritmos DCA mostraram comportamento bem semelhante entre si, tanto no caso de máxima capacidade como no caso equalizado; confirmando a conclusão do item 4.3.3.

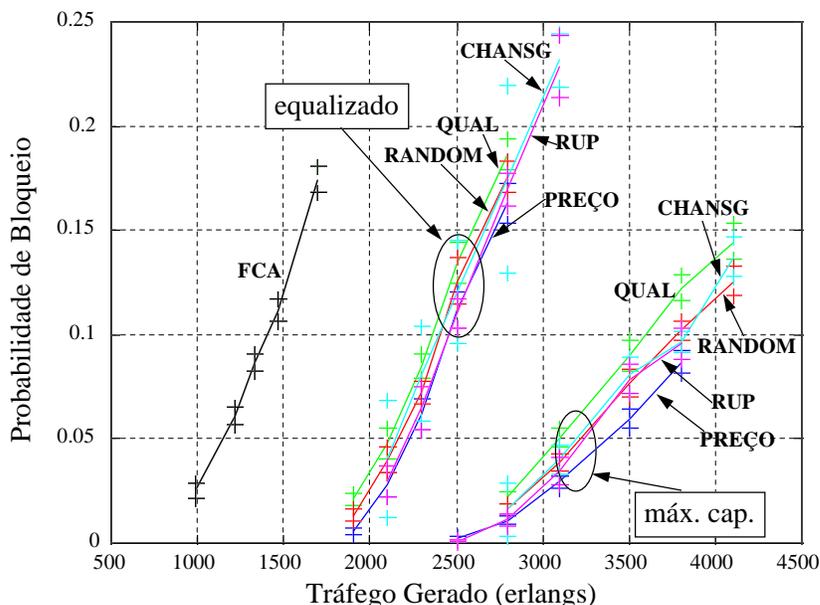


Fig. 4.21 - Probabilidade de bloqueio de novas chamadas para algoritmos operando com controle de potência nas condições de máxima capacidade e de equalização.

Se estabilidade e qualidade das chamadas não fossem consideradas na análise, a condição de máxima capacidade forneceria o ganho de capacidade com relação à capacidade do FCA. Através da figura 4.21, pode-se verificar ganhos de capacidade variando de 170% (algoritmo QUAL) a 195% (algoritmo PREÇO). Entretanto, conforme já explicado, estes valores não podem ser utilizados, devendo ser considerados os ganhos de capacidade na condição equalizada. A tabela 4.16 apresenta os ganhos de capacidade resultante em cada algoritmo.

Algoritmo	ganho de capacidade sobre FCA (a 5% de prob. bloqueio) (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	84
Randômico (RANDOM):	86
Melhor Preço (PREÇO):	94
"Channel Segregation" - (CHANSG):	88
Partição de Reuso - (RUP)	92

Tabela 4.16 - Ganhos de capacidade de algoritmos DCA-AI sobre algoritmo FCA na condição equalizada, em sistema operando com controle de potência.

Conforme esperado, o aumento nos níveis de SIR de Aceitação reduziu os ganhos de capacidade obtidos para a faixa de 80% a 95%. Mesmo na condição equalizada, os ganhos de capacidade foram maiores que os encontrados na condição equalizada sem controle de potência. Conforme explicado no item 4.3.2, os algoritmos DCA conseguem alocar mais chamadas devido ao menor nível de

interferência gerada pelas chamadas ativas; entretanto a distribuição fixa de canais do algoritmo FCA não o permite tirar o mesmo proveito, justificando o aumento de ganho.

Pode-se observar na figura 4.21 que a redução do ganho de capacidade sobre o FCA com o aumento dos níveis de SIR de Aceitação foi semelhante em todos os algoritmos. A redução foi de aproximadamente 33%, sendo aproximadamente semelhante à redução encontrada no caso sem controle de potência, onde os algoritmos também tiveram seus ganhos reduzidos em 1/3 quando o nível de SIR de Aceitação sofria um aumento de 4dB. Assim, pode-se concluir que os níveis de SIR de aceitação representam um parâmetro que atua diretamente na capacidade do algoritmo tanto no caso sem controle de potência como no caso com controle de potência. Conforme anteriormente explicado, o maior nível de SIR de Aceitação força o aumento do menor SIR necessário para alocação de chamadas, incentivando a alocação de TMs co-canais mais espaçados entre si, atrapalhando a compactação do canal.

Os histogramas, as medidas de qualidade e as medidas de estabilidade apresentados a seguir auxiliam no entendimento e complementam a análise.

4.3.4.2. Qualidade das Chamadas

As figuras 4.22 e 4.23 apresentam o histograma do SIR das chamadas para cada algoritmo quando os mesmos estão operando em condição próxima de 5% de probabilidade de bloqueio. Mostram-se somente os histogramas de SIR no sentido TM - ERB pois os histogramas para o sentido ERB- TM são bem semelhantes. Mostram-se tanto o caso de máxima capacidade quanto o caso equalizado para permitir um melhor entendimento.

Ao observar os histogramas de SIR das figuras 4.22 e 4.23, pode-se observar que existe concentração dos SIRs em todos os algoritmos DCA-AI. A alta concentração dos SIRs é causada pela introdução do controle de potência, pois o mesmo evita o surgimento de níveis de SIR excessivos. A similaridade entre os histogramas de SIR mostra que não existe diferença significativa entre os canais escolhidos pelos algoritmos. Por exemplo, mesmo que o algoritmo QUAL escolha o canal de melhor SIR, este SIR tem boas chances de ser igual ou pior ao SIR que

normalmente seria escolhido pelo algoritmo RANDOM. Dessa forma, os algoritmos tendem a um desempenho semelhante entre si.

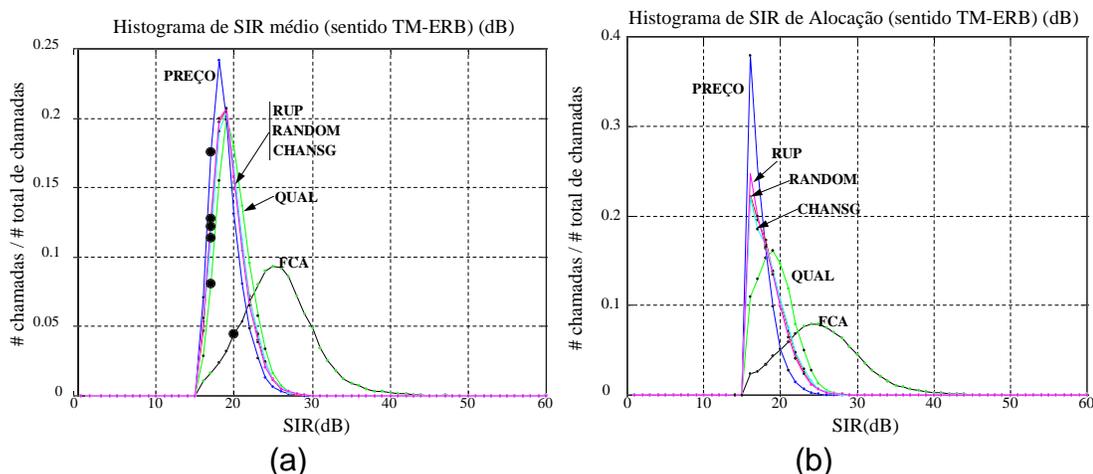


Fig. 4.22 - Histogramas para condição de máxima capacidade com algoritmos com controle de potência operando a 5% de probabilidade de bloqueio.

(a): Histograma de SIR médio das chamadas;
 (b): Histograma de SIR de alocação das chamadas

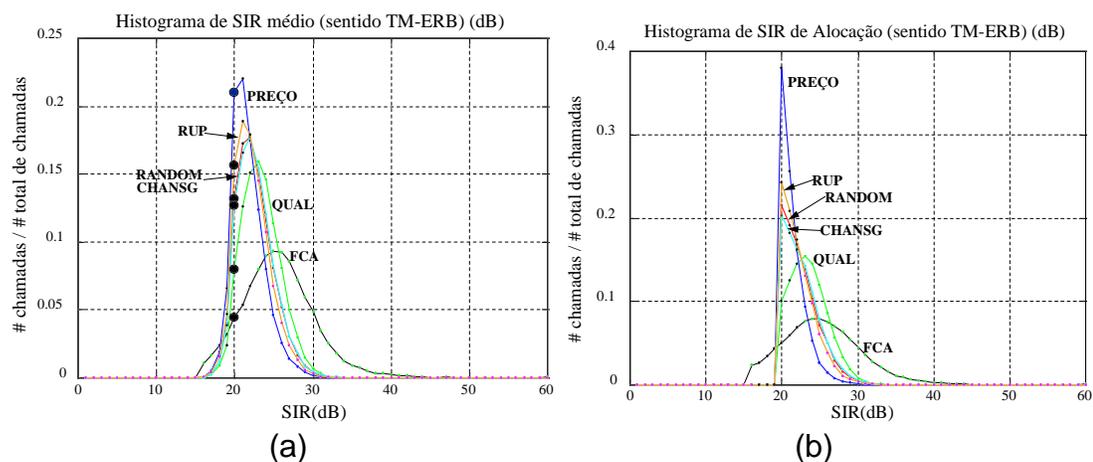


Fig. 4.23 - Histogramas para condição equalizada com algoritmos com controle de potência operando a 5% de probabilidade de bloqueio.

(a): Histograma de SIR médio das chamadas;
 (b): Histograma de SIR de alocação das chamadas

O histograma de SIR médio para o caso de máxima capacidade no SIR de aceitação também mostra o nível "SIR_{10%}" alcançado por cada algoritmo. O histograma claramente indica a grande diferença existente entre os níveis "SIR_{10%}" resultante nos algoritmos DCA e no algoritmo FCA, confirmando a necessidade de equalização. A figura 4.23-a) mostra o histograma de SIR médio na condição equalizada, mostrando que os níveis "SIR_{10%}" estavam equalizados. Ao comparar

os histogramas de SIR médio das figuras 4.22-a) e 4.23-a), pode-se observar ainda que a equalização provocou um aumento no SIR médio das chamadas em todos os algoritmos DCA-AI, passando de valores variando de 18,5 dB a 19,5dB para valores variando de 21 a 23 dB; entretanto estes níveis de SIR médio continuam bem inferiores ao nível encontrado no algoritmo FCA (25,5dB).

4.3.4.3. Estabilidade

As medidas de estabilidade mencionadas no item 4.1.3 foram obtidas em ambas as condições de máxima capacidade e equalização. A figura 4.24 ilustra a probabilidade de queda de chamadas devido à falha de "intracell handoff" nos diversos algoritmos em ambas as condições.

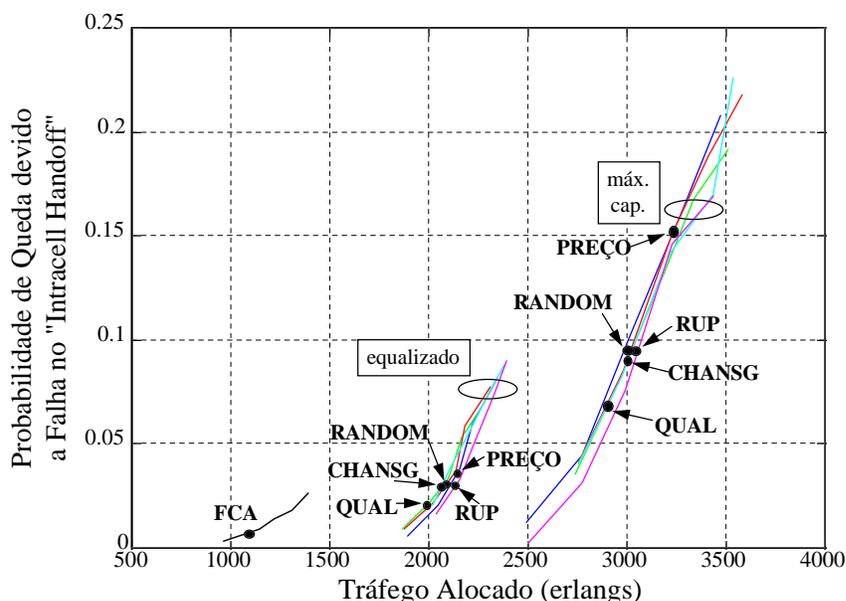


figura 4.24 - Probabilidade de queda de chamadas em "intracell handoff" para algoritmos com controle de potência na condição de máxima capacidade e na condição equalizada.

Observando a figura 4.24, pode-se verificar que, enquanto o algoritmo FCA possuiu probabilidade de queda inferior a 1% quando operando a 5% de probabilidade de bloqueio, os algoritmos DCA, operando na condição de máxima capacidade, tiveram probabilidade de queda aproximadamente igual a 9%, com o algoritmo PREÇO tendo uma probabilidade de queda superior a 15% e QUAL com a menor probabilidade de queda, igual a 7%. Esta instabilidade justifica novamente a

necessidade de equalização dos algoritmos. A figura 4.24 mostra que a equalização conseguiu reduzir a probabilidade de queda para níveis aceitáveis variando de 2% a 3% quando operando a 5% de probabilidade de bloqueio.

As figuras 4.25 e 4.26 apresentam a probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff" e o número médio de "intracell handoff" por chamada resultante na condição de máxima capacidade e na condição equalizada.

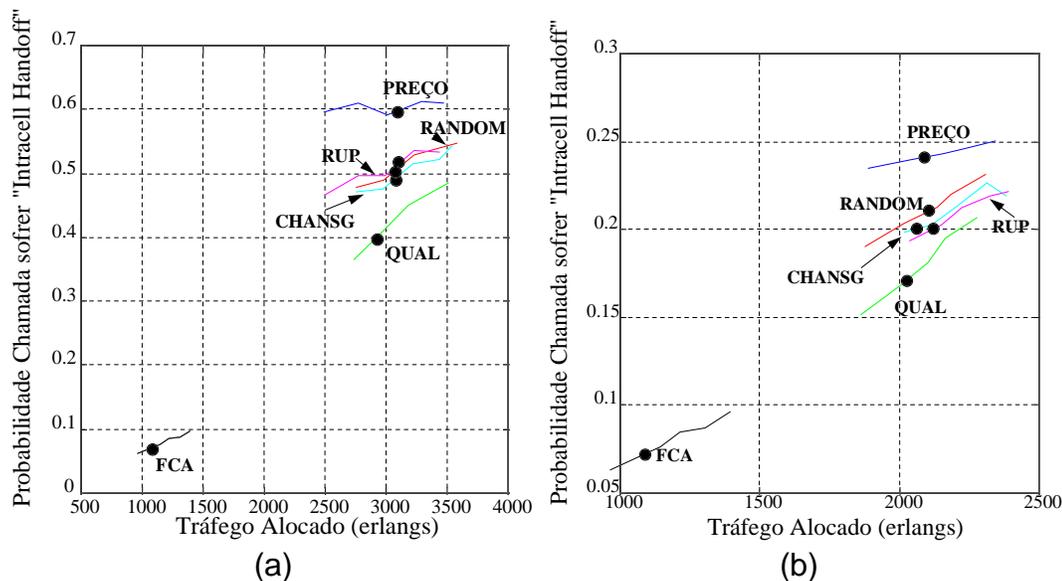


figura 4.25 - Probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" para algoritmos com controle de potência. (a): condição de máxima capacidade; (b): condição equalizada.

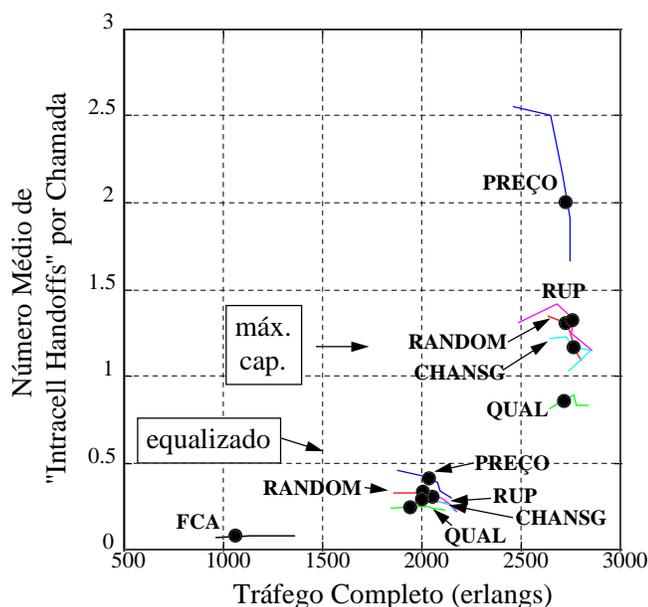


figura 4.26 - número médio de "intracell handoffs" por chamada para algoritmos com controle de potência na condição de máxima capacidade e na condição equalizada.

Observando a figura 4.25-a), pode-se verificar que os algoritmos DCA com controle de potência na condição de máxima capacidade apresentam alta probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff", com probabilidades superiores a 40%, enquanto o algoritmo FCA mostrou aproximadamente 8%. Esta alta probabilidade causa altos valores para o número médio de "intracell handoff" por chamada, variando de 0,8 "intracell handoffs" por chamada para o algoritmo QUAL a até 2 "intracell handoff" por chamada no algoritmo PREÇO.

Ao equalizar os algoritmos, a probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" reduz para valores variando de 17% a 25%, onde o algoritmo QUAL foi o algoritmo mais estável.

Conforme já explicado no item 4.3.2., os altos valores de probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" e as conseqüentes altas taxas de "intracell handoff" por chamada podem ser justificadas pela alta concentração de SIR próximo ao mínimo SIR nos histogramas de SIR de alocação (figura 4.23-b).

Pode-se ainda notar na figura 4.26, nas curvas de número médio de "intracell handoffs" por chamada, um início de queda das curvas em altos níveis de tráfego. Conforme visto no item 4.1.3, o número médio de "intracell handoffs" por chamada é computado somente para as chamadas que se completaram com sucesso. Ao aumentar o tráfego, a maior probabilidade de queda de chamadas devido a "intracell handoff" faz com que chamadas que efetuem muitos "intracell handoffs" terminem por cair e não são computadas na medida.

4.3.5. Validação dos Resultados

4.3.5.1. Validação Teórica

Será aplicada a relação (3.34) (vide item 3.2.4.3) a fim de verificar se os resultados obtidos estão dentro dos limites teóricos.

A tabela 4.17 apresenta os dados para cálculo e os resultados para cada um dos algoritmos DCA-AI considerados²⁷:

²⁷ os valores apresentados na tabela 4.11 se referem a valores obtidos sob o tráfego que gera 5% de probabilidade de bloqueio em cada algoritmo.

Algoritmo	Média do SIR médio (dB)	nível SIR_10% (dB)	Ne^{28}	limite inferior²⁹ $\frac{Cm_{DCA-AI}}{Cm_{FCA}}$	limite superior $\frac{Cm_{DCA-AI}}{Cm_{FCA}}$
FCA	25,3	20	-	-	-
Melhor Qualidade (QUAL):	22,8	20	5,24	0,64	1,99
Randômico (RANDOM):	21,9	20	4,73	0,71	2,20
Melhor Preço (PREÇO):	21,3	20	4,41	0,76	2,36
"Channel Segregation" (CHANSG)	21,9	20	4,73	0,71	2,20
Partição de Reuso (RUP)	21,8	20	4,67	0,72	2,23

Tabela 4.17 - Limites Teóricos para algoritmos DCA-AI com controle de potência simulados.

Ao subtrair 1 (um) de cada um dos limites da tabela 4.17 obtém-se os limites de ganho de capacidade em porcentagem, podendo-se observar que os resultados apresentados na tabela 4.16 estão dentro dos limites teóricos.

Utilizando a formulação teórica desenvolvida em 3.2.4 e 4.2.3.5.1, pode-se confirmar a variação do número médio de chamadas em andamento em cada algoritmo DCA através da análise da variação do SIR médio de cada um deles. A tabela 4.18 apresenta a variação obtida nas simulações e a tabela 4.19 apresenta qual a variação que seria esperada através da análise teórica nos níveis de SIR obtidos.

Algoritmo	número médio de usuários ativos (máx. capacidade)	número médio de usuários ativos (equalizado)	diferença (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	2659,7	1962,4	-26,2
Randômico (RANDOM):	2688,6	2003,9	-25,5
Melhor Preço (PREÇO):	2720,2	2040,2	-25,0
"Channel Segregation" (CHANSG)	2699,6	1997,4	-26,0
Partição de Reuso (RUP)	2734,6	2041,8	-25,3

Tabela 4.18: Diferenças de número médio de usuários ativos entre as condições de máxima capacidade e com equalização, medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema com controle de potência.

²⁸ obtido através das relações (3.31), (3.32) e (3.33) do item 3.2.4.3.

²⁹ foi utilizado " δ "=0,37 conforme tabela 3.1.

Algoritmo	SIR médio condição de máxima capacidade (dB)	SIR médio condição com equalização (dB)	diferença teórica (4.10) (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	19,4	22,8	-32,5
Randômico (RANDOM):	18,9	21,9	-29,3
Melhor Preço (PREÇO):	18,4	21,3	-28,5
"Channel Segregation" (CHANSO)	18,9	21,9	-29,3
Partição de Reuso (RUP)	18,7	21,8	-30,1

Tabela 4.19: Diferenças teóricas esperadas entre as condições de máxima capacidade e com equalização, a partir da relação (4.10), medidas obtidas a 4% de probabilidade de bloqueio, em sistema com controle de potência.

Comparando os resultados das tabela 4.18 e 4.19, pode-se observar que os resultados encontrados nas simulações estão em acordo com a teoria, apesar da discrepância de 5% entre os resultados. Essas discrepâncias foram maiores que as obtidas no caso sem controle de potência devido, provavelmente, à maior probabilidade de queda por "intracell handoff" presente na condição de máxima capacidade.

4.3.5.2. Comparação com Resultados Publicados na Literatura

Comparou-se o desempenho dos algoritmos simulados com resultados de desempenho relatados na literatura. Dada a alta dependência dos resultados com o cenário simulado, comparou-se somente trabalhos da literatura que tenham simulado algoritmo e cenário parecidos aos simulados neste trabalho.

O algoritmo RUP apresentado por Furukawa [23] (SORP) também foi simulado com controle de potência similar ao aqui desenvolvido. Embora o algoritmo simulado em [23] seja diferente do algoritmo considerado neste trabalho, pode-se avaliar o impacto do controle de potência. Ao aplicar controle de potência, Furukawa foi obrigado a aumentar o SIR de Aceitação (correspondente ao "margem de CIR" em [23]) em suas simulações para manter o sistema a 0,5% de probabilidade de queda de chamada, confirmando a conclusão que o controle de potência gera maior probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff" no sistema.

Simulações de Serizawa [17,19] também verificaram que a probabilidade de chamadas sofrerem maior número de "intracell handoff" quando se aplica o controle de potência é bem maior do que no caso sem controle de potência. Em [17], Serizawa simula um algoritmo da classe de melhor qualidade, mostrando redução na probabilidade de bloqueio e aumento das probabilidades de chamadas sofrerem "intracell handoff" com a aplicação do controle de potência sob o mesmo tráfego, confirmando as conclusões alcançadas aqui.

4.3.6 Resumo das Observações

Pode-se observar que o controle de potência provoca redução da probabilidade de bloqueio em todos os algoritmos DCA-AI pois os algoritmos DCA-AI conseguem tirar proveito da menor potência interferente para alocar mais chamadas. Por outro lado, a probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff" e a probabilidade de queda de chamadas por falha em "intracell handoff" aumentou consideravelmente na maioria deles.

Observou-se nos histogramas de qualidade que os algoritmos DCA possuíam alto nível de concentração de chamadas com SIR próximo ao SIR mínimo. Dessa forma, suas chamadas ficam mais susceptíveis à interferência.

Ao apresentar também os resultados na condição de máxima capacidade, pode-se observar que a equalização é ainda mais necessária no caso com controle de potência pois o sistema fica muito instável nesta condição.

Os algoritmos DCA utilizando controle de potência foram simulados e os níveis de SIR de aceitação foram ajustados para garantir que os níveis "SIR_10%" de qualidade nos algoritmos fossem iguais ao nível "SIR_10%" do algoritmo FCA, e para garantir que a probabilidade de queda das chamadas se mantivesse em níveis aceitáveis, entre 2% e 3%. Nestas condições, o ganho de capacidade dos algoritmos DCA se manteve entre 80% e 95%.

Pode-se observar que, ao utilizar controle de potência, os algoritmos DCA tem desempenho semelhante entre si. Tal fato é justificado pela baixa variação dos histogramas de SIR dos algoritmos quando utilizam controle de potência. Dado que os algoritmos decidem o canal a utilizar pela medida de SIR no canal candidato, as escolhas de canal preferido não diferem muito entre os algoritmos. A partir dessa

observação, pode-se preterir um algoritmo sobre outro baseado em outros critérios como simplicidade de implementação, tempo de acesso etc.

Verificou-se que os ganhos de capacidade sobre o FCA estão dentro do intervalo de variação teórica. A variação de capacidade obtida com a equalização dos algoritmos foi verificada teoricamente através de análise da variação do SIR médio dos mesmos.

4.4. Influência da Mobilidade de Usuários no Desempenho de Algoritmos DCA-AI

As simulações que geraram os resultados apresentados nos itens anteriores não consideraram a mobilidade de usuários. Isto é, a simulação considerou que os usuários permaneciam imóveis durante toda a duração da chamada.

Dado que os algoritmos DCA-AI eliminam as margens de projeto com respeito à localização dos móveis e ao desvanecimento, a mobilidade pode causar alto impacto pois as diferentes posições que os TMs ocupam durante seus movimentos possuem diferentes características de propagação e interferência que podem invalidar a alocação de uma ou mais chamadas utilizando o mesmo canal.

Em outras palavras, seja um sistema DCA-AI com controle de potência e uma dada configuração de usuários que estejam utilizando o mesmo canal e que todos os usuários possuam SIR superior ao SIR mínimo (vide figura 4.27-a)). Quando um usuário se move, mesmo que ligeiramente, a situação de interferência de cada um dos TMs e suas ERBs se modifica positiva ou negativamente. Isto é, as chamadas em andamento podem sofrer aumento ou redução de interferência; podendo ocorrer queda de SIR abaixo do mínimo SIR necessário (vide figura 4.27-b)).

Dessa forma, é razoável esperar que a mobilidade de usuários cause um aumento na probabilidade de interferência entre chamadas ativas.

Apesar do provável impacto que a mobilidade causará no desempenho dos algoritmos DCA-AI, muitos trabalhos consideraram os TMs fixos durante a totalidade da chamada. Outros trabalhos consideraram usuários móveis [11-13,29,34,37,40,59,63,66,67], entretanto, os mesmos utilizaram diferentes modelos de mobilidade, dificultando a comparação do desempenho dos diversos tipos de algoritmos DCA-AI. Além disso, estes trabalhos consideraram a mobilidade sempre

incorporada em seus resultados, não permitindo uma análise do efeito da mobilidade em separado.

Neste item, será analisado o impacto da mobilidade separadamente, permitindo verificar como o desempenho dos algoritmos DCA-AI se modifica. O mesmo modelo será utilizado em todos os algoritmos, permitindo uma comparação do desempenho de cada algoritmo com respeito à mobilidade.

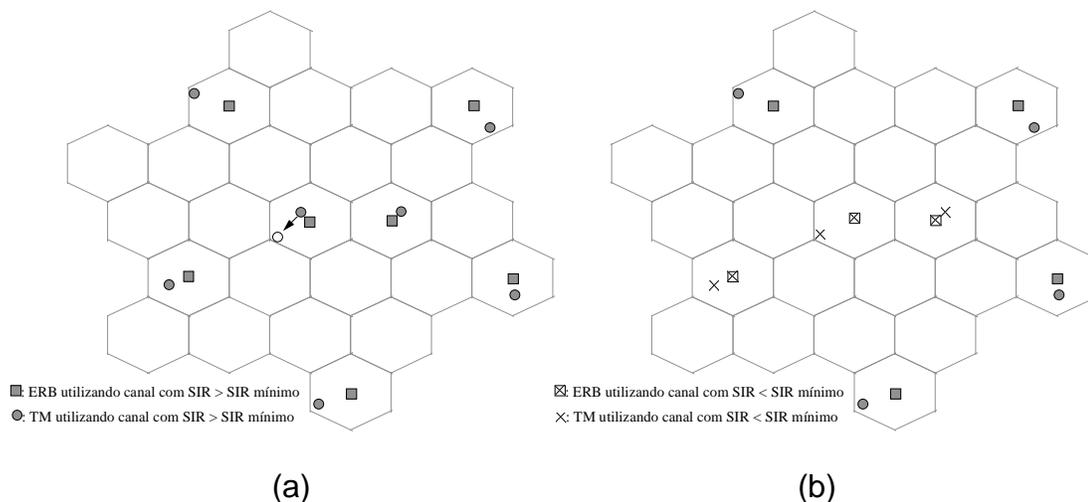


Fig. 4.27 - Impacto do movimento de um TM operando em um dado canal.
 (a): Instante antes do movimento, onde todos os TMs e ERBs operando no canal estão com SIR superior ao SIR mínimo.
 (b): Instante logo após o movimento. Algumas conexões entre TM e ERB não satisfazem a condição de SIR mínimo, necessitando de "intracell handoffs".

O movimento de usuários pode provocar a necessidade do TM trocar a ERB com o qual esteja operando ("intercell handoff"). Este item também considerará os diversos "intercell handoffs" que se façam necessários durante o movimento dos usuários, considerando também a possibilidade de queda da chamada caso o TM não encontre um novo canal durante a troca de ERBs.

Deve-se observar que o fenômeno da mobilidade não implica na concentração de usuários em uma dada célula. Este item considera somente o fenômeno da mobilidade e seu impacto no desempenho do sistema. O efeito da concentração de usuários em células do sistema deve ser considerado separadamente a fim de evitar que os efeitos se sobreponham.

4.4.1. Modelo de Mobilidade

Dado que o efeito da mobilidade pode ser verificado independentemente do modelo de mobilidade utilizado, decidiu-se utilizar um modelo de mobilidade simples. O modelo de mobilidade utilizado nas simulações é descrito a seguir.

Quando em movimento, os TMs seguem em linha reta em uma das 4 direções (norte, sul, leste e oeste) em velocidade constante de 7 metros por segundo (25,2 quilômetros por hora) até o final ou queda da chamada.

A distribuição de usuários nas 4 direções foi feita seqüencialmente, permitindo que o sistema continue com distribuição uniforme de tráfego entre as diversas células. Dessa forma, o modelo de mobilidade não implica em concentrações ou desconcentrações de usuários em células.

À cada movimento, o TM e a ERB correspondente ajustam suas potências de transmissão conforme o método de controle de potência utilizado. O "intercell handoff" é iniciado somente quando uma outra ERB estiver com nível de sinal 3dB superior ao nível de sinal fornecido pela ERB em uso [1]. Uma chamada em "intercell handoff" é considerada pela nova ERB da mesma forma que uma nova chamada. Isto é, não foi simulada maior prioridade para chamadas em "intercell handoff". O fluxograma de movimento e "intercell handoff" é ilustrado abaixo:

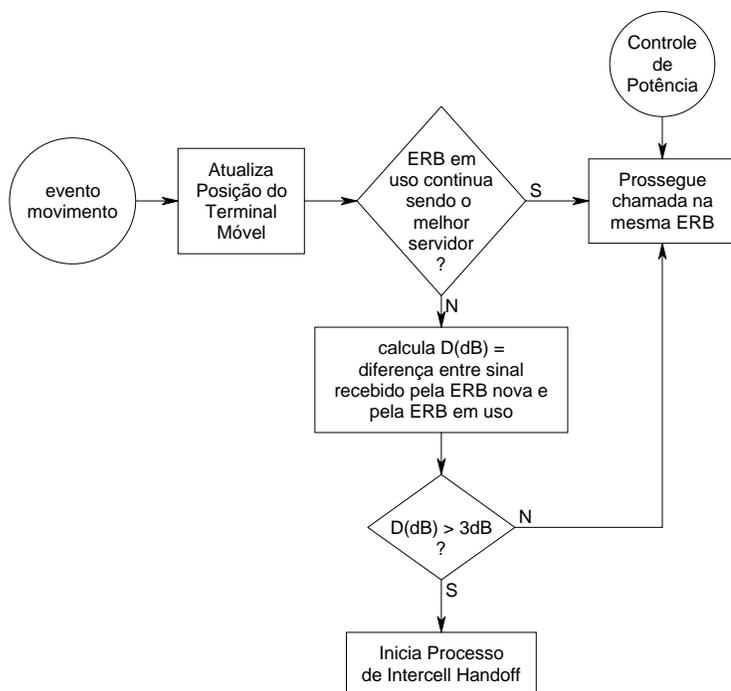


Fig. 4.28 - Fluxograma de movimento e início de "intercell handoff".

Quando a chamada inicia o processo de "intercell handoff", procurando um novo canal de operação em uma nova ERB, segue-se o mesmo procedimento definido para as novas chamadas conforme definido no item 4.1.1.

Observe que caso o TM não encontre um canal vago na nova ERB, sua chamada é bloqueada. Uma vez iniciado o processo de "intercell handoff", o usuário não mais possui a possibilidade de desistir do "intercell handoff" e continuar operando na sua ERB de origem.

Após o evento de movimento, todas as chamadas que utilizam o mesmo canal que o da chamada em movimento tem sua relação SIR recalculada. Inicia-se o processo de "intracell handoff" para cada TM cuja relação SIR tenha sido reduzida para nível inferior ao nível de SIR mínimo.

4.4.2. Cenário de Simulação

O cenário de simulação utilizado e as medidas de desempenho definidas no item 4.1.3. foram as mesmas utilizadas para obtenção dos resultados anteriores.

Conforme detalhado no apêndice A, o simulador considera a área de serviço dividida em um gradil e cada TM se associa a uma posição do gradil. A simulação considera que os TMs estarão se movendo entre posições do gradil. Dado que o gradil possui uma precisão de 70 metros e que a velocidade dos TMs é constante e de 7 metros por segundo, um usuário em movimento irá mudar de gradil à cada 10 segundos. Lembrando que a duração média das chamadas é de 100 segundos, cada TM em movimento percorre em média 10 posições no gradil do sistema, resultando em uma distância de 700 metros em média.

Considerou-se que 25% dos TMs estarão em movimento no sistema. A fim de validar o simulador, simulou-se primeiramente a condição de 5% dos TMs em movimento. É esperado que os resultados se aproximassem dos resultados sem mobilidade reportados nos itens 4.2 e 4.3. Conforme será visto adiante, tal fenômeno de fato ocorreu.

Conforme já mencionado, à cada movimento de cada TM, a relação SIR de cada chamada utilizando o mesmo canal é recalculada e possíveis "intracell handoffs" são processados. A quantidade de processamento é grande e o tempo de simulação torna-se proibitivo. A fim de evitar que as simulações perdurassem por

muito tempo, considerou-se o movimento síncrono dos usuários. Isto é, todos os eventos de movimento são concentrados ao final de cada ciclo de 10 segundos. Ao final do ciclo, os eventos de movimento dos usuários são processados instantaneamente. Ao final do movimento dos usuários, recalcula-se o SIR de cada uma das chamadas operando em canais com usuários em movimento. Este procedimento reduz em muito o tempo de simulação. Acredita-se que o movimento síncrono de usuários não invalidará os resultados.

"Intercell handoffs" também foram considerados na simulação. Quando o TM requisita uma mudança de ERB, o simulador decide a nova ERB que melhor servirá o TM na sua nova posição e seu novo canal de operação. Caso o TM não encontre um canal disponível na nova ERB, a chamada é interrompida. Reroteamento para outras ERBs não foi considerado nas simulações, apesar do simulador desenvolvido permitir o estudo futuro deste efeito.

4.4.3. Análise de Desempenho: Sem Controle de Potência

Da mesma forma que nos itens anteriores, obtiveram-se medidas de desempenho para avaliar a capacidade, a estabilidade e a qualidade das comunicações no algoritmo FCA e nos diversos algoritmos DCA-AI com mobilidade.

Neste item será analisado primeiramente o efeito da mobilidade nas diversas medidas de desempenho sob o mesmo tráfego gerado que na condição sem mobilidade em cada algoritmo. Posteriormente serão comparados os desempenhos dos algoritmos entre si sob o mesmo tráfego gerado, permitindo verificar como os algoritmos se comportam entre si em cada medida de desempenho.

A capacidade de cada algoritmo DCA-AI sobre o algoritmo FCA nos cenários com mobilidade será analisada na condição equalizada e posteriormente os resultados serão verificados através de análise teórica.

Dado que não se tem conhecimento de algum trabalho publicado na literatura que tenha avaliado isoladamente o efeito da mobilidade e devido às diversas diferenças nos modelos dos trabalhos que consideraram a mobilidade incorporada nos resultados, não serão apresentadas comparações com resultados publicados na literatura para este item.

4.4.3.1. Efeito da Mobilidade no Desempenho dos Algoritmos DCA-AI

Simularam-se os algoritmos FCA e os algoritmos DCA-AI sob os mesmos cenários e parâmetros do item 4.2, introduzindo-se somente a mobilidade dos TMs. A comparação sob o mesmo tráfego gerado permite observar o efeito da mobilidade em cada algoritmo sem considerar outros fatores.

A tabela 4.20 apresenta os resultados para análise. Deve-se observar que esta tabela não deve ser utilizada para comparação entre algoritmos, devendo ser utilizada somente para analisar o efeito da mobilidade na probabilidade de bloqueio de cada um deles individualmente.

Observando a tabela 4.20, pode-se verificar que a presença de TMs em movimento provocou um aumento na probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" em todos os algoritmos. O aumento desta probabilidade justifica o maior aumento na probabilidade de queda de chamadas devido a falha durante um "intracell handoff" e no número médio de "intracell handoffs" em todos algoritmos.

O aumento na probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoffs" era esperado porque a mobilidade provoca maiores variações nos níveis de interferência recebidos em TMs utilizando o mesmo canal. As maiores variações eventualmente podem provocar quedas nos níveis de SIR das chamadas em andamento, forçando-as a um "intracell handoff". Note que o algoritmo FCA não sofre tanto com a mobilidade pois o mesmo possui espaçamento de reuso de canais que considera que os usuários estariam operando no limiar da célula. Assim, mesmo que o TM se movimente dentro da célula, a mínima distância de reuso está garantida. O algoritmo QUAL também não teve seu desempenho muito degradado porque naturalmente o mesmo já procura separar os TMs utilizando um mesmo canal.

A mobilidade também causou o surgimento da probabilidade de queda das chamadas devido a falhas durante o "intercell handoff". A tabela 4.20 mostra que esta probabilidade aumenta gradativamente à medida que a mobilidade aumenta, conforme esperado.

Algoritmo	usuários em movimento (%)	tráfego gerado (Erl)	prob. de bloqueio (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio "intracell handoffs" por chamada	prob. de queda por falha "intercell handoff" (%)	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
FCA	0	1220	5,9	1,9	6,0	0,06	-	28,4	28,4
	5	1220	5,8	2,6	7,5	0,07	0,3	28,7	28,7
	25	1220	4,2	4,8	13,7	0,15	1,7	29,1	29,1
QUAL	0	1900	6,2	1,6	3,9	0,03	-	27,7	27,7
	5	1900	5,7	2,8	6,9	0,06	0,4	28,1	28,1
	25	1900	4,6	6,8	17,0	0,16	1,9	28,4	28,5
RANDOM	0	2100	5,0	4,2	27,4	0,53	-	24,4	24,4
	5	2100	4,8	5,4	29,5	0,60	0,3	24,7	24,7
	25	2100	3,7	9,4	38,6	0,88	1,5	25,0	25,1
CHANSG	0	2100	5,8	4,2	18,1	0,28	-	25,1	25,1
	5	2100	5,6	5,4	20,5	0,32	0,4	25,3	25,4
	25	2100	4,2	9,5	28,9	0,50	1,5	25,7	25,8
PREÇO	0	2500	6,2	8,1	53,5	2,26	-	22,3	22,3
	5	2500	6,0	9,2	55,0	2,42	0,3	22,8	22,9
	25	2500	4,3	14,4	62,3	3,20	1,4	23,2	23,2
RUP	0	2800	4,5	2,4	33,5	0,56	-	21,3	21,3
	5	2800	3,9	3,9	38,5	0,70	0,3	22,5	22,5
	25	2800	3,8	8,2	53,2	1,29	1,5	21,9	21,9

tabela 4.20 - Efeito da introdução de mobilidade dos usuários em algoritmos FCA e DCA-AI sem controle de potência.

A tabela 4.20 mostra que a probabilidade de bloqueio diminui com a introdução da mobilidade. Esta redução pode ser explicada pela maior probabilidade de queda de chamadas durante "intracell handoffs" e também pelo aparecimento da probabilidade de queda de chamadas durante "intercell handoffs". Assim, a interrupção prematura de chamadas abre espaço para a ocorrência de novas chamadas, possivelmente em melhores situações de interferência que as chamadas em queda. Este efeito ilustra o problema em se considerar somente a probabilidade de bloqueio como medida de desempenho. Note que poderia se concluir erroneamente que a mobilidade permitiria uma maior capacidade do que a fornecida pela condição sem mobilidade.

A tabela 4.20 também apresenta o efeito da mobilidade no SIR médio das chamadas, mostrando que a introdução da mobilidade provoca um aumento nesta medida. Estes aumentos podem ser justificados pelo fato dos valores englobarem o SIR de chamadas bem sucedidas apenas. Dado que a mobilidade provoca maior queda de chamadas, as chamadas que conseguem completar-se possuirão em média uma margem de SIR maior, resultando em um SIR médio superior. Assim, não se pode concluir exatamente como a mobilidade afeta o SIR médio das chamadas a partir destes valores; entretanto, os mesmos sugerem que a mobilidade não afeta muito esta medida.

A figura 4.20 ilustra que o efeito da mobilidade é gradual com o aumento da mobilidade. Quando o sistema operava com somente 5% dos usuários, os efeitos acima mencionados eram menores do que na condição de 25% dos usuários em movimento.

4.4.3.2. Comparação do Desempenho dos Algoritmos DCA-AI sob Efeito da Mobilidade

A fim de comparar como os algoritmos se comportam entre si sob o efeito da mobilidade, considerou-se o mesmo cenário de simulação, com os mesmos parâmetros, com o mesmo tráfego gerado e com 25% dos TMs em movimento. Os parâmetros consideram os níveis de SIR de Aceitação iguais ao nível de SIR mínimo, correspondendo à situação de máxima capacidade dos algoritmos.

A partir da análise conjunta das medidas de desempenho será possível comparar o desempenho entre os algoritmos. A tabela 4.21 apresenta os valores obtidos nas simulações.

Algoritmo	prob. bloq. (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio "intracell handoffs" por chamada	prob. de queda por falha "intercell handoff" (%)	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
FCA	23,1	10,5	14,9	0,06	4,5	27,9	28,0
QUAL	7,9	8,8	18,8	0,16	2,5	27,5	27,6
RANDOM	5,0	10,6	39,8	0,87	1,7	24,8	24,8
PREÇO	3,3	12,0	60,0	3,16	1,1	23,2	23,2
CHANSO	5,7	10,9	30,1	0,49	1,8	25,5	25,5
RUP	1,2	3,7	49,4	1,38	1,3	22,1	22,1

tabela 4.21 - Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-AI sem controle de potência, sob o efeito da mobilidade de 25% dos TMs e sob o mesmo tráfego gerado de 2300 Erlangs.

Observando a tabela 4.21, pode-se verificar que os algoritmos DCA podem melhorar bastante o desempenho de um algoritmo FCA operando sob as mesmas condições. Enquanto o algoritmo FCA apresenta mais de 23% de probabilidade de bloqueio e mais de 10% de probabilidade de queda, a maioria dos algoritmos DCA conseguiu reduzir estas probabilidades, embora os níveis de qualidade dos algoritmos DCA tenham reduzido e um maior número de "intracell handoffs" seja necessário.

Observando a tabela 4.21 e comparando-a com resultados obtidos no item 4.2, pode-se observar que o desempenho relativo das medidas de probabilidade de bloqueio, de probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff", do número médio de "intracell handoffs" por chamada e de qualidade média das chamadas se mantiveram entre os algoritmos. Isto é, o algoritmo QUAL possui como característica uma maior probabilidade de bloqueio, mas possui uma maior estabilidade e qualidade de chamadas. O algoritmo PREÇO se manteve no outro extremo, baixa probabilidade de bloqueio, mas com alta instabilidade e baixa qualidade de chamadas. Os algoritmos RANDOM e CHANSO mantiveram desempenho semelhante com respeito à probabilidade de bloqueio, mas o algoritmo CHANSO

mostrou melhor desempenho de estabilidade, da mesma forma que verificado nos casos sem mobilidade.

O desempenho do algoritmo RUP foi o único a mostrar modificações, apesar de pequenas, com a introdução da mobilidade. O algoritmo RUP ainda se mantém com baixas probabilidades de bloqueio e de queda; entretanto, pode-se notar que o algoritmo RUP se encontra com alta probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoffs" e, conseqüentemente, alto número médio de "intracell handoffs" por chamada. Enquanto no caso sem mobilidade o algoritmo RUP se mantinha em níveis semelhantes ao do algoritmo RANDOM, com mobilidade o algoritmo RUP se mostrou pior que o algoritmo RANDOM. Além disso, a maior probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff" não parece ter afetado o desempenho com respeito à probabilidade de queda de chamadas devido à "intracell handoff". Este comportamento sugere que o algoritmo RUP é mais afetado pelo movimento dos TMs; provavelmente porque os TMs saem do padrão de reuso compacto. Entretanto, a baixa probabilidade de queda sugere que o algoritmo RUP conseguiu rearranjar eficientemente os TMs em "intracell handoff". Trabalhos futuros poderão confirmar estas hipóteses.

Observando a medida de probabilidade de queda por falha em "intercell handoff", pode-se observar uma correlação entre esta medida e a probabilidade de bloqueio de novas chamadas; isto pode ser justificado ao se observar que as chamadas em "intercell handoff" tem seus canais alocados da mesma forma que as novas chamadas. Além disso, pode-se considerar que a razão entre o tráfego que gera pedidos de "intercell handoff" e o tráfego alocado em cada algoritmo se manteve, justificando a correlação. O algoritmo RUP foi o único a não respeitar esta correlação, mostrando uma probabilidade de queda por "intercell handoff" relativamente grande comparada à probabilidade de bloqueio. Este fenômeno sugere que o algoritmo RUP possa ter dificuldades na alocação de usuários na fronteira da célula, conforme mencionado por Nakano [78]. Maiores estudos são necessários para confirmar esta hipótese.

A figura 4.29 mostra que as conclusões deste item são válidas para outros níveis de tráfego gerado e ilustram como estes valores variam com o tráfego gerado no sistema.

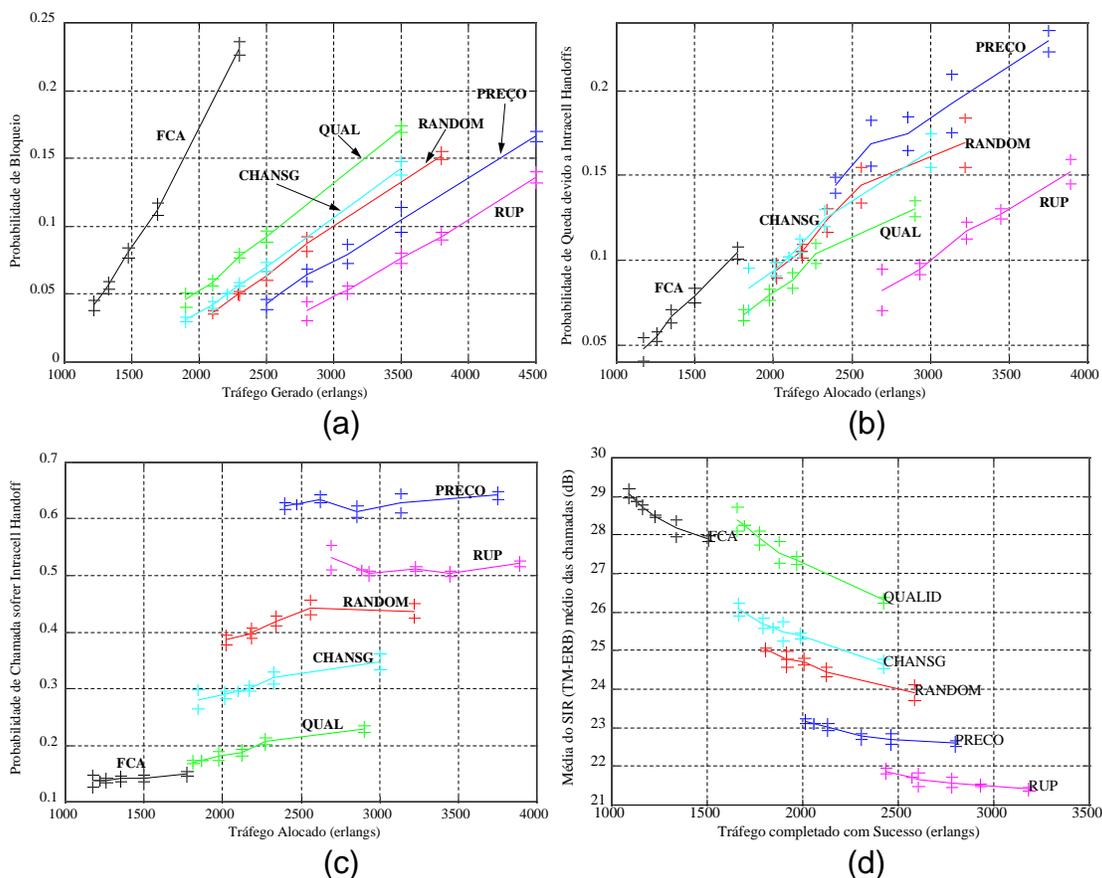


Fig. 4.29 - Medidas de Desempenho de Algoritmos operando com 25% de mobilidade, sem controle de potência e sob os mesmos parâmetros.

(a): probabilidade de bloqueio de novas chamadas.

(b): probabilidade de queda de chamadas devido a "intracell handoffs";

(c): probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoffs";

(d): Média dos níveis de SIR médio das chamadas completadas.

4.4.3.3. Análise de Capacidade

Para efeito de comparação de capacidades, os níveis de SIR de Aceitação ("SIR_Aceit.", "SIR_Intraho" e "SIR_Interho") de cada algoritmo foram ajustados para equalizar os algoritmos da mesma forma que nas análises anteriores.

O SIR de Aceitação de cada algoritmo foi ajustado progressivamente e resimulado para cada ajuste. O ajuste foi feito para a condição do sistema operando com 25% de mobilidade. O SIR de Aceitação foi aumentado até que as simulações resultassem em um nível de probabilidade de queda por "intracell handoff" próximo a 2,5%, probabilidade de queda por "intercell handoff" igual ou inferior a 2,5%, e nível

de "SIR_10%" igual ou superior ao do algoritmo FCA. Através desta equalização, nivela-se a porcentagem de usuários que terminaram a chamada com sucesso.

Após diversas simulações, os diversos níveis de SIR de Aceitação foram ajustados para os valores mostrados na tabela 4.22.

Algoritmo	SIR de Aceitação (dB)	Prob. de Queda por "Intracell Handoff" (a 5% prob. bloqueio) (%)	Prob. de Queda por "Intercell Handoff" (a 5% prob. bloqueio) (%)	nível de SIR_10% SIR TM-ERB/ SIR ERB-TM (dB)
FCA	21,5	2,6	2,3	25 / 25
QUAL	20,5	2,6	2,3	25 / 25
RANDOM	25,5	2,5	2,3	27 / 27
CHANSO	25,0	2,5	2,3	26 / 26
PREÇO	29,0	2,5	2,3	28 / 29
RUP	24,5	2,6	2,2	25 / 26

Tabela 4.22 - níveis de SIR de Aceitação ajustados para equalização de desempenho entre algoritmos DCA sem controle de potência na condição de 25% de mobilidade no sistema.

Pelos resultados apresentados na tabela 4.22, pode-se observar que os algoritmos satisfazem a condição impostas de equalização. Deve-se observar que os níveis alcançados pelo SIR de Aceitação foram muito superiores aos valores ajustados na condição sem mobilidade no sistema. Isto era esperado pois a mobilidade, conforme verificado nos itens 4.4.3.1 e 4.4.3.2, aumenta a variação de interferência nas chamadas ativas; assim, os algoritmos necessitam de margens adicionais para manter os níveis de queda em valores aceitáveis. Note que mesmo o algoritmo FCA teve de ser equalizado pois também sofreu com a introdução de mobilidade no sistema.

Enquanto no caso sem mobilidade os algoritmos foram ajustados principalmente para satisfazer a condição de equalização de qualidade, o fator limitante para a equalização no caso com mobilidade foi a probabilidade de queda de chamadas por "intracell handoff". Pode-se verificar inclusive que o nível "SIR_10%" de cada algoritmo estava superior ao nível do algoritmo FCA.

Uma vez equalizados, os algoritmos foram comparados entre si. Dado que a comparação de capacidade será feita sobre níveis de tráfego que satisfaçam a

condição de equalização, os algoritmos foram simulados somente nestes níveis. Acredita-se que o comportamento das curvas se manterá semelhante às obtidas para o caso de máxima capacidade (vide figura 4.29) a menos de um deslocamento.

O ganho de capacidade sobre o FCA fornecido por cada algoritmo DCA equalizado a 5% de probabilidade de bloqueio está ilustrado na figura 4.30.

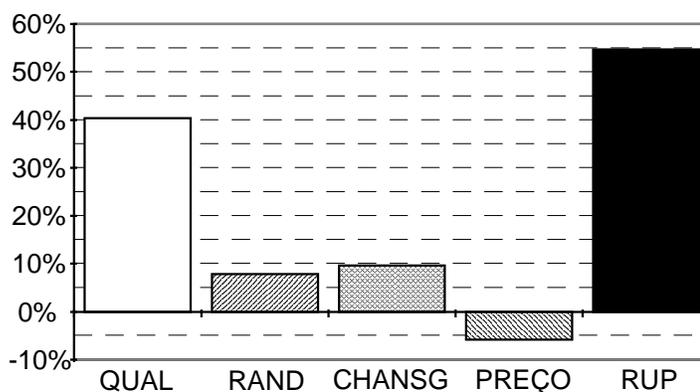


figura 4.30 - Ganho de Capacidade de Algoritmos DCA-AI sobre algoritmo FCA a 5% de probabilidade de bloqueio com algoritmos equalizados e na condição de sistema operando com 25% de mobilidade.

Pode-se observar que a equalização necessária para tornar os algoritmos DCA estáveis reduziu bastante o ganho de capacidade dos mesmos. O algoritmo PREÇO inclusive inverteu o desempenho, com uma capacidade menor que o do algoritmo FCA.

O alto nível de SIR de Aceitação do algoritmo PREÇO (29dB) justifica o seu pobre desempenho com relação ao FCA. A diferença de 14dB sobre o SIR mínimo foi necessária para reduzir a probabilidade de queda por "intracell handoffs" ao nível de equalização de 2,5%.

Os algoritmos RUP e QUAL foram os únicos que ainda mantiveram um ganho de capacidade razoável: 55% e 40%, respectivamente. Os algoritmos RANDOM e CHANSG mostraram pequenos ganhos na faixa dos 10%.

A figura 4.31 ilustra a probabilidade de queda de chamadas por "intracell handoffs" e a probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff" com os algoritmos equalizados.

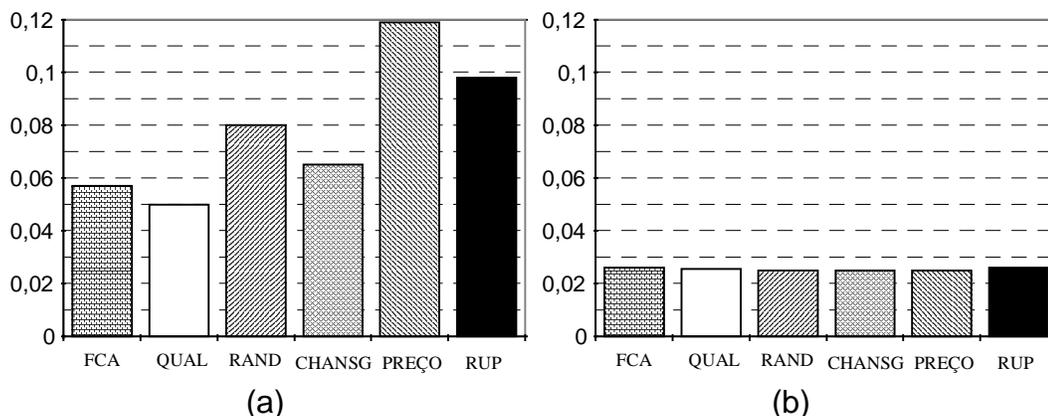


Fig. 4.31 - (a) Probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" e (b) Probabilidade de Queda de Chamadas por "intracell handoff" com algoritmos operando a 5% de probabilidade de bloqueio, na condição equalizada e com 25% de mobilidade.

A partir da figura 4.31 pode-se verificar que todos os algoritmos estavam operando de forma equalizada, com aproximadamente 2,5% de probabilidade de queda por "intracell handoff"; estando portanto mais estáveis.

A figura 4.31 também ilustra a probabilidade de uma chamada sofrer "intracell handoff". A equalização conseguiu reduzir estes valores para a faixa de 5% a 12%. Com os algoritmos operando à máxima capacidade e com 5% de probabilidade de bloqueio, estes valores variam de 14% a 63% (vide figura 4.29-c).

A menor chance de uma chamada sofrer "intracell handoff" também pode ser visualizada na figura 4.32, que ilustra os resultados do número médio de intracell handoffs por chamada bem sucedida em cada um dos algoritmos, no ponto de operação.

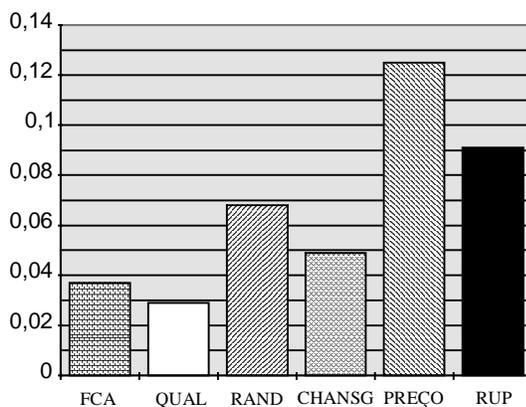


Fig. 4.32 - Número médio de "intracell handoff" por chamada bem sucedida com algoritmos operando na condição equalizada, a 5% de probabilidade de bloqueio e com 25% de mobilidade.

A equalização tornou os algoritmos muito mais estáveis, reduzindo o número médio de “intracell handoffs” para valores variando de 0,03 a 0,12. Com os algoritmos operando à máxima capacidade, à 5% de probabilidade de bloqueio, esses valores variam de 0,14 a 3,2 (figura não apresentada). A redução nestes valores demandará uma menor carga de processamento nas ERBs, facilitando a implementação destes algoritmos.

Deve-se observar que a maior estabilidade dos algoritmos é devida não somente ao menor tráfego cursado, mas também à margem adicionada no SIR de Aceitação. Conforme anteriormente explicado, o maior nível de SIR de Aceitação faz com que as chamadas sejam alocadas com uma margem sobre o SIR mínimo. Assim, a chamada possui maior resistência a aumentos de interferência em sua chamada. A mobilidade dos TMs exigiu que a margem fosse bem superior à margem sem mobilidade, pois a mobilidade dos TMs causa uma variação maior na interferência recebida pelos TMs ativos.

A figura 4.33 apresenta os histogramas de SIR médio e SIR de alocação para os algoritmos operando na condição equalizada.

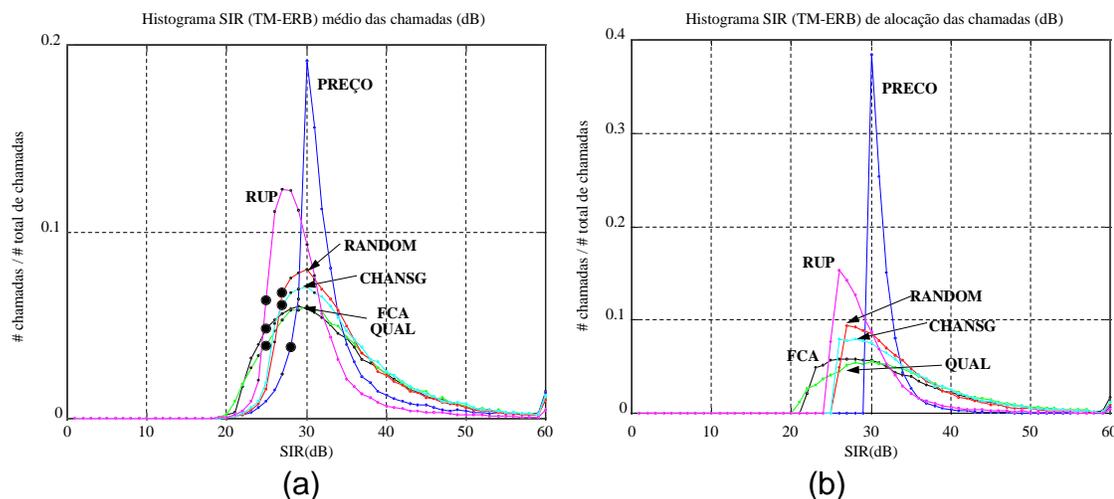


Fig. 4.33: Histograma de SIR de Chamadas³⁰ para algoritmos operando no ponto de operação em sistema com 25% de mobilidade.

(a) Histograma de SIR médio de Chamadas bem sucedidas

(b) Histograma de SIR de Alocação de Chamadas alocadas

Note que os algoritmos DCA possuem nível de "SIR_10%" igual ou superior ao mesmo nível do algoritmo FCA. O histograma de SIR de alocação confirma as

³⁰ os histogramas correspondem ao SIR no sentido TM - ERB. Os histogramas no sentido ERB-TM não foram apresentados pois são bem semelhantes aos histogramas apresentados.

diferentes margens utilizadas para cada algoritmo. Pode-se observar neste histograma que a maioria das chamadas foi alocada com SIRs variando de 25dB a 40dB, fornecendo uma boa margem para as variações de SIR causadas pela mobilidade dos usuários.

4.4.3.4. Verificação Teórica

Da mesma forma que realizado para os cenários sem mobilidade, será aplicada a relação (3.34) (vide item 3.2.4.3) a fim de verificar se os resultados obtidos para a condição com mobilidade estão dentro dos limites teóricos.

A tabela 4.23 apresenta os dados para cálculo e os resultados para cada um dos algoritmos DCA-AI considerados:

Algoritmo	Média SIR do médio (dB)	nível SIR10% (dB)	N_e^{31}	limite inferior ³² $\frac{Cm_{DCA-AI}}{Cm_{FCA}}$	limite superior $\frac{Cm_{DCA-AI}}{Cm_{FCA}}$
FCA	33,2	25,0	-	-	-
Melhor Qualidade (QUAL):	33,7	25,5	7,0	0,48	1,49
Randômico (RANDOM):	33,3	27,0	5,6	0,60	1,86
Melhor Preço (PREÇO):	33,1	28,0	4,9	0,69	2,12
"Channel Segregation" (CHANSG)	33,7	26,5	6,2	0,54	1,68
Partição de Reuso (RUP)	29,8	25,0	4,7	0,72	2,21

Tabela 4.23 - Limites Teóricos para algoritmos DCA-AI sem controle de potência equalizados e simulados na condição de 25% de mobilidade.

Ao subtrair um de cada um dos limites da tabela 4.23 obtém-se os limites de ganho de capacidade, podendo-se observar que os resultados apresentados na figura 4.30 estão dentro dos limites teóricos.

Utilizou-se a formulação teórica desenvolvida em 3.2.4 e 4.2.3.5.1 nos resultados de variação do número médio de chamadas em andamento e de SIR médio de cada algoritmo. A tabela 4.24 apresenta a variação obtida nas simulações e a tabela 4.25 apresenta qual a variação esperada através da análise teórica.

³¹ obtido através das relações (3.31), (3.32) e (3.33) do item 3.2.4.3.

³² foi utilizado " δ "=0,37 conforme tabela 3.1.

Algoritmo	número médio de usuários ativos (máx. capacidade)	número médio de usuários ativos (equalizado)	diferença (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	1661	970	-42
Randômico (RANDOM):	1890	750	-60
Melhor Preço (PREÇO):	2058	645	-69
"Channel Segregation" (CHANSG)	1806	771	-57
Partição de Reuso (RUP)	2559	1070	-58

Tabela 4.24: Diferenças de número médio de usuários ativos entre as condições de máxima capacidade e com equalização, medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema operando sem controle de potência e com 25% de mobilidade.

Algoritmo	SIR médio TM-ERB³³ condição de máxima capacidade (dB)	SIR médio TM-ERB condição com equalização (dB)	diferença teórica (4.10) (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	28,2	33,7	-47
Randômico (RANDOM):	24,8	33,3	-63
Melhor Preço (PREÇO):	23,1	33,1	-69
"Channel Segregation" (CHANSG)	25,6	33,7	-61
Partição de Reuso (RUP)	21,7	29,8	-61

Tabela 4.25: Diferenças teóricas esperadas entre as condições de máxima capacidade e com equalização, a partir da relação (4.10), medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema operando sem controle de potência e com 25% de mobilidade.

Os resultados das tabelas 4.24 e 4.25 mostram que os resultados de capacidade e qualidade estão correlacionados conforme a teoria. Observe que a variação de número médio de usuários obtidos no algoritmo PREÇO foi bem semelhante ao esperado, ao contrário do ocorrido nas análises sem mobilidade com e sem controle de potência.

³³ os valores de SIR no sentido ERB-TM não foram mostrados pois estão bem próximos aos valores de SIR no sentido TM-ERB apresentados.

4.4.3.5. Resumo das Observações sobre Mobilidade em Algoritmos DCA sem Controle de Potência

Pode-se observar que a presença de TMs em movimento provocou um aumento considerável na probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoffs" e no número médio de "intracell handoffs" por chamada em todos os algoritmos. A probabilidade de queda por "intracell handoff" também sofreu aumento, provavelmente pelo maior tráfego de chamadas em "intracell handoff". A maior instabilidade foi provocada, provavelmente, pela maior variação no SIR das chamadas ativas causada pela mobilidade dos usuários ativos.

Obviamente, a mobilidade também causou o aparecimento da probabilidade de queda das chamadas devido a falhas durante o "intercell handoff". Verificou-se que esta medida possui correlação com a probabilidade de bloqueio de novas chamadas, conforme esperado.

Ao simular situações com 5% e com 25% de TMs em movimento, verificou-se que o efeito da mobilidade é gradual.

Apesar disso, pode-se verificar que os algoritmos DCA ainda possuem desempenho melhor que o algoritmo FCA.

O desempenho relativo dos algoritmos não se modificou muito com a introdução da mobilidade, mantendo-se as características de cada um. O algoritmo RUP ainda se manteve como o melhor algoritmo DCA sem controle de potência, mas notaram-se alguns comportamentos interessantes no algoritmo RUP, que devem ser tópicos de pesquisas futuras.

Os maiores níveis de SIR de Aceitação necessários para equalização e estabilização dos algoritmos reduziram muito o ganho de capacidade dos algoritmos DCA. O algoritmo PREÇO inclusive resultou em uma perda de capacidade de 6% com relação ao algoritmo FCA. Os algoritmos RUP e QUAL foram os únicos que ainda mantiveram um ganho de capacidade razoável: 55% e 40%, respectivamente. Os algoritmos RANDOM e CHANSO mostraram pequenos ganhos, próximos à 10%.

Verificou-se que os ganhos alcançados estavam dentro dos limites teóricos e confirmou-se novamente o compromisso entre qualidade e capacidade ao se verificar que, com a menor capacidade dos algoritmos, a qualidade das chamadas

aumentava. Novamente a formulação teórica do item 3.2.4. e 4.2.3.5.1. foi confirmada.

4.4.4. Análise de Desempenho: com Controle de Potência

Este item analisará o desempenho dos algoritmos DCA-AI com mobilidade e com aplicação do controle de potência. Medidas de desempenho para avaliar capacidade, estabilidade e qualidade das comunicações no algoritmo FCA e nos diversos algoritmos DCA-AI foram obtidas.

O algoritmo de controle de potência utilizado foi o mesmo utilizado no item 4.3; isto é, TM e ERB ajustavam suas potências de transmissão para compensar as perdas de propagação, incluindo a componente de desvanecimento lognormal.

No item 4.4.4.1 será analisado o efeito da mobilidade nos algoritmos DCA com controle de potência. Para tanto, a comparação será feita sob o mesmo cenário, parâmetros e condições, com a única diferença sendo a mobilidade introduzida. Posteriormente, no item 4.4.4.2, o desempenho dos algoritmos DCA com e sem controle de potência, sob influência da mobilidade serão comparados. Ainda sob o mesmo ambiente e parâmetros e sob o mesmo tráfego, o item 4.4.4.3 comparará o desempenho dos algoritmos DCA-AI entre si.

No item 4.4.4.4, a capacidade dos algoritmos DCA-AI em relação ao algoritmo FCA será estudada. O item 4.4.4.5 verifica a validade dos resultados com relação à teoria. Pela falta de resultados adequados para a comparação, os resultados deste item não puderam ser comparados com trabalhos publicados na literatura.

4.4.4.1. Efeito da Mobilidade no Desempenho dos Algoritmos DCA-AI com Controle de Potência

Simularam-se o algoritmo FCA e os algoritmos DCA-AI com controle de potência e sob os mesmos cenários e parâmetros do item 4.3, introduzindo-se somente a mobilidade dos TMs, sendo possível a observação do efeito da mobilidade em cada algoritmo sem considerar outros fatores.

A tabela 4.26 apresenta os resultados para análise. Deve-se observar que esta tabela não deve ser utilizada para comparação entre algoritmos, devendo ser utilizada somente para analisar o efeito da mobilidade na probabilidade de bloqueio de cada um dos algoritmos individualmente.

Observando a tabela 4.26, pode-se constatar que, da mesma forma que no caso sem controle de potência, a presença de TMs em movimento provocou variações no nível de interferência recebido em TMs utilizando o mesmo canal, aumentando a probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" em todos os algoritmos, causando em conseqüência um aumento considerável no número médio de "intracell handoffs" por chamada. Este aumento também justifica o maior aumento na probabilidade de queda de chamadas devido à falha durante um "intracell handoff" em todos algoritmos. Por outro lado, o algoritmo FCA com controle de potência conseguiu manter-se em níveis aceitáveis de estabilidade, devido à mínima distância de reuso garantida.

Da mesma forma que no caso sem controle de potência, a probabilidade de bloqueio diminui com a mobilidade devido à maior disponibilidade de canais deixados por chamadas interrompidas durante um processo de "intracell handoff" falho.

A mobilidade também causou um aumento no SIR médio das chamadas, provavelmente devido ao fato do valor englobar o SIR das chamadas bem sucedidas apenas.

Em resumo, ao comparar a tabela 4.26 com a tabela 4.20, pode-se verificar que a mobilidade provoca o mesmo efeito qualitativo nos algoritmos.

Algoritmo	usuários em movimento (%)	tráfego gerado (Erl)	prob. de bloqueio (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio "intracell handoffs" por chamada	prob. de queda por falha "intercell handoff" (%)	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
FCA	0	1220	6,1	0,9	7,7	0,08	-	25,2	25,2
	25	1220	4,9	2,2	19,7	0,25	1,7	25,3	25,3
QUAL	0	3800	12,2	16,7	46,6	0,83	-	19,0	19,1
	25	3800	7,9	20,0	67,4	2,36	1,7	19,2	19,3
RANDOM	0	3800	10,2	18,8	53,8	1,14	-	18,6	18,7
	25	3800	6,9	20,5	73,0	3,29	1,1	18,8	18,8
CHANSNG	0	3800	9,6	17,0	52,3	1,15	-	18,7	18,7
	25	3800	6,2	20,1	72,6	3,18	1,5	18,8	18,8
PREÇO	0	3800	8,7	20,8	60,9	1,66	-	18,3	18,3
	25	3800	5,4	22,5	78,6	5,04	1,1	18,4	18,3
RUP	0	3800	9,6	17,0	53,3	1,15	-	18,6	18,6
	25	3800	6,4	20,0	73,5	3,49	1,3	18,7	18,7

tabela 4.26 - Efeito da introdução da mobilidade dos usuários em algoritmos FCA e DCA-AI com controle de potência.

4.4.4.2. Comparação do Desempenho de Algoritmos DCA-AI com e sem Controle de Potência sob Efeito da Mobilidade

Da mesma forma que no item anterior, compararam-se os resultados de desempenho dos algoritmos com e sem controle de potência, ambos com 25% de mobilidade incorporada, sob os mesmos cenários e parâmetros, diferindo somente no controle de potência. A tabela 4.27 apresenta os resultados para análise. Novamente, deve-se observar que esta tabela não deve ser utilizada para comparação entre algoritmos.

Pode-se observar na tabela 4.27 que o controle de potência permitiu a redução da probabilidade de bloqueio e o aumento da probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" em todos os algoritmos DCA-AI.

A redução na probabilidade de bloqueio era esperada, pois, conforme explicado no item 3.2.3.1 e exemplificado no item 4.3.2, a menor potência interferente facilita a alocação de novas chamadas em sistemas DCA-AI. Novamente, o algoritmo FCA não consegue se aproveitar da menor potência interferente para melhorar sua capacidade.

O aumento na probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff" também era esperado pois, da mesma forma que no caso sem mobilidade, embora as chamadas gerem menos potência interferente, as mesmas ficam mais susceptíveis à interferência devido sua menor média de SIR. A maior probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff" causou um aumento grande no número médio de "intracell handoffs" por chamada, chegando a níveis que podem tornar inviável a aplicação do DCA (algoritmo PREÇO chegou a 5,76 "intracell handoffs" por chamada completa), exigindo ajuste dos parâmetros para melhor estabilidade.

Da mesma forma que no caso sem mobilidade, todos os algoritmos tiveram seu nível de qualidade médio (SIR médio) reduzido com a introdução do controle de potência.

algoritmo	controle de potência	tráfego gerado (Erl)	prob. de bloqueio (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	prob. de queda por falha "intercell handoff" (%)	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
FCA	NPC	1330	5,7	5,6	13,8	0,13	1,9	28,7	28,8
	BPC	1330	6,4	2,9	20,0	0,25	2,2	24,9	24,9
QUAL	NPC	3500	17,2	13,0	23,0	0,17	3,4	26,3	26,4
	BPC	3500	6,1	16,4	67,3	2,59	1,3	19,3	19,5
RANDOM	NPC	3800	15,2	16,9	43,8	0,82	2,8	23,9	23,9
	BPC	3800	6,9	20,5	73,0	3,29	1,1	18,8	18,8
CHANSO	NPC	3500	14,3	16,5	34,8	0,47	2,8	24,7	24,7
	BPC	3500	5,3	17,0	73,2	3,49	1,1	18,9	18,9
PREÇO	NPC	3500	10,5	19,3	62,8	2,91	2,1	22,7	22,7
	BPC	3500	4,2	18,6	79,8	5,76	0,8	18,5	18,4
RUP	NPC	3500	7,7	11,7	51,2	1,10	2,2	21,6	21,6
	BPC	3500	4,7	16,0	74,7	3,93	1,0	18,8	18,8

tabela 4.27 - efeito da introdução do controle de potência nos algoritmos FCA e DCA-AI operando com mobilidade de 25% dos Terminais.

A probabilidade de queda de chamadas devido a falha no "intracell handoff" também aumentou na maioria dos algoritmos DCA-AI, conforme verificado no caso sem mobilidade. O algoritmo PREÇO foi o único que teve ligeira melhoria, provavelmente devido ao menor impacto do controle de potência na probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff". A justificativa para o aumento na probabilidade de queda devido a "intracell handoffs" é a mesma que no caso sem controle de potência: maior fluxo de chamadas em "intracell handoff" (vide item 4.3.2).

Ao observar a medida de probabilidade de queda devido a "intercell handoff", notou-se uma correlação entre a mesma e a probabilidade de bloqueio de novas chamadas. Novamente este fenômeno pode ser justificado pelo fato das alocações de chamadas em "intercell handoff" serem tratadas da mesma forma que uma nova alocação.

Verificou-se, da mesma forma que no caso sem mobilidade, que o efeito do controle de potência na probabilidade de bloqueio do algoritmo RUP foi bem menor do que nos outros algoritmos.

Conforme pode-se verificar, o efeito qualitativo do controle de potência foi independente da mobilidade dos TMs. Isto não significa que a mobilidade não tem influência no desempenho de algoritmos com controle de potência. Conforme pode-se verificar no item 4.4.4.1, os efeitos se combinam.

O efeito do controle de potência nos histogramas de SIR médio e de SIR de alocação no sistema operando com mobilidade foi o mesmo observado no caso sem mobilidade. Por brevidade, os mesmos não serão apresentados.

4.4.4.3. Comparação do Desempenho entre Algoritmos DCA-AI com Controle de Potência

Da mesma forma que no item 4.3.3, os desempenhos entre algoritmos DCA-AI com controle de potência foram comparados sob condições de simulação idênticas, incluindo o tráfego gerado, diferindo somente o algoritmo em si. A tabela 4.28 apresenta os resultados utilizados na comparação.

Algoritmo	prob. de bloqueio (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	prob. de queda por falha "intercell handoff" (%)	SIR med TM-ERB (dB)
QUAL	7,9	20,0	67,4	2,36	1,7	19,2
RANDOM	6,9	20,5	73,0	3,29	1,1	18,8
PREÇO	5,4	22,5	78,6	5,04	1,1	18,4
CHANSO	6,2	20,1	72,6	3,18	1,5	18,8
RUP	6,4	20,0	73,5	3,49	1,3	18,7

tabela 4.28 - Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-AI com mobilidade, controle de potência e sob o mesmo tráfego gerado (3800 Erlangs).

Da mesma forma que no caso sem mobilidade, a tabela 4.28 mostra que os algoritmos DCA-AI com controle de potência possuem desempenho semelhante em todas as medidas de desempenho. O algoritmo PREÇO foi o que forneceu a menor probabilidade de bloqueio, mas também foi o que forneceu a maior instabilidade. O algoritmo QUAL ofereceu novamente probabilidade de bloqueio e estabilidade ligeiramente superiores. Os algoritmos RANDOM, RUP e CHANSO mostraram praticamente desempenhos iguais, com ligeira vantagem dessa vez para o algoritmo CHANSO.

Este resultado confirma que a mobilidade não afeta o comportamento relativo entre os algoritmos DCA-AI com controle de potência.

A figura 4.34 mostra que as medidas relativas entre os algoritmos DCA-AI apresentadas na tabela 4.28 e as conclusões se mantêm em outros tráfegos gerados também. Note que, dado que os algoritmos estão operando sob os mesmos parâmetros, e isto inclui os níveis de SIR de Aceitação que foram simulados com valores iguais ao nível de SIR mínimo, as medidas apresentadas na figura 4.34 representam a condição de máxima capacidade.

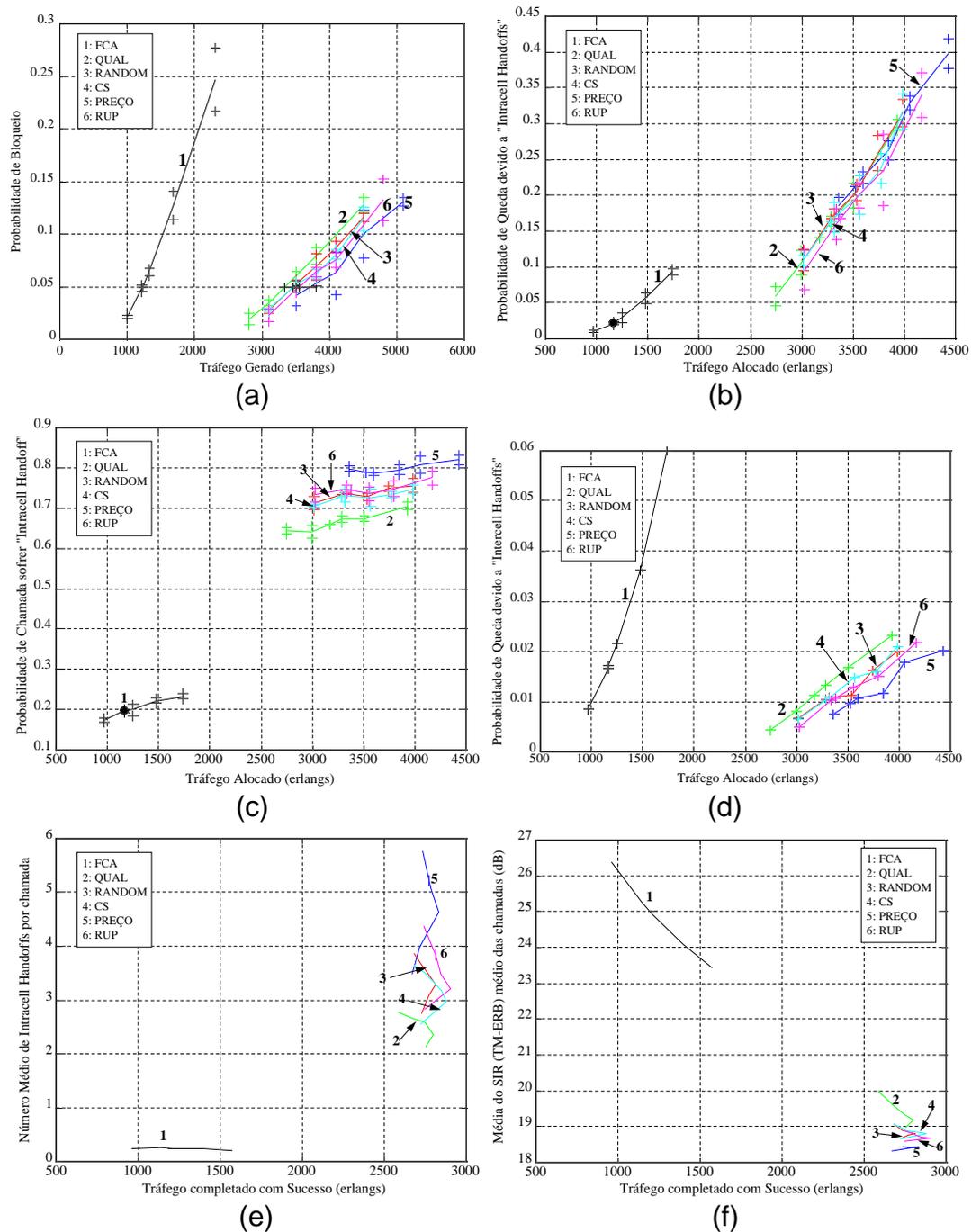


Fig. 4.34 - Medidas de Desempenho de Algoritmos DCA-AI com controle de potência operando em sistema com 25% de mobilidade e com mesmo conjunto de parâmetros (máxima capacidade)

- (a): probabilidade de bloqueio de novas chamadas;
 (b): probabilidade de queda de chamadas devido a "intracell handoffs";
 (c): probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoffs";
 (d): probabilidade de queda de chamadas devido a "intercell handoffs";
 (e): número médio de "intracell handoffs" por chamadas;
 (f): Média dos níveis de SIR médio das chamadas completadas.

4.4.4.4. Análise de Capacidade de Tráfego dos Algoritmos DCA-AI

Ao equalizar os algoritmos, pode-se fazer a comparação adequada entre a capacidade de cada um dos algoritmos, permitindo também uma melhor comparação entre algoritmos sob outros parâmetros de desempenho. O ajuste de equalização foi feito da mesma forma que nos cenários anteriores.

Após diversas simulações, os diversos níveis de SIR de Aceitação foram ajustados para os valores mostrados na tabela 4.29.

Algoritmo	SIR de Aceitação (dB)	Prob. de Queda por "Intracell Handoff" (a 5% prob. bloqueio)(%)	Prob. de Queda por "Intercell Handoff" (a 5% prob. bloqueio) (%)	nível de SIR_10% SIR TM-ERB / SIR ERB-TM (dB)
FCA	15,0	2,2	1,7	21 / 21
QUAL	22,0	2,6	1,8	23 / 23
RANDOM	23,0	2,5	1,9	23 / 23
CHANSO	22,5	2,7	1,8	23 / 23
PREÇO	24,0	2,5	2,0	24 / 24
RUP	23,0	2,5	1,9	23 / 23

Tabela 4.29 - Níveis de SIR de Aceitação ajustados para equalização de qualidade e estabilidade entre algoritmos DCA-AI, com 25% de mobilidade no sistema.

Pelos resultados apresentados na tabela 4.29, pode-se observar que os algoritmos satisfazem à condição de equalização. Da mesma forma que mostrado no caso sem controle de potência, os níveis alcançados pelo SIR de Aceitação foram muito superiores aos valores ajustados na condição sem mobilidade no sistema devido à maior variação de interferência nas chamadas ativas.

Novamente o fator limitante para a equalização no caso com mobilidade foi a probabilidade de queda de chamadas por intracell handoff. Deve-se observar entretanto que os algoritmos com controle de potência necessitaram margens menores para conseguir alcançar o nível requerido.

Uma vez equalizados, a capacidade de tráfego dos algoritmos DCA-AI com respeito à capacidade de tráfego do algoritmo FCA foram comparadas. Dado que a comparação será feita sobre 5% de probabilidade de bloqueio, os algoritmos foram

simulados somente em níveis de tráfego próximos a este ponto. Conforme verificado para o caso sem mobilidade, acredita-se que o aumento no nível de SIR somente causará deslocamento nas curvas de desempenho do caso de máxima capacidade.

O ganho de capacidade sobre o algoritmo FCA fornecido por cada algoritmo DCA equalizado a 5% de probabilidade de bloqueio e com mesma probabilidade de queda está ilustrado na figura 4.35.

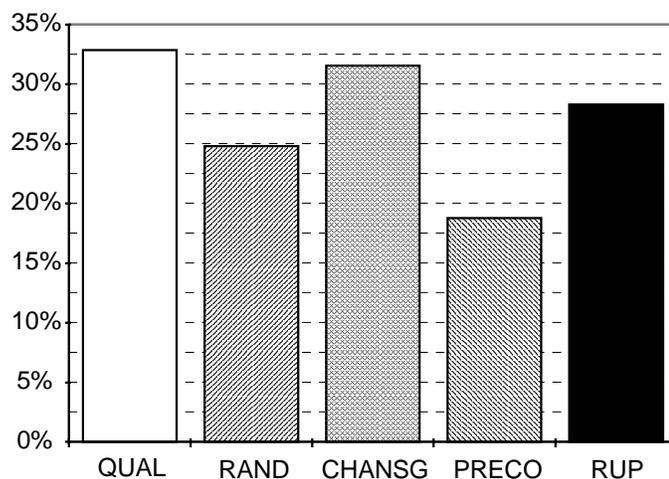


figura 4.35 - Ganho de Capacidade de Algoritmos DCA-AI com controle de potência sobre FCA no ponto de operação, com equalização, e na condição de sistema operando com 25% de mobilidade.

Pode-se observar que a mobilidade dos usuários resultou na redução do ganho de capacidade dos algoritmos DCA. Os ganhos se mostraram modestos, variando de 19% a 33%.

A redução no ganho de capacidade foi causada pelo maior SIR de Aceitação necessário para tornar os algoritmos DCA-AI estáveis e comparáveis. Sob outro ponto de vista, a perda foi devida ao fato dos algoritmos DCA não mais poderem se aproveitar da margem de projeto referente à localização dos usuários na célula. Deve-se lembrar que o algoritmo FCA possui baixa capacidade porque considera como margem de projeto que os usuários estariam operando na fronteira da célula. Sem mobilidade, os algoritmos DCA-AI conseguem obter altos ganhos de capacidade ao eliminar esta margem. Com a introdução da mobilidade dos TMs, os algoritmos, tentando limitar a probabilidade de queda das chamadas, terminam por

não poder aproveitar-se desta margem, tendo de alocar as chamadas com uma margem suficiente para permitir que o usuário possa trafegar dentro da célula.

Os algoritmos DCA novamente apresentaram ganhos semelhantes, com ligeira vantagem para o algoritmo QUAL (33% de ganho de capacidade), já que este foi o que precisou da menor margem de SIR de Aceitação para equalização.

Da mesma forma que no caso sem controle de potência, comparando os resultados de ganho de capacidade da figura 4.35 com os relatados na tabela 4.16, referente ao sistema sem mobilidade, o ganho dos algoritmos DCA-AI são muito penalizados com a introdução da mobilidade.

A figura 4.36 ilustra a probabilidade de queda de chamadas por "intracell handoffs" e a probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoff" com os algoritmos equalizados.

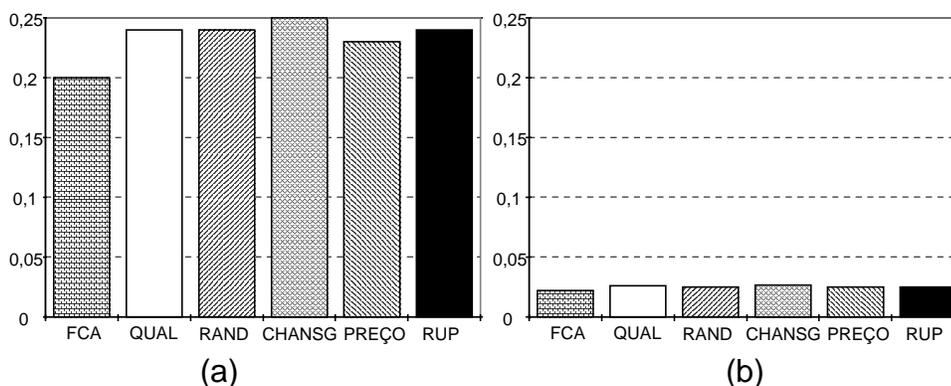


Fig. 4.36 - (a) Probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" e (b) Probabilidade de Queda de Chamadas por "intracell handoff" com algoritmos operando a 5% de probabilidade de bloqueio, com controle de potência e na condição equalizada e com 25% de mobilidade.

A partir da figura 4.36 pode-se verificar que todos os algoritmos estavam operando de forma equalizada, com aproximadamente 2,5% de probabilidade de queda por "intracell handoff"; estando portanto mais estáveis.

A figura 4.36 também ilustra a probabilidade de uma chamada sofrer "intracell handoffs". Com equalização, esta medida varia de 23% a 25% nos algoritmos DCA-AI; enquanto, se a equalização não fosse aplicada, estes valores variariam de 66% a 79% (figura 4.34-c). Isto mostra que o aumento no SIR de Aceitação também reduziu bastante a ocorrência de "intracell handoffs" nas chamadas em andamento.

Esta redução pode ser verificada também no número médio de "intracell handoffs" por chamada. Com equalização, este número varia de 0,28 a 0,49 (figura não apresentada); enquanto, a faixa de variação na condição de máxima capacidade seria de 2,65 a 6,01 (figura 4.34-e). A redução nestes valores gerará uma menor carga de processamento de pedidos de "intracell handoff" no algoritmo, facilitando a implementação destes algoritmos.

Deve-se observar que a maior estabilidade dos algoritmos é devida não somente ao menor tráfego cursado, mas também à margem adicional no SIR de Aceitação. Conforme anteriormente explicado, o maior nível de SIR de Aceitação faz com que as chamadas sejam alocadas com uma margem sobre o SIR mínimo. Assim, a chamada possui maior resistência a aumentos de interferência em sua chamada.

A mobilidade dos TMs exigiu que os níveis de SIR de Aceitação fossem bem superiores aos utilizados no caso sem mobilidade. Isto era esperado, pois a mobilidade dos TMs causa uma variação maior na interferência sentida pelos TMs ativos. Entretanto, as margens de equalização foram menores que as utilizadas no caso sem controle de potência com mobilidade, provavelmente devido à maior facilidade de realocar chamadas em "intracell handoff" que o controle de potência permite; entretanto, maiores estudos devem ser feitos para confirmar tal hipótese.

Durante as simulações com os algoritmos equalizados, contabilizou-se novamente os histogramas de qualidade (SIR) das chamadas. A figura 4.37 apresenta os histogramas obtidos.

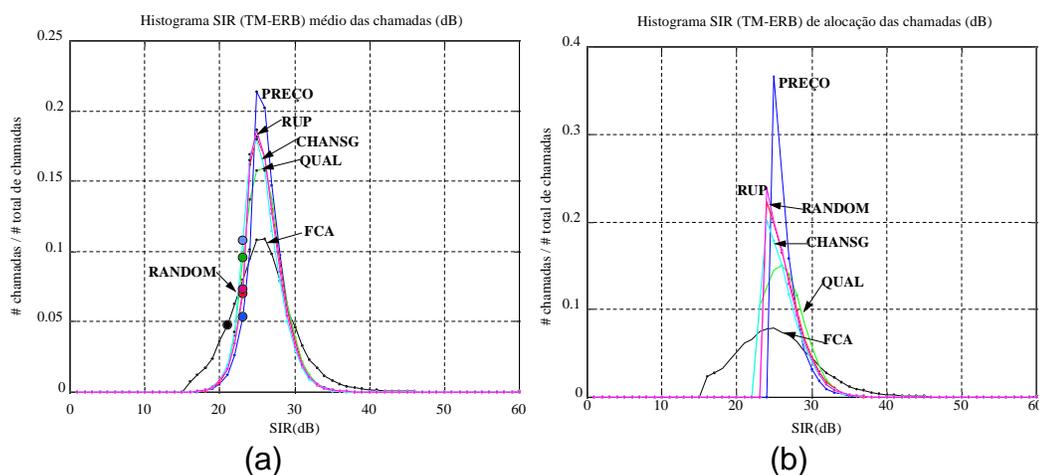


figura 4.37 - Histograma de SIR de Chamadas para algoritmos operando a 5% de probabilidade de bloqueio, com controle de potência e com 25% de mobilidade.

(a) Histograma de SIR médio de Chamadas bem sucedidas

(b) Histograma de SIR de Alocação de Chamadas alocadas

O histograma de SIR médio, mostrado na figura 4.37-a confirmou que os algoritmos DCA possuíam nível de "SIR_10%" igual ou superior ao nível de "SIR_10%" do FCA. O histograma de SIR de alocação ilustra as diferentes margens utilizadas para cada algoritmo. Pode-se observar neste histograma que a maioria das chamadas foi alocada com SIRs variando de 24dB a 30dB, fornecendo uma boa margem para as variações de SIR causadas pela mobilidade dos usuários.

4.4.4.5. Verificação Teórica

A relação (3.34) (item 3.2.4.3) foi novamente aplicada a fim de verificar se os resultados obtidos neste item estão dentro dos limites teóricos.

A tabela 4.30 apresenta os dados para cálculo e os resultados para cada um dos algoritmos DCA-AI considerados:

Algoritmo	Média do SIR médio (dB)	nível SIR10% (dB)	N_e^{34}	limite inferior ³⁵ $\frac{Cm_{DCA-AI}}{Cm_{FCA}}$	limite superior $\frac{Cm_{DCA-AI}}{Cm_{FCA}}$
FCA	25,3	21	-	-	-
Melhor Qualidade (QUAL):	25,5	23	5,69	0,59	1,83
Randômico (RANDOM):	25,5	23	5,69	0,59	1,83
Melhor Preço (PREÇO):	25,6	23	5,75	0,59	1,81
"Channel Segregation" (CHANSO)	25,1	23	5,43	0,62	1,92
Partição de Reuso (RUP)	25,4	23	5,62	0,60	1,85

Tabela 4.30 - Limites Teóricos para algoritmos DCA-AI com controle de potência equalizados e simulados na condição de 25% de mobilidade.

Ao subtrair um de cada um dos limites da tabela 4.23 obtém-se os limites de ganho de capacidade, podendo-se observar que os resultados apresentados na figura 4.35 estão dentro dos limites teóricos.

Novamente utilizou-se a formulação teórica desenvolvida em 3.2.4 e 4.2.3.5.1 nos resultados de variação do número médio de chamadas em andamento e de SIR médio de cada algoritmo. As tabelas 4.31 e 4.32 apresentam as variações obtidas

³⁴ obtido através das relações (3.31), (3.32) e (3.33) do item 3.2.4.3.

nas simulações e as esperadas através da análise teórica para o caso com controle de potência e mobilidade.

Algoritmo	número médio de usuários ativos (máx. capacidade)	número médio de usuários ativos (equalizado)	diferença (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	2663	1457	-45%
Randômico (RANDOM):	2672	1370	-49%
Melhor Preço (PREÇO):	2680	1432	-47%
"Channel Segregation" (CHANSG)	2667	1308	-51%
Partição de Reuso (RUP)	2721	1401	-49%

Tabela 4.31: Diferenças de número médio de usuários ativos entre as condições de máxima capacidade e com equalização, medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema operando com controle de potência e com 25% de mobilidade.

Algoritmo	SIR médio TM-ERB³⁶ condição de máxima capacidade (dB)	SIR médio TM-ERB condição com equalização (dB)	diferença teórica (4.10) (%)
Melhor Qualidade (QUAL):	19,4	25,5	-51%
Randômico (RANDOM):	18,9	25,5	-53%
Melhor Preço (PREÇO):	18,4	25,1	-51%
"Channel Segregation" (CHANSG)	18,9	25,6	-56%
Partição de Reuso (RUP)	18,8	25,4	-53%

Tabela 4.32: Diferenças teóricas esperadas entre as condições de máxima capacidade e com equalização, a partir da relação (4.10), medidas obtidas a 5% de probabilidade de bloqueio, em sistema operando com controle de potência e com 25% de mobilidade.

Novamente os valores de SIR e de capacidade obtidos nas simulações são relacionados através da teoria. As discrepâncias encontradas provavelmente são devidas à maior probabilidade de queda de chamadas devido à falha de "intracell handoff" no caso de máxima capacidade, não permitindo que essas chamadas sejam contabilizadas no SIR médio resultante.

³⁵ foi utilizado " δ "=0,37 conforme tabela 3.1.

³⁶ os valores de SIR no sentido ERB-TM não foram mostrados pois estão bem próximos aos valores de SIR TM-ERB apresentados.

4.4.4.6. Resumo das Observações sobre Mobilidade em Algoritmos DCA com Controle de Potência

As análises dos itens 4.4.4.1 a 4.4.4.3 mostraram que o efeito causado pela mobilidade é independente do efeito do controle de potência. Ambos efeitos se combinam resultando nos desempenhos apresentados neste item.

Dessa forma, mesmo no caso com mobilidade, os algoritmos DCA-AI com controle de potência possuem desempenho semelhante em todas as medidas de desempenho.

Observou-se, da mesma forma que no caso sem controle de potência, que a mobilidade aumenta a instabilidade dos algoritmos.

Os algoritmos foram equalizados para permitir a análise de ganho de capacidade de tráfego sobre o algoritmo FCA. Novamente o fator limitante para a equalização no caso com mobilidade foi a probabilidade de queda de chamadas por “intracell handoff”. Novamente a mobilidade dos usuários resultou na redução do ganho de capacidade dos algoritmos DCA. Os ganhos se mostraram modestos, variando de 19% a 33%.

Esta redução de ganho de capacidade foi devida ao fato dos algoritmos DCA não poderem mais se aproveitar totalmente da margem de projeto referente à localização dos usuários na célula.

Dentre os algoritmos DCA, o algoritmo QUAL foi o que forneceu melhor capacidade na condição equalizada com controle de potência e com mobilidade, oferecendo 33% de ganho de capacidade sobre o algoritmo FCA.

Os resultados obtidos estavam dentro do limite teórico de capacidade e os valores de SIR e capacidade foram relacionados através da análise teórica.

4.5. Influência do Número de Transceptores Equipados nas ERBs

Os resultados apresentados nos itens anteriores consideraram que as ERBs nos algoritmos DCA estariam equipadas com transceptores em número igual ao número de canais no sistema (70 canais). Esta consideração permitiria que uma única ERB suportasse até 70 chamadas simultâneas. Obviamente tal situação dificilmente ocorreria porque o tráfego é uniformemente distribuído pela área de serviço do sistema, não permitindo o uso do mesmo canal entre ERBs próximas a fim de evitar interferência co-canal.

Dessa forma, nas simulações anteriores de algoritmos DCA, as chamadas foram bloqueadas devido exclusivamente à falta de canais com condições favoráveis de interferência.

Dado que uma ERB dificilmente estará utilizando os 70 canais simultaneamente, e a fim de evitar o custo de equipar todas as ERBs com a totalidade de canais, será analisada a influência da redução no número de transceptores por ERB. Esta análise também foi feita em outros trabalhos, entretanto, os resultados foram obtidos através de simulações em diferentes cenários e somente para alguns algoritmos [10,13,18,22,40].

Simularam-se os diversos algoritmos sob diferentes tráfegos gerados e sob o mesmo cenário utilizado nas simulações anteriores. A única modificação foi em relação ao número de transceptores equipados nas ERBs. Considerou-se a situação sem mobilidade de usuários.

Deve-se observar que está-se considerando que os transceptores poderão acessar qualquer canal disponível no sistema. Note que nos sistemas em uso atualmente, os transceptores e seu sistema de radiação (combinadores, cabos, antenas) são sintonizados para operação fixa em um único canal. Ao utilizar algoritmos DCA, dado que o canal a ser utilizado na ERB é definido no momento da alocação, os transceptores e seus sistemas de antenas deverão ser capazes de se auto-ajustar para acessar o canal definido pelo algoritmo. Além disso, o auto-ajuste deve ser rápido o suficiente para não onerar o tempo de estabelecimento da chamada. As simulações deste item consideraram que os ajustes são possíveis, e o tempo de ajuste para novas chamadas foi considerado instantâneo. Entretanto, não

se considerou ajuste instantâneo para transceptores em uso. Isto significa que "intracell handoffs" de chamadas em andamento exigem a troca do transceptor também pois o transceptor não consegue se reajustar instantaneamente a um novo canal. Dessa forma, se não existir um transceptor disponível durante um "intracell handoff", a chamada será interrompida.

Simularam-se os cenários com 20, 15 e 10 transceptores nas condições sem e com controle de potência. Dada a distribuição rígida do plano de frequências, o algoritmo FCA foi sempre simulado com 10 transceptores. O SIR de Aceitação foi ajustado considerando-se sempre as condições de equalização de estabilidade e qualidade das chamadas.

4.5.1 Limitação de Transceptores: Caso sem Controle de Potência

A figura 4.38 resume os resultados encontrados para os algoritmos DCA sem controle de potência:

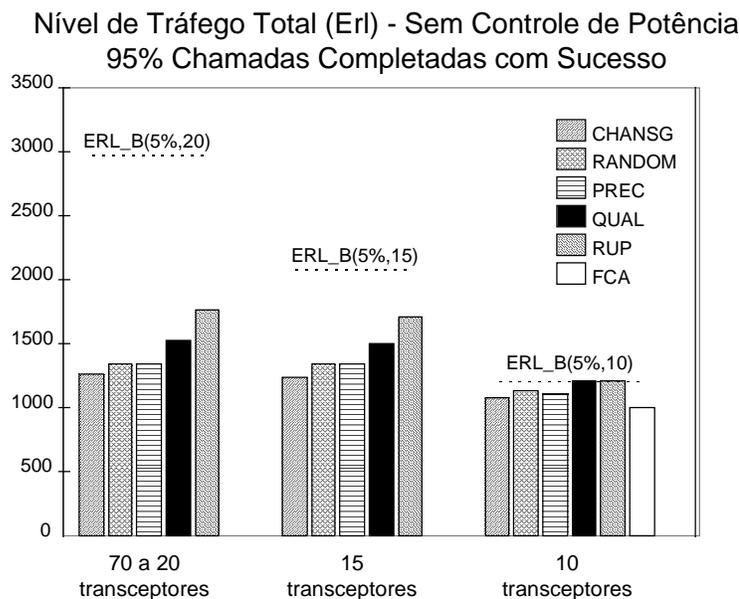


Fig. 4.38 - Influência da quantidade de transceptores em algoritmos DCA-AI sem controle de potência e equalizados.

A capacidade mostrada no eixo das ordenadas representa o tráfego total cursado por cada algoritmo em cada condição. O tráfego total mostrado se refere ao tráfego para 95% das chamadas bem sucedidas; isto é, que foram aceitas e que não foram interrompidas durante eventuais mudanças de canal.

O caso de 20 transceptores mostrou desempenho praticamente igual ao caso de 70 transceptores. Este caso está representado à esquerda do gráfico da figura 4.38. O desempenho de 20 transceptores foi igual ao de 70 transceptores porque o sistema continua sofrendo bloqueio exclusivamente pelas condições de interferência dos canais. Observe na figura 4.38 que o nível de capacidade que 20 transceptores (ERL_B(5%,20)) poderiam cursar para 5% de probabilidade de bloqueio é muito superior ao nível sendo utilizado neste cenário.

As curvas de probabilidade de queda e interferência também foram levantadas. O desempenho encontrado foi idêntico ao caso de 70 transceptores. O desempenho com respeito ao SIR médio das chamadas também foi bem semelhante ao caso de 70 transceptores, com pequenas diferenças (~0,2dB) nos algoritmos RANDOM e PREÇO.

A figura 4.38 também apresenta os resultados para o cenário com 15 transceptores. Note que o nível de tráfego correspondente a ERL_B(5%,15) está superior ao nível de tráfego sendo utilizado neste cenário. A maior proximidade do nível ERL_B(5%,15) do nível de tráfego sendo utilizado no cenário causou uma ligeira degradação no desempenho do sistema. Isto é, com 15 transceptores, começa a haver bloqueio por falta de transceptores. A degradação foi pequena, variando de 0,7% (algoritmo PRECO) até 2,8% (algoritmo QUAL). As medidas de probabilidade de queda e de chamadas sofrerem "intracell handoff" também sofreram pequenas variações. O SIR médio das chamadas sofreu um pequeno aumento devido à pequena queda no tráfego cursado, sendo inferior a 0,3dB em todos os algoritmos.

O cenário com 10 transceptores está representado à direita da figura 4.38 e mostra o desempenho dos algoritmos DCA juntamente com o do algoritmo FCA. Nota-se que todos os algoritmos estão agora limitados à capacidade definida por ERL_B(5%,10). Isto significa que grande parte dos bloqueios se deve agora à falta de transceptores. Bloqueios devido a condições de interferência desfavoráveis ainda estão presentes, mas em menor quantidade que anteriormente.

Note que o algoritmo FCA não alcança a capacidade máxima definida por ERL_B(5%,10) devido às condições de interferência desfavoráveis que eventualmente ocorreram nas ERBs. Deve-se lembrar que o algoritmo FCA somente

pode alocar um canal se este não estiver sendo utilizado em sua ERB e esteja com SIR superior ao SIR de Aceitação. Este fato sugere uma vantagem adicional de algoritmos DCA sobre FCA: enquanto uma ERB no FCA pode escolher um canal dentre somente 10 canais (neste cenário), algoritmos DCA podem escolher um canal dentre a totalidade dos canais (70 neste cenário), mesmo que não possa utilizar mais que 10 simultaneamente. Isto explica o melhor desempenho dos algoritmos DCA comparando-os com o FCA mesmo no caso de 10 transceptores.

Note ainda que dentre os algoritmos, o algoritmo RUP foi o que forneceu a maior capacidade para a mesma probabilidade de sucesso, conseguindo praticamente a capacidade máxima permitida. O algoritmo QUAL foi o segundo melhor algoritmo, seguido dos algoritmos PREÇO, RANDOM e CHANSG. O algoritmo QUAL se sobressaiu sobre os outros algoritmos devido à sua menor probabilidade de queda, pois exigiu menor aumento nos níveis de SIR de Aceitação para a equalização.

Os algoritmos mostraram ligeiras modificações nas probabilidades de queda e de chamada sofrer "intracell handoff" com a redução de transceptores para 10. Os algoritmos QUAL, RANDOM e CHANSG mostraram pequena redução na probabilidade de queda (de 0,8% para 0,4% no algoritmo QUAL, de 1,8% para 1,6% nos algoritmos RANDOM e CHANSG) devido às reduções nas respectivas probabilidades da chamada sofrer "intracell handoff". Note que esta probabilidade diminui porque sendo menor o tráfego alocado gera-se menos interferência nas chamadas em andamento.

Os algoritmos RUP e PREÇO sofreram ligeiros aumentos na probabilidade de queda (de 0,2% para 0,7% em RUP, de 3% para 4% em PREÇO). Os aumentos nos algoritmos RUP e PREÇO podem ser justificados pela fato da probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" nestes algoritmos ter-se mantido aproximadamente constante. Com a redução dos transceptores, a probabilidade de queda quando uma chamada está em "intracell handoff" aumenta, justificando o aumento na probabilidade de queda destes algoritmos.

Com respeito à qualidade das chamadas, o menor tráfego sendo cursado permitiu que as chamadas tivessem um aumento no SIR médio. O algoritmo QUAL foi o algoritmo que mais se beneficiou, mostrando um aumento de 2,5dB sobre o

caso com 70 transceptores. O restante dos algoritmos mostrou aumentos variando de 0,8dB (algoritmo PREÇO) a 1,1dB (algoritmo CHANSG).

Os resultados alcançados com respeito ao SIR médio das chamadas mostraram um fenômeno interessante. As curvas de SIR médio para 70, 20, 15 e 10 transceptores eram curvas coincidentes sobre o mesmo tráfego. A figura 4.39 mostra a curva de SIR médio do algoritmo QUAL nas diversas condições. Os diferentes resultados de SIR médio se referiam aos diferentes tráfegos cursados para o mesmo grau-de-serviço. Isto significa que a relação entre SIR e capacidade do item 3.2.4 continuam válidas.

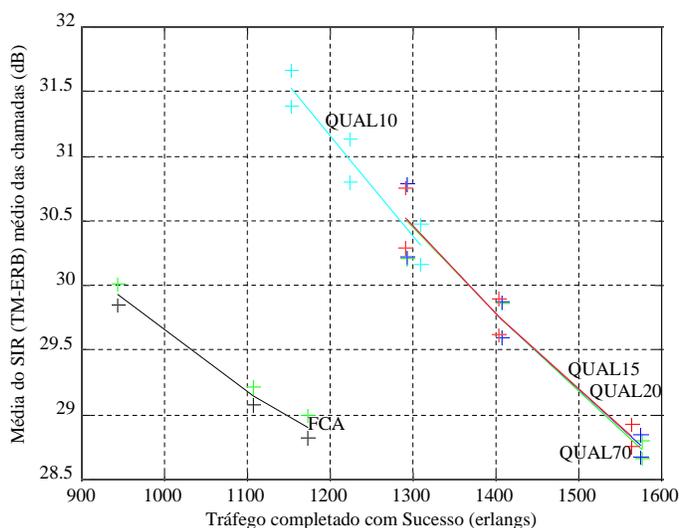


Fig. 4.39 - Variação do SIR médio das chamadas com o tráfego completado para algoritmo QUAL sem controle de potência sob diversos efeitos de limitação de transceptores³⁷

4.5.2 Limitação de Transceptores: Caso com Controle de Potência

A mesma análise foi feita para o caso de algoritmos utilizando controle de potência.

Os cenários e o controle de potência utilizados foram os mesmos do item 4.3. Os algoritmos foram sempre equalizados com respeito a estabilidade e qualidade das chamadas.

A figura 4.40 apresenta os resultados para a condição com controle de potência.

³⁷ "QUALxx" representa a situação onde o algoritmo QUAL possui "xx" transceptores para trafegar as

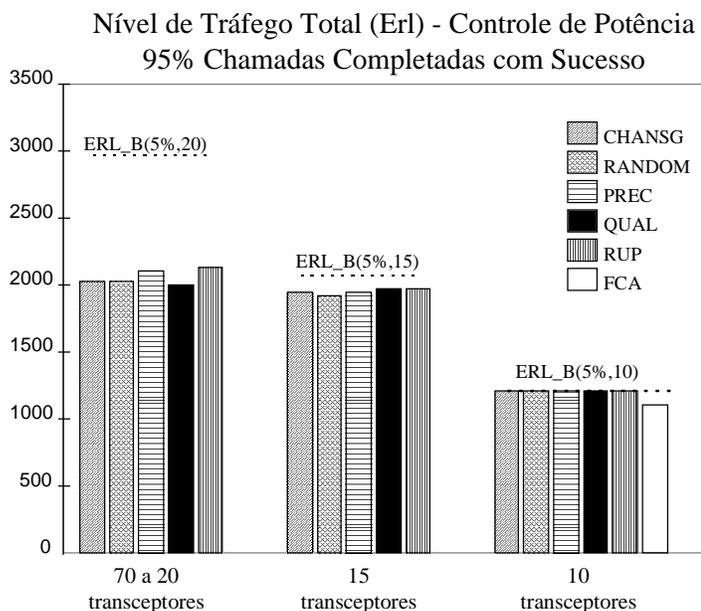


Fig. 4.40 - Influência da quantidade de transceptores em algoritmos DCA-AI com controle de potência e equalizados.

O caso de 20 transceptores novamente mostrou desempenho praticamente igual ao caso de 70 transceptores pois o sistema continua sofrendo bloqueio exclusivamente pelas condições de interferência dos canais. As diversas curvas referentes aos outros critérios de desempenho também se mantiveram bem semelhantes ao caso de 70 transceptores.

No cenário com 15 transceptores, os algoritmos se mostraram limitados pela capacidade máxima de $ERL_B(5\%,15)$. Note que os algoritmos sobre controle de potência tiveram desempenho semelhante e ligeiramente inferior ao desempenho máximo definido por $ERL_B(5\%,15)$.

As diferenças na probabilidade de queda com a redução para 15 transceptores não foram perceptíveis. Isto pode ser justificado pelo fato do nível de capacidade com 70 transceptores ser bem semelhante ao nível $ERL_B(5\%,15)$. Dessa forma, a redução na probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff” foi pequena, sendo compensada pelo ligeiro aumento na probabilidade de queda quando a chamada está em “intracell handoff”.

Com relação ao SIR médio das chamadas, a pequena redução na capacidade do sistema, no caso de 15 transceptores, também influenciou pouco o SIR médio das chamadas, mostrando um ligeiro aumento de 0,25dB nos algoritmos CHANSNG,

RANDOM e RUP. O algoritmo PREÇO mostrou um aumento pequeno ($\sim 0,05\text{dB}$) enquanto que QUAL não mostrou aumento, dado que se manteve praticamente no mesmo nível de capacidade.

No cenário com 10 transceptores, os algoritmos novamente se mostraram limitados pela capacidade máxima de ERL_B(5%,10). Note que os algoritmos com controle de potência tiveram desempenho muito semelhante entre si e ligeiramente inferior ao desempenho máximo definido por ERL_B(5%,10). Nesta parte do gráfico, pode-se observar que o FCA teve comportamento inferior ao comportamento previsto pela formulação de Erlang B. A razão para tal diferença é a mesma já apontada no caso sem controle de potência.

As outras figuras de desempenho tiveram ligeiras mudanças que podem ser observadas na tabela 4.33.

Algoritmo DCA	prob. Da chamada sofrer "intracell handoff" (%)		prob. queda devido à falha no "intracell handoff" (%)		# médio de "intracell handoffs" por chamada		SIR TM-ERB ³⁸ médio de chamadas (dB)	
	70 tr.	10tr.	70 tr.	10tr.	70 tr.	10tr.	70 tr.	10tr.
QUAL	17,0	6,0	2,2	0,7	0,25	0,08	22,9	28,2
RANDOM	20,0	14,0	2,7	1,6	0,32	0,18	22,0	24,7
CHANSO	20,0	10,0	2,5	1,0	0,30	0,11	22,0	25,0
PREÇO	24,0	21,0	3,0	3,0	0,40	0,35	21,3	21,7
RUP	19,5	15,0	2,5	2,0	0,31	0,21	21,9	22,7

Tabela 4.33 - Medidas de estabilidade e qualidade em algoritmos DCA-AI, com controle de potência e sob efeito de limitação de transceptores.

Observando as outras figuras de desempenho, verifica-se que a probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff", no caso com controle de potência, diminuiu sensivelmente com a redução do número de transceptores para 10. A justificativa para tal queda é diretamente relacionada com o menor tráfego sendo cursado.

Observou-se também o aumento no SIR médio de todos os algoritmos devido à redução no tráfego cursado. A alta redução no tráfego cursado mostrou aumentos de SIR médio variando de 0,4dB (algoritmo PREÇO) a 5,3dB (algoritmo QUAL) na condição de 10 transceptores.

³⁸ valores de SIR médio no sentido ERB-TM se mostraram bem semelhantes aos valores apresentados.

Observou-se novamente que as curvas de SIR médio para 70, 20, 15 e 10 transceptores foram curvas coincidentes sobre o mesmo tráfego.

4.5.3. Resumo das Observações

Os resultados acima mostram que não é necessário equipar as ERBs com o número máximo de transceptores. De fato, o número de transceptores pode ser bem inferior ao número de canais. Como regra geral, se o número "NTR" de transceptores é tal que "ERL_B(5%,NTR)" é maior que a capacidade resultante no cenário com 70 transceptores, o sistema terá a maior parte de seus bloqueios devido a condições de interferência desfavoráveis. Assim, o número de transceptores necessários pode ser calculado facilmente a partir da capacidade resultante no cenário de 70 transceptores e de uma tabela de Erlang-B.

No cenário estudado, 15 transceptores são suficientes para se conseguir 97% e 95% da capacidade total dos algoritmos DCA no caso sem e com controle de potência respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados em [10,18,22,40].

Caso a condição acima não seja satisfeita, o sistema terá a maior parte de seus bloqueios devida à falta de transceptores na ERB e a capacidade dos algoritmos DCA será limitada pela formulação de Erlang-B. Note que mesmo no caso de 10 transceptores equipados por ERB, os algoritmos DCA tem desempenho superior ao algoritmo FCA pois este último também sofre com o bloqueio devido às condições de interferência desfavoráveis. Inclusive, o algoritmo FCA sofre bem mais com este bloqueio pois possui somente 10 canais para escolher, enquanto os algoritmos DCA podem escolher dentre todo o conjunto de 70 canais.

Ao reduzir o número de transceptores, o desempenho dos algoritmos tende a se igualar. Esta conclusão também foi encontrada em [60]. O caso sem controle de potência ainda mostrou uma ligeira diferença de desempenho entre os algoritmos, entretanto, a diferença percentual é menor dado que as capacidades foram reduzidas. No caso com controle de potência, as diferenças de desempenho foram ainda menores que no caso com 70 transceptores, confirmando que algoritmos

simples como RANDOM e QUAL podem ser mais indicados quando controle de potência é utilizado.

Pode-se verificar também que a limitação no número de transceptores equipados por ERB não afeta tanto os parâmetros referentes à instabilidade e qualidade. Inclusive a redução do número de transceptores evita alto tráfego cursado, melhorando o desempenho dos algoritmos com respeito a estes fatores.

5. Aplicação de DCA em Sistemas TDMA

Sistemas TDMA possuem seus canais divididos em diversas portadoras de canais, onde cada canal ocupa seqüencialmente 1 período de tempo ("time-slot"). Dentro de cada "time-slot", ERBs e TMs reutilizando a mesma portadora irão sofrer interferência co-canal de forma similar ao sistema FDMA/analógico.

Note que, se o sistema estivesse totalmente sincronizado, as diversas condições de interferências que venham a ocorrer dentro de um "time-slot" seriam independentes das condições de interferência dos outros "time-slots". Isto é, o "time-slot" "1" de uma portadora "po" somente sofreria interferências do "time-slot" "1" de outras ERBs e TMs reutilizando a mesma portadora "po", sem importar o que acontece em outro "time-slot" "m" desta mesma portadora. A figura 5.1 auxilia no entendimento.

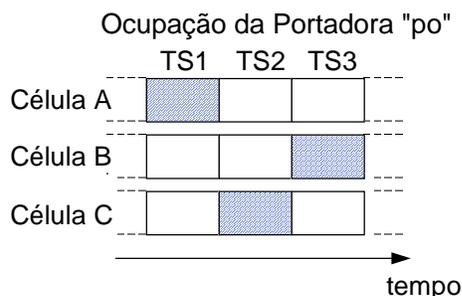


Fig. 5.1 - Sistema TDMA totalmente sincronizado, onde "time-slots" da mesma portadora reutilizada em outras células não interferem entre si.

Na figura 5.1, pode-se observar que os TMs operando nos "time-slots" 1, 3 e 2 nas células A, B e C não interferem entre si, apesar de gerarem interferências nos respectivos "time-slots" destas células.

Neste caso, as considerações e conclusões de algoritmos DCA em sistemas FDMA/analógicos se aplicam diretamente a sistemas TDMA e cada "time-slot" pode ser considerado como um canal independente.

Deve-se observar entretanto que as condições acima representam um sistema TDMA ideal. Sistemas TDMA reais impõem limitações que devem ser

consideradas na análise do uso de algoritmos DCA. Os principais aspectos a considerar são:

- falta de sincronismo entre portadoras;
- dificuldade dos transceptores sintonizarem diferentes portadoras e potências entre "time-slots" de forma rápida.

5.1. Imperfeições de Sistemas TDMA Reais

5.1.1. Falta de Sincronismo

A ilustração da figura 5.1 mostra um sistema TDMA ideal que possui sincronismo entre portadoras desejada e interferentes. Sincronismo significa que um "time-slot" "1" de uma dada portadora "po" irá interferir e sofrer interferência somente dos "time-slots" "1" de outras ERBs e TMs utilizando a mesma portadora "po".

Se o sincronismo for retirado, os "time-slots" "1" começarão a interferir em outros "time-slots" "m" da mesma portadora sendo utilizada por outras ERBs e TMs. A figura 5.2 auxilia o entendimento.

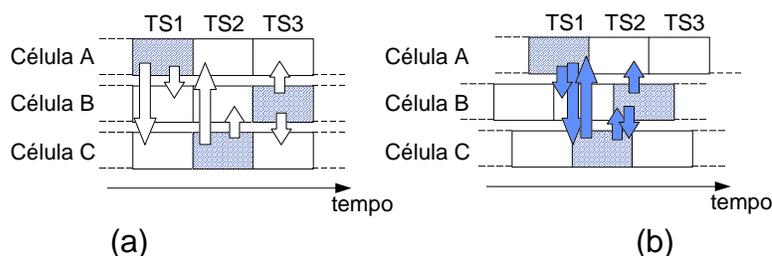


Fig. 5.2 - Interferência adicional gerada pelo falta de sincronismo entre portadoras das células.

- (a): situação com sincronismo entre ERBs (flechas brancas indicam interferência gerada pelos "time-slots" ocupados)
- (b): situação sem sincronismo entre ERBs (flechas escuras indicam interferência adicional gerada pelos "time-slots" ocupados)

Ao perder o sincronismo, conforme mostrado na figura 5.2-b, os TMs começam a se interferir, apesar de utilizarem "time-slots" diferentes. Note na figura 5.2 que o TM utilizando o TS3 da Célula B gera, por exemplo, interferência em 2 "time-slots" livres da célula A no caso sem sincronismo, dificultando a ocupação dos mesmos.

Conforme ilustrado na figura 5.2, a falta de sincronismo provoca casos onde um "time-slot" interfere em 2 "time-slots" de uma outra célula. Este fenômeno representa não somente uma degradação adicional no SIR das chamadas em andamento, mas também provoca uma maior probabilidade de bloqueio de uma nova chamada, pois "time-slots" livres, que antes não sofriam interferência, começam a sofrer interferência causada por chamadas em outras células operando em outros "time-slots" da mesma portadora.

Uma forma de minimizar o impacto da falta de sincronismo em sistemas TDMA é maximizar a utilização de "time-slots" nas portadoras em uso nas ERBs. Observe que se uma portadora estiver ocupando 1 único "time-slot", esta mesma portadora sendo utilizada em outra célula sentirá interferência em 2 "time-slots". Comparando com o caso sincronizado, esta situação equivale a 100% mais "time-slots" sofrendo interferência. Caso a portadora esteja ocupando 2 "time-slots", ERBs utilizando a mesma portadora sentirão interferência em 3 "time-slots", o equivalente a 50% mais "time-slots" sofrendo interferência. Caso a portadora esteja utilizando a totalidade dos "time-slots", ERBs utilizando a mesma portadora sentirão interferência na mesma totalidade; ou seja 0% mais "time-slots" sofrendo interferência. Assim, a fim de minimizar o efeito da falta de sincronismo, é melhor ocupar 1 única portadora com 3 "time-slots" do que ocupar 3 portadoras com 1 "time-slot" cada.

Neste trabalho foi considerado que os dados contidos em um "time-slot" serão corrompidos mesmo que o "time-slot" interferente esteja interferindo em somente uma fração de tempo de outro "time-slot". Além disso, caso dois "time-slots" estejam interferindo em um "time-slot", o "time-slot" mais interferente irá prevalecer e os cálculos de qualidade (SIR) serão baseados na maior interferência.

Note que a falta de sincronismo pode ocorrer mesmo que as ERBs estejam sincronizadas pois as diferentes distâncias de propagação do sinal no trajeto entre ERB e TM podem causar a perda de sincronismo. A redução do tamanho das células pode minimizar este efeito. Este tipo de perda de sincronismo não foi considerado nas simulações; considerando-se que a propagação é instantânea entre ERB e TM.

Assim, é importante minimizar a falta de sincronismo entre ERBs e TMs a fim de minimizar os problemas acima mencionados. Ao analisar o desempenho de algoritmos DCA para sistemas TDMA, o efeito desta limitação será analisado.

5.1.2. Dificuldade de Resintonizar Portadoras

Conforme explicado anteriormente, as vantagens do DCA residem na sua flexibilidade em permitir o uso coordenado dos canais entre as ERBs do sistema.

Conforme explicado no item 3.2.7, no caso analógico / FDMA, a fim de permitir que uma ERB possa utilizar qualquer canal do sistema, seus transceptores devem ser capazes de rapidamente se sintonizar no canal determinado pelo algoritmo. Caso tal resintonia não seja possível, as ERBs deverão estar equipadas com um transceptor para cada canal no sistema.

No caso do sistema TDMA, os transceptores também devem se sintonizar rapidamente na portadora que irá sustentar a chamada. Mais do que isto, ao se considerar que cada "time-slot" de um transceptor pode ser ocupado com uma portadora diferente a uma determinada potência diferente, os transceptores devem ser capazes de se ajustar em diferentes portadoras entre 2 "time-slots". A figura 5.3 ilustra a necessidade. Nesta figura, considera-se que cada célula possui somente 2 transceptores, que podem acessar qualquer uma das 3 portadoras.

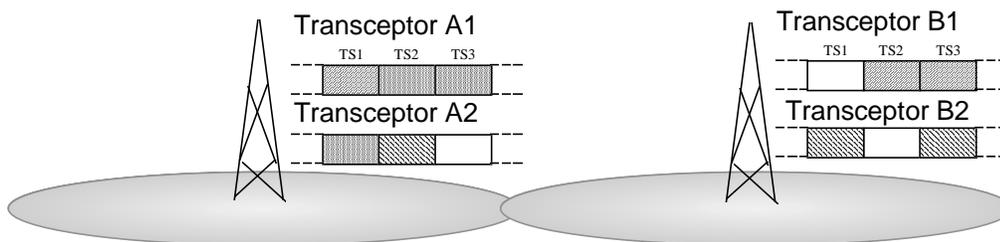


Fig. 5.3 - Transceptores de ERBs acessando diferentes portadoras entre "time-slots". (diferentes padrões de preenchimento nos "time-slots" representam diferentes portadoras)

Note que, no exemplo ilustrado pela figura 5.3, se as ERBs possuísem 3 transceptores, não haveria a necessidade de troca de portadoras entre "time-slots".

Caso não seja possível o ajuste de portadora entre "time-slots", a alocação de um "time-slot" em uma determinada portadora irá restringir o uso dos outros "time-

slots" do transceptor ao uso da mesma portadora. Esta limitação pode causar "canais inacessíveis" ao transceptor [10]. Canais inacessíveis seriam "time-slots" em portadoras diferentes da portadora já em uso pelo transceptor que não podem ser acessadas devido à limitação que não permite a troca de portadoras entre "time-slots". A figura 5.4 auxilia no entendimento do conceito:

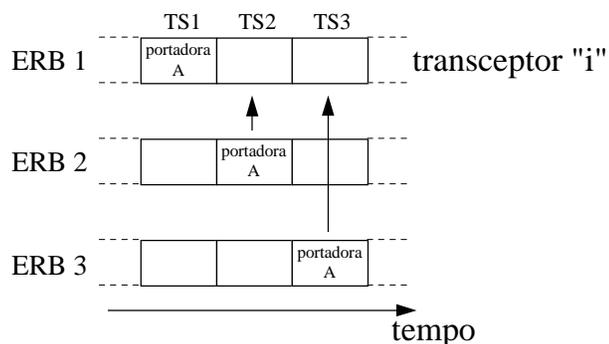


Fig. 5.4 - Exemplo de situação onde transceptor "i" da ERB 1 não pode utilizar os "time-slots" restantes devido à impossibilidade de troca de portadora entre "time-slots".

No exemplo ilustrado na figura 5.4, o transceptor "i" da ERB 1 não pode utilizar seus "time-slots" desocupados em outras portadoras diferentes da portadora "A" pois o mesmo tem seu uso restrito à portadora devido à alocação do "time-slot" 1 na portadora "A".

Assim, mesmo que outras portadoras pudessem ser utilizadas nestes "time-slots" livres, as mesmas não podem ser utilizadas caso o ajuste de portadoras entre "time-slots" não seja permitido.

Algoritmos de realocação de chamadas podem ser utilizados a fim de minimizar este problema. Esta limitação também pode ser evitada se todas as ERBs forem equipadas com o número de transceptores igual ao número de portadoras. Neste último caso, não existiriam canais inacessíveis pois sempre existiria um transceptor sintonizado em cada portadora, permitindo o acesso de qualquer combinação "time-slot"-portadora.

No caso de algoritmos utilizando controle de potência, idealmente a potência de transmissão do transceptor deve ser ajustada entre diferentes valores de potências ao mudar de um "time-slot" para outro. Caso o sistema não permita esse ajuste, a portadora deverá ser ajustada com a maior das potências requeridas nas

chamadas ocupando os "time-slots", conforme mostrado na figura 5.5. Neste exemplo, os TMs ilustrados estariam operando em cada um dos 3 "time-slots" da portadora.

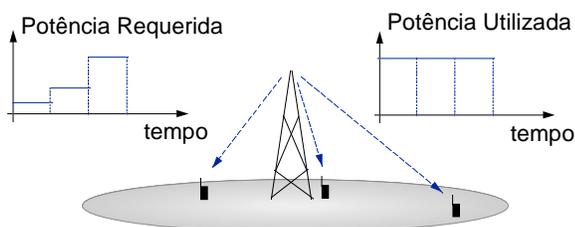


Fig. 5.5 - Controle de Potência imperfeito entre "time-slots".

No exemplo ilustrado pela figura 5.5, a limitação no controle de potência entre "time-slots" força o uso de uma maior potência de transmissão em todos os "time-slots". Assim, não será possível utilizar todas as chamadas com a menor potência transmitida, não sendo portanto possível minimizar a interferência co-canal entre "time-slots" utilizando a mesma portadora.

Deve-se observar que esta limitação se refere somente ao sentido ERB-TM, não se aplicando no sentido TM-ERB; isto é, cada um dos TMs utilizando uma única portadora poderá ajustar sua potência de transmissão conforme sua localização na célula.

As limitações acima mencionadas são limitações tecnológicas. Dado que as mesmas não provocam degradação significativa nos sistemas TDMA atuais, que utilizam algoritmos FCA, a tecnologia atual de transceptores pode não ser capaz de superar estas limitações. Assim, o impacto destas limitações no desempenho dos algoritmos DCA serão examinados neste trabalho.

5.2. Classificação de Algoritmos DCA em Sistemas TDMA

Se as limitações citadas no item 5.1.1 forem contornadas e o sistema TDMA puder operar idealmente; isto é, com "time-slots" sincronizados e sem limitações quanto ao chaveamento de frequência e potência entre "time-slot", a aplicação de DCA é similar à aplicação de DCA para sistemas analógicos/FDMA. No sistema TDMA ideal, algoritmos DCA-AT ou DCA-AI podem ser utilizados e as diversas

técnicas de seleção de canais podem ser utilizadas. Além disso, resultados e conclusões sobre o desempenho do DCA em sistemas analógicos se aplicam em sistemas TDMA ideais.

Entretanto, se as limitações citadas no item 5.1.1 forem consideradas, os algoritmos DCA não podem considerar os "time-slots" como canais independentes. Neste caso, os algoritmos devem basear suas decisões levando em consideração as portadoras que as ERBs já estão utilizando. Dessa forma, reduzem-se as ocorrências de "canais inacessíveis" e, conforme será visto mais adiante, minimizam-se os efeitos da falta de sincronismo.

Assim, os algoritmos DCA para sistemas TDMA com as limitações acima podem se classificar em 2 grupos:

- Algoritmos DCA-TDMA de Portadoras sem Flexibilização de "time-slot" / DCA-TDMA-RP (Reuso de Portadoras)
- Algoritmos DCA-TDMA de Portadoras com Flexibilização de "time-slot" / DCA-TDMA-RTS (Reuso de "Time-Slot")

5.2.1. Algoritmos DCA-TDMA de Portadoras sem Flexibilização de "Time-Slots" (DCA-TDMA-RP)

Os Algoritmos DCA-TDMA de portadoras sem flexibilização de "time-slots" consideram a portadora como o ente a ser alocado entre células. Isto é, as portadoras são alocadas como um todo e as mesmas somente são alocadas se todos os "time-slots" estiverem disponíveis para uso da célula. Isto é, nestes algoritmos, os canais são alocados para uma célula em grupos e não individualmente como no caso do FDMA/analógico.

Este tipo de algoritmo DCA-TDMA é mais conservador pois evita situações onde "time-slots" de uma mesma portadora sejam reutilizados entre ERBs próximas, mesmo que uma situação momentânea permita o reuso de alguns "time-slots". Assim, o reuso somente é permitido pela portadora como um todo.

Os algoritmos DCA-TDMA-RP também podem ser divididos em algoritmos Adaptativos ao Tráfego (DCA-TDMA-RP-AT) ou Adaptativos à Interferência (DCA-TDMA-RP-AI).

5.2.1.1. Algoritmos DCA-TDMA-RP Adaptativos ao Tráfego (DCA-TDMA-RP-AT)

De forma similar à classificação para os algoritmos FDMA/analógicos, ao alocar uma portadora, os algoritmos DCA-TDMA-RP-AT consideram que nenhuma ERB no raio da distância mínima de reuso está utilizando a portadora. Isto é, as alocações são feitas baseando-se em uma Matriz de Compatibilidade entre células. Da mesma forma que os algoritmos DCA-AT para sistemas FDMA/analógicos, este algoritmo necessitaria de um controle centralizado ou semi-centralizado.

Algoritmos DCA-TDMA-RP-AT foram estudados por diversos trabalhos [8,51,71-74]

Everitt [8] estudou o impacto do agrupamento de canais no desempenho desses algoritmos e concluiu que o mesmo causa queda no ganho de capacidade dos algoritmos DCA-AT. Tal queda seria justificada pela perda de flexibilidade na alocação de canais em grupos. Note que todos os canais do grupo devem estar disponíveis ou livres para o grupo ser alocado ou desalocado. Em suas simulações, para um agrupamento de 8 "time-slots" em cada portadora, algoritmos DCA-TDMA-RP-AT teriam 50% do ganho de capacidade de algoritmos DCA-AT sem agrupamento [8].

Baiocchi [71] sugeriu um algoritmo DCA-TDMA-RP-AT com ganho de capacidade de aproximadamente 15% sobre algoritmos FCA-TDMA. Este resultado se referencia à situação de tráfego uniforme; no caso de células congestionadas, o ganho subiu para 120% [71]. O ganho de 15% na condição de tráfego uniforme é inferior aos ganhos encontrados pelos algoritmos DCA-AT em sistemas FDMA/analógicos, estando em acordo com o resultado de Everitt.

West [51] e Nanda [72] simularam algoritmos DCA-TDMA-RP-AT considerando mobilidade de usuários, com concentrações e desconcentrações de tráfego aleatoriamente distribuídas nas células e variáveis com o tempo. Estes algoritmos também permitiam o rearranjo interno de chamadas a fim de facilitar a aquisição e liberação de portadoras. O ganho de capacidade sobre o FCA-TDMA encontrado foi de 33% e 47%, respectivamente. Espera-se que o ganho de

capacidade seja menor se as simulações não considerassem as concentrações e variações temporais de tráfego nas células.

Jiang [73] sugeriu um algoritmo DCA-TDMA-RP-AT onde a portadora que permitisse ser reutilizada fora do padrão normal de reuso seria utilizada com potência reduzida a fim de evitar interferência excessiva nas células vizinhas. O ganho de capacidade sobre o FCA-TDMA encontrado foi de 21%. Pattavina [74] também sugere um algoritmo DCA-TDMA-RP-AT com a mesma filosofia que proposta por Jiang, onde as portadoras são divididas em portadoras de curto e longo alcance. A distância mínima de reuso das portadoras de curto alcance é menor do que a distância mínima de reuso das portadoras de longo alcance. Usuários próximos da ERB utilizariam as portadoras de curto alcance enquanto usuários mais próximos da fronteira da célula utilizariam as de longo alcance. "Intracell handoffs" seriam utilizados, sempre que possível, para liberar portadoras de longo alcance. Simulações mostraram que a divisão do conjunto de portadoras desta forma permite um aumento de até 26% na capacidade dos algoritmos DCA-TDMA-RP-AT.

Carciofi [28] analisou o desempenho da alocação dinâmica de portadoras como um todo em um estudo de caso no sistema GSM. Em um cenário de simulação com 24 portadoras, células setorizadas, mobilidade de usuários, distribuição de tráfego desbalanceado e controle de potência, o algoritmo DCA-TDMA-RP-AT simulado alcançou 50% de ganho sobre o FCA com 1% de probabilidade de bloqueio e 0,5% de probabilidade de queda de chamadas.

5.2.1.2. Algoritmos DCA-TDMA-RP Adaptativos a Interferência (DCA-TDMA-RP-AI)

De forma a evitar o controle centralizado e o planejamento de frequências/portadoras, da mesma forma que nos algoritmos DCA-AI para sistemas FDMA/analógicos, os algoritmos DCA-TDMA-RP-AI alocam as portadoras baseados somente nas informações provindas da ERB e do TM envolvidos na chamada.

Não se tem conhecimento de muitos trabalhos que tenham utilizado ou estudado tal forma de algoritmo DCA.

Priscolli [75] sugeriu uma forma de implementação de algoritmos DCA-TDMA-RP-AI, onde as células adquiriam e liberavam portadoras de forma automática e sem necessidade de um controle centralizado. A aquisição de portadoras seria baseada em medições de potência recebida em cada portadora. Portadora seria adquirida se a potência recebida na mesma fosse menor que um determinado limiar e sugere o uso de rearranjo de chamadas dentre as portadoras, de forma a permitir a liberação de uma portadora para que outras ERBs possam adquiri-las.

Priscolli não avalia o desempenho deste algoritmo com respeito ao FCA-TDMA, mas avalia as dificuldades de implementação deste tipo de algoritmo. A essência de algoritmos DCA-TDMA-RP-AI, e também do algoritmo proposto por Priscolli, é o processo de determinação se uma portadora está livre para uso ou não baseado somente nas informações providas da ERB e do TM envolvidos. Priscolli analisou o problema de duas ou mais ERBs estarem adquirindo uma mesma portadora simultaneamente e sugere técnicas para minimizar a ocorrência deste problema [75].

5.2.2. Algoritmos DCA-TDMA de Portadoras com Flexibilização de "Time-Slots" (DCA-TDMA-RTS)

Os Algoritmos DCA-TDMA de portadoras com flexibilização de "time-slots" considera o "time-slot" como o ente a ser alocado entre ERBs. Isto significa que um "time-slot" pode ser alocado para uma célula mesmo que outro "time-slot" desta mesma portadora não o possa.

Apesar dos algoritmos DCA-TDMA-RTS permitirem a alocação de "time-slot" individualmente, estes são diferentes dos algoritmos DCA-TDMA ideais. Conforme já mencionado na introdução do item 5.1, os algoritmos DCA-TDMA ideais são equivalentes aos algoritmos DCA em sistemas FDMA/analógicos, pois cada "time-slot" corresponde um canal independente. A diferença entre os algoritmos DCA-TDMA-RTS para os algoritmos DCA-TDMA ideais é que os primeiros são algoritmos adequados para operação em sistemas TDMA com limitações de sincronismo e dificuldade de mudança de portadora e potência entre "time-slots" de um mesmo transceptor de uma ERB.

A fim de minimizar o impacto das limitações dos sistemas TDMA no desempenho dos algoritmos DCA, os algoritmos DCA-TDMA-RTS procurarão alocar chamadas da mesma célula em canais ("time-slot") de uma mesma portadora em uso na célula. Este procedimento aumenta a ocupação média de cada portadora em cada célula, aliviando os efeitos da falta de sincronismo e minimizando a ocorrência de canais inacessíveis pois os transceptores da ERB não precisarão mudar de canais entre "time-slots".

Deve-se ressaltar que, embora os algoritmos DCA-TDMA-RTS procurem alocar chamadas nos "time-slots" de uma mesma portadora, nada impede os mesmos de alocarem um "time-slot" em uma portadora cujos outros "time-slots" não sejam utilizáveis. Isto implica que o transceptor da ERB e do TM somente transmitam no seu "time-slot" correspondente. A figura 5.6 auxilia a compreensão. Nesta figura, as duas células vizinhas não podem utilizar a mesma portadora simultaneamente; entretanto, as mesmas podem compartilhar a portadora se não estiverem reutilizando o mesmo "time-slot".

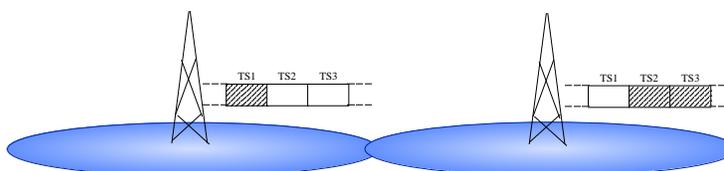


Fig. 5.6 - ERBs vizinhas compartilhando a mesma portadora.

Note que se a falta de sincronismo entre ERBs for variável com o passar do tempo, os "time-slots" irão se interferir periodicamente, impossibilitando o reuso. Assim, o uso de algoritmos DCA-TDMA-RTS exige pelo menos sincronismo no período de transmissão da seqüência de "time-slots" entre ERBs.

Os algoritmos DCA-TDMA-RTS permitem maior flexibilidade que os algoritmos DCA-TDMA-RP pois permitem alocação de canais em situações onde "time-slots" de uma mesma portadora possam ser reutilizados por ERBs próximas. Dessa forma, espera-se um desempenho melhor que nos algoritmos DCA-TDMA-RP.

Note que, em sistemas síncronos onde as ERBs estejam equipadas com o número máximo de transceptores; isto é, um transceptor para cada portadora do

sistema, os algoritmos DCA-TDMA-RTS se aproximam do sistema DCA-TDMA ideal. Tal afirmação pode ser facilmente verificada ao se observar que, uma vez resolvido o problema do sincronismo entre ERBs, qualquer combinação "time-slot"-portadora pode ser utilizada em uma ERB com um transceptor por portadora. Note que neste caso não é necessário o uso de transceptores com ajuste de portadora entre "time-slot", pois todas as portadoras possuem um transceptor já sintonizado na mesma. Nesta situação, se o sistema não possuir controle de potência, os algoritmos DCA-TDMA-RTS terão o mesmo desempenho que um algoritmo DCA-TDMA ideal. Com controle de potência, a limitação de ajuste de potência entre "time-slots" impossibilitará que diferentes "time-slots" tenham potências de transmissão diferentes no sentido ERB-TM.

Da mesma forma, pode-se inferir que, à medida que o número de transceptores se reduz em cada ERB, o desempenho de algoritmos DCA-TDMA-RTS tendem a se aproximar do desempenho dos algoritmos DCA-TDMA-RP pois menos transceptores estarão disponíveis para aproveitar eventuais "time-slots" que possam ser reutilizados em uma portadora já utilizada por uma célula próxima.

Os algoritmos DCA-TDMA-RTS também podem ser divididos em algoritmos Adaptativos a Tráfego (DCA-TDMA-RTS-AT) ou Adaptativos a Interferência (DCA-TDMA-RTS-AI).

5.2.2.1. Algoritmos DCA-TDMA-RTS Adaptativos ao Tráfego (DCA-TDMA-RTS-AT)

Como todos algoritmos adaptativos exclusivamente ao tráfego, os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AT consideram a pior situação de interferência, onde os TMs estariam operando no limiar da região de cobertura de cada célula correspondente. Dessa forma, uma vez definidas as distâncias mínimas de reuso, os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AT permitem a alocação de um "time-slot" a uma célula somente se não existir nenhum "time-slot" interferente sendo utilizado por uma célula a uma distância menor que a distância de reuso. Da mesma forma que outros algoritmos DCA-AT, estes algoritmos necessitam de um controle centralizado ou semi-centralizado. O controle centralizado deverá conhecer não somente a utilização de

cada "time-slot" em cada portadora, mas também deverá conhecer qual o sincronismo relativo entre cada par de ERBs.

Espera-se que estes algoritmos mostrem melhor desempenho que algoritmos DCA-TDMA-RP-AT pois possuem maior flexibilidade. Note que uma chamada que normalmente seria bloqueada em um algoritmo DCA-TDMA-RP-AT pode ser alocada por um algoritmo DCA-TDMA-RTS-AT.

5.2.2.2. Algoritmos DCA-TDMA-RTS Adaptativos à Interferência (DCA-TDMA-RTS-AI)

Os algoritmos DCA-TDMA-RTS Adaptativos à Interferência (DCA-TDMA-RTS-AI) avaliam a disponibilidade de cada "time-slot" através de medições de interferência em cada um deles, sem necessidade de um controle descentralizado. Apesar destes algoritmos procurarem alocar canais em uma mesma portadora, existe a flexibilidade do uso do "time-slot" em uma portadora mesmo que outros "time-slots" desta portadora estejam ocupados.

Algoritmos seguindo esta filosofia foram propostos em alguns trabalhos [10,13,28].

Akaiwa [10] propôs a aplicação do algoritmo de Segregação de Canais ("Channel Segregation"-CHANSO) em sistemas TDMA. Akaiwa reconhece a dificuldade que sistemas TDMA reais possuem em sintonizar diferentes portadoras entre "time-slots"; além de reconhecer o problema de falta de sincronismo entre "time-slots" de portadoras sendo reutilizadas no sistema. Em um sistema TDMA de 12 "time-slots" por portadora, com 6 portadoras no sistema, sem controle de potência, supondo o sistema com sincronismo entre "time-slots", conseguiu-se 56% de ganho sobre algoritmos TDMA-FCA. Akaiwa não ilustrou aspectos de estabilidade e qualidade de chamadas. Ao retirar o sincronismo de portadoras, o autor encontrou uma degradação de 30% sobre a condição ideal de sincronismo entre "time-slots".

Carciofi [28] também simulou o comportamento do algoritmo "Channel Segregation" de Akaiwa em um estudo de caso no sistema GSM. Sob o mesmo cenário citado no item 5.2.2.1, a 1% de probabilidade de bloqueio e 0,5% de

probabilidade de queda de chamadas, o algoritmo "Channel Segregation" alcançou 50% de ganho de capacidade. Na situação de 1% de probabilidade de bloqueio e 1% de probabilidade de queda de chamadas, o ganho de capacidade sobe para 90%.

Almgren [13] propôs o algoritmo "SLOW ACA" (Alocação com Adaptação Lenta de Canais) para sistemas TDMA. Almgren [13] considerou em suas simulações a limitação de ajuste de diferentes níveis de potência entre "time-slots" de um mesmo transceptor e a limitação do tempo de ajuste de frequência dos transceptores. O termo "SLOW" (lento) indica que o algoritmo procura minimizar a necessidade de troca de portadoras nos transceptores. Em um sistema TDMA tipo IS-54, com 3 "time-slots" por portadora, com controle de potência limitado no sentido ERB-TM, Almgren [13] encontrou 100% de ganho de capacidade sobre algoritmo TDMA-FCA.

5.2.2.2.1. Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI para Sistemas DECT

Diversos trabalhos estudaram o desempenho de algoritmos DCA em sistemas DECT ("Digital European Cordless Telecommunications standard" - Padrão Europeu Digital para Comunicações sem Fio) [14,35,60,65,69,76]. O padrão DECT já prevê o uso de alocação dinâmica de canais [77]. Apesar dos sistemas DECT serem principalmente voltados para aplicações de comunicação sem fio em interiores de edifícios e residências [77], os resultados de desempenho de algoritmos DCA em DECT podem se relacionar com o desempenho que os mesmos teriam em sistemas celulares devida à semelhança entre ambos os sistemas. DECT também utiliza o conceito de reuso de canais [77] apesar de o utilizar a uma escala bem menor.

O desempenho de algoritmos DCA em sistemas DECT foi separado neste subitem devido às grandes diferenças nos cenários de simulação. Dada a aplicação geralmente em interiores de edifícios, os algoritmos geralmente se utilizavam de modelos de propagação e ambientes muito diferentes. Assim, os resultados não devem, a princípio, se correlacionar.

O algoritmo DCA usado nos sistemas DECT se encaixa na família de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI, onde qualquer "porta de acesso" (equivalente a ERB no sistema DECT) pode acessar qualquer portadora em qualquer um de seus 12 "time-slots" [77].

Chuang [14,76] estudou alternativas para implementação de algoritmos DCA em sistemas DECT. Com o intuito de reduzir o tempo de procura por canais durante o início da chamada, Chuang apresentou sugestão para melhoria do algoritmo DCA do sistema DECT, onde a porta de acesso pré-selecionaria uma lista de canais antes da ocorrência de chamadas. Esta lista seria continuamente atualizada. Ao ocorrer uma chamada, somente os 6 canais de menor interferência seriam testados pelo TM e este escolheria o canal com a menor interferência no sentido porta(ERB)-TM.

Chuang também estudou o efeito da falta de sincronismo entre portas/ERBs do sistema, sustentando os problemas mencionados no item 5.1.1. Em um cenário bem específico de simulação (vide [14]), Chuang conclui que a falta de sincronismo pode provocar até 6dB de degradação no nível de 1% da distribuição cumulativa de SIR, resultando em quase dobrar a probabilidade de interferência quando as portas(ERBs) não estão sincronizadas.

O trabalho de Chuang é importante também por analisar em detalhes os principais problemas de implementação dos algoritmos DCA em sistemas DECT:

- Problema de transmissão de sinais de controle;
- Problemas de "time-slots" cegos: o tempo relativamente longo que é necessário para uma porta(ERB) ou TM se sintonizar em diferentes portadoras entre "time-slots" não permite que o transceptor receba informações ou possa monitorar a situação no "time-slot" que foi transmitido durante a transição de portadoras;
- sincronismo entre portas (ERBs).

Chuang sugere que informações de controle sejam sempre transmitidas em todos os "time-slots" ativos ou inativos do sistema a fim de evitar o problema de "time-slots" cegos.

Chuang também estudou o desempenho e problemas da implementação de controle de potência contínuo baseado no SIR das chamadas em sistemas DECT [76].

Eriksson [65] estudou o comportamento do algoritmo DCA em sistemas DECT seguindo o mesmo algoritmo sugerido por Chuang. O estudo de Eriksson se concentrou na análise do tráfego cursado por porta no sistema, sem efetuar comparações com outros métodos de alocação. Eriksson observou que a principal causa de bloqueio nos algoritmos DCA em sistemas DECT era a falta de transceptores. Dado que o sistema DECT é geralmente composto por diversas portas com 1 transceptor cada [14,60,65,76], o número máximo de conversações simultâneas era limitado em 12. O sistema não era limitado por interferência pois o sistema DECT possui 10 portadoras para operar em cada um dos 12 "time-slots"; isto é, o número de canais disponíveis é muito superior ao número de conversações simultâneas que cada porta pode suportar, permitindo que o sistema consiga alocar um canal com baixo nível de interferência com grande probabilidade.

Esta conclusão também foi encontrada por Law [60]. Law comparou o desempenho de dois tipos de algoritmos DCA (RUP e de Melhor Qualidade) em sistemas DECT. Em sistema com 1 único transceptor por porta, os algoritmos tiveram desempenho bem semelhante, dado que ambos estavam limitados basicamente por falta de transceptores. Ao aumentar para 2 transceptores por porta, o algoritmo RUP fornecia mais de 100% de capacidade adicional ao algoritmo de Melhor Qualidade. Assim, algoritmos DCA para sistemas DECT, que possuem como característica o baixo número de transceptores por porta, devem ser escolhidos baseados em outros critérios [60].

Wang [35] também comparou o desempenho de 3 diferentes algoritmos DCA em sistemas DECT. Wang analisou o desempenho dos algoritmos: Melhor Qualidade (conforme definido no padrão DECT), algoritmo "Channel Segregation" aplicado em DECT e um algoritmo que aloca canais baseado em função de custo que leva em consideração sucesso em alocações passadas. Wang encontrou um ganho de 8% de capacidade para o algoritmo "Channel Segregation" sobre o algoritmo padrão do DECT. O algoritmo proposto conseguiu 19% de capacidade adicional sobre o algoritmo padrão. Provavelmente estes ganhos foram conseguidos pois Wang considerou somente 7 portadoras no sistema, ao invés das 10 portadoras definidas no padrão. A menor relação entre o número de canais disponíveis no sistema e o número de chamadas simultâneas permitidas em cada porta(ERB)

permite que limitações de capacidade devidas à interferência tenham maior influência, deixando os algoritmos DCA apresentarem maiores diferenças de desempenho.

5.2.3. Discussão dos Resultados

Conforme discutido neste capítulo, não se pode aplicar a análise de desempenho de algoritmos DCA em sistemas FDMA/analógicos diretamente em sistemas TDMA. Relativamente à produção de pesquisa gerada para sistemas analógicos, poucos trabalhos analisaram a aplicação dos mesmos em sistemas TDMA. Destes poucos trabalhos, muitos se concentraram na aplicação em ambientes tipo DECT, de características diferentes do ambiente celular. Muitos dos trabalhos se concentraram nos algoritmos Adaptativos ao Tráfego que alocam a portadora como um todo (DCA-TDMA-RP-AT), exigindo o controle centralizado. Poucos trabalhos analisaram o comportamento de algoritmos adaptativos à interferência [10,13,75]. Destes, Almgren [13] foi o único que forneceu uma análise detalhada de aspectos de capacidade, qualidade e estabilidade.

Além disso, poucos trabalhos ofereceram comparações de desempenho entre algoritmos. Os diferentes ambientes de simulação dificultam a comparação entre algoritmos reportados em diferentes trabalhos. Os trabalhos que oferecem tal comparação [35,60] a aplicaram em sistemas DECT.

Não se conhece trabalho que tenha aplicado o conceito de Partição de Reuso em sistemas TDMA. Acredita-se que a aplicação deste conceito é possível às portadoras do sistema.

O efeito do controle de potência em algoritmo DCA para TDMA também não foi amplamente estudado na literatura. Somente Almgren [13] considerou a aplicação do controle de potência, considerando inclusive a limitação citada no item 5.1.2; entretanto, este não considerou o caso sem controle de potência para comparação.

Da mesma forma que nas análises para sistemas analógicos, a maioria dos trabalhos considerou modelo hexagonal de células omnidirecionais e número de canais relativamente pequeno. Almgren [13] foi o único a considerar um número

razoável de canais: 189. Além disso, a maioria dos resultados não considerou a mobilidade de usuários. Os trabalhos que consideraram a mobilidade de usuários [13,28,35,65] não contemplaram a mesma situação sem mobilidade, impossibilitando uma clara comparação e conclusão sobre o impacto da mobilidade no desempenho dos algoritmos DCA para sistemas TDMA.

6. Análise de Desempenho de Algoritmos DCA Adaptativos à Interferência em Sistemas TDMA

6.1. Foco de Pesquisa

Da mesma forma que nos estudos de algoritmos DCA aplicados aos sistemas FDMA / analógicos, os estudos divulgados de algoritmos DCA aplicados aos sistemas TDMA utilizaram condições diversas, impossibilitando uma comparação entre algoritmos. Além disso, a quantidade de trabalhos que estudou tal aplicação foi muito menor que no estudo de algoritmos DCA para sistemas FDMA/analógicos. A maioria dos trabalhos sobre DCA argumentou que os resultados obtidos para sistemas FDMA/analógicos poderiam se aplicar a sistemas TDMA. Conforme já mencionado no item 5.1, limitações na implementação não permitem a aplicação direta dos resultados obtidos para sistemas FDMA/analógicos.

A fim de verificar como os algoritmos DCA se comportam em sistemas TDMA, este trabalho apresenta resultados de simulações de algoritmos DCA-AI para estes sistemas. Os principais algoritmos DCA-AI aplicados aos sistemas TDMA foram estudados sobre as mesmas condições de simulação. Os algoritmos foram simulados considerando as principais limitações de implementação nos sistemas TDMA:

- impacto da falta de sincronismo entre "time-slots";
- impacto da falta de flexibilidade de ajuste de potência de transmissão dos transceptores entre "time-slots".

Da mesma forma que no estudo de algoritmos DCA para sistemas FDMA/analógicos, procurou-se separar a influência do Método de Alocação de Canais da influência do Controle de Potência.

As mesmas medidas de desempenho citadas no item 4.1.3 foram utilizadas para este estudo também.

6.1.1. Algoritmos de Alocação de Canais Considerados

Conforme já explicado no item 5, sistemas TDMA ideais permitem a aplicação de algoritmos DCA da mesma forma que em sistemas Analógicos. Portanto, os mesmos não foram estudados, já que o desempenho seria semelhante.

Dentre os algoritmos DCA-TDMA de portadoras, considerou-se somente os algoritmos com flexibilidade de alocação de "time-slots". Isto é, não era necessária a alocação de toda a portadora para que um "time-slot" da portadora pudesse ser utilizado. A flexibilidade adicional deste tipo de algoritmo permitirá concluir sobre a máxima capacidade de algoritmos DCA-TDMA de portadoras. Note que algoritmos DCA-TDMA sem a flexibilidade de alocação de "time-slots" possivelmente terão um desempenho pior de capacidade que algoritmos DCA-TDMA com esta flexibilidade. Além disso, dado que algoritmos DCA-AT necessitam de controle centralizado ou regional, simulou-se somente algoritmos DCA-TDMA-AI. Assim, os algoritmos DCA considerados fazem parte dos algoritmos DCA-TDMA de portadora, com flexibilização de alocação de "time-slots" e adaptativos a interferência (DCA-TDMA-RTS-AI), conforme descrito no item 5.2.2.2.

Dentre os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI conhecidos, consideraram-se os seguintes algoritmos:

- FCA-TDMA (Alocação Fixa de Canais) (FCA)
- DCA-TDMA com prioridade baseada em Alocações Passadas ("Channel Segregation") (CHANSG)
- DCA-TDMA "SLOW ACA" (SLACA)
- DCA-TDMA com prioridade baseada na localização dos usuários (procurando formar o particionamento da distância de reuso ("reuse partitioning")) (RUP)

Da mesma forma que nos algoritmos FDMA / analógicos, o algoritmo utilizado para realocação de chamadas ("intracell handoff") é o mesmo utilizado para alocação de novas chamadas.

6.1.1.1. Algoritmo FCA-TDMA (Alocação Fixa de Canais)

O sistema FCA-TDMA foi simulado da mesma forma que no caso analógico / FDMA; isto é, "intracell handoffs", efeitos de propagação e desvanecimento foram considerados. As portadoras são divididas entre as células do "cluster" e o algoritmo aleatoriamente aloca um "time-slot" livre de uma portadora previamente alocada na célula.

Observe que o algoritmo FCA também verifica se o SIR da chamada está maior que o limiar mínimo de aceitação antes de alocá-la. Assim, situações onde chamadas são bloqueadas mesmo na existência de "time-slots" livres podem ocorrer.

Note que foram considerados "intracell handoffs" também no FCA pois considera-se que tal facilidade não é exclusiva dos algoritmos DCA.

O algoritmo FCA para sistemas TDMA possui o mesmo funcionamento do algoritmo FCA utilizado nas simulações de sistemas analógicos / FDMA. Vide item 4.1.1 para o fluxograma do mesmo.

6.1.1.2. DCA-TDMA com Prioridade Baseada em Alocações Passadas (Segregação de Canais - "Channel Segregation")

O algoritmo DCA com Prioridade para Alocações Passadas ("Channel Segregation") utilizado para simular o desempenho do DCA em sistemas TDMA é o mesmo utilizado para as simulações em sistemas Analógicos/FDMA e descrito no item 4.1.1. O algoritmo simulado foi o mesmo simulado por Akaiwa [10], embora este tenha utilizado outro ambiente de simulação. Note que este algoritmo considera "time-slots" como canais do sistema DCA FDMA/analógico. Embora o algoritmo seja o mesmo, o seu funcionamento em um sistema TDMA permitirá que o mesmo se adapte à alocação de portadoras e os canais à ela associados.

Vide item 4.1.1 para o fluxograma do algoritmo.

6.1.1.3. DCA-TDMA "SLOW ACA" (Alocação Adaptativa de Canais de Baixa Velocidade de Adaptação)

Almgren [13] sugeriu o algoritmo "SLOW ACA" (SLACA) (Alocação Adaptativa de Canais de Baixa Velocidade de Adaptação) reconhecendo a dificuldade de se sintonizar rapidamente um transceptor em uma portadora diferente da atualmente em uso. Dessa forma, Almgren sugeriu o algoritmo "SLOW ACA" com o objetivo de minimizar a necessidade dos transceptores mudarem sua portadora [13].

Almgren também considera a dificuldade de se ajustar níveis de potência diferentes em diferentes "time-slots" de uma mesma portadora sendo transmitida por um transceptor. Dessa forma, o controle de potência deve ajustar a potência de transmissão da portadora para a menor potência requerida para satisfazer o TM da portadora que esteja na pior condição [13].

Embora o algoritmo procure minimizar a mudança de portadoras nos transceptores, nada impede o mesmo de alocar um canal de outra portadora, mesmo se os canais restantes desta portadora estejam em uso por outra ERB. Isto é, o algoritmo "SLOW ACA" faz parte do grupo de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI.

A figura 6.1 apresenta o fluxograma do Algoritmo "SLOW ACA" proposto por Almgren e considerado nas simulações. Note que o termo "canal" se refere a "time-slots" no sistema.

A figura 6.2 apresenta o fluxograma para atualização do Vetor de Potências Recebidas em cada portadora da ERB no algoritmo. Note que a lista de canais prioritários não é atualizada continuamente. O algoritmo espera a contabilização de diversas medidas de potência recebida em cada portadora para, no final de um certo período de tempo, atualizar sua lista e recomeçar um outro período de medições.

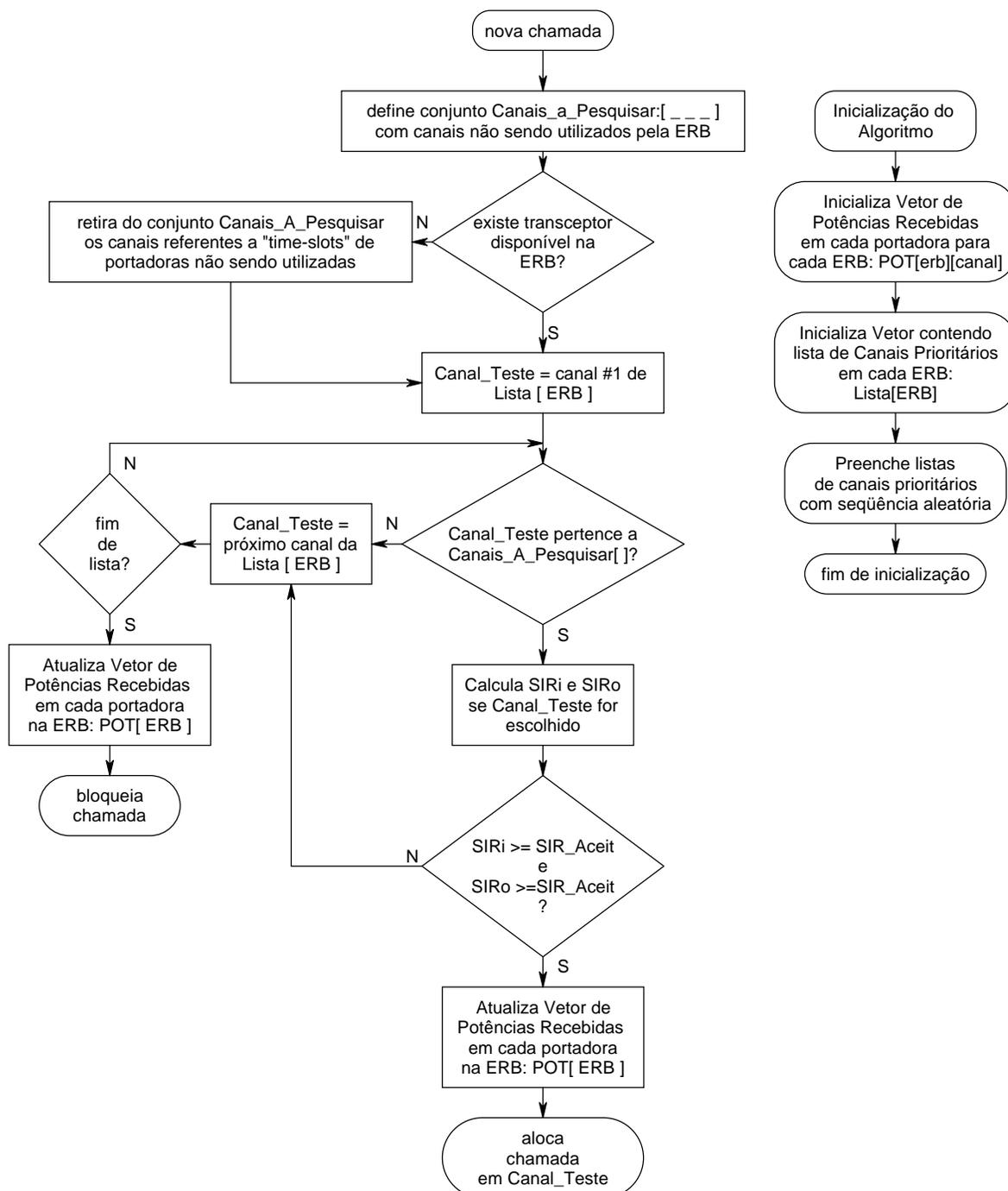


Fig. 6.1 - Fluxograma do Algoritmo DCA "SLOW ACA" (SLACA)

Note também que a lista de canais ("time-slots") prioritários possui os canais ("time-slots") de uma mesma portadora agrupados ao longo da lista. Isto mostra a tendência do algoritmo em alocar chamadas em "time-slots" de portadoras já em uso na ERB.

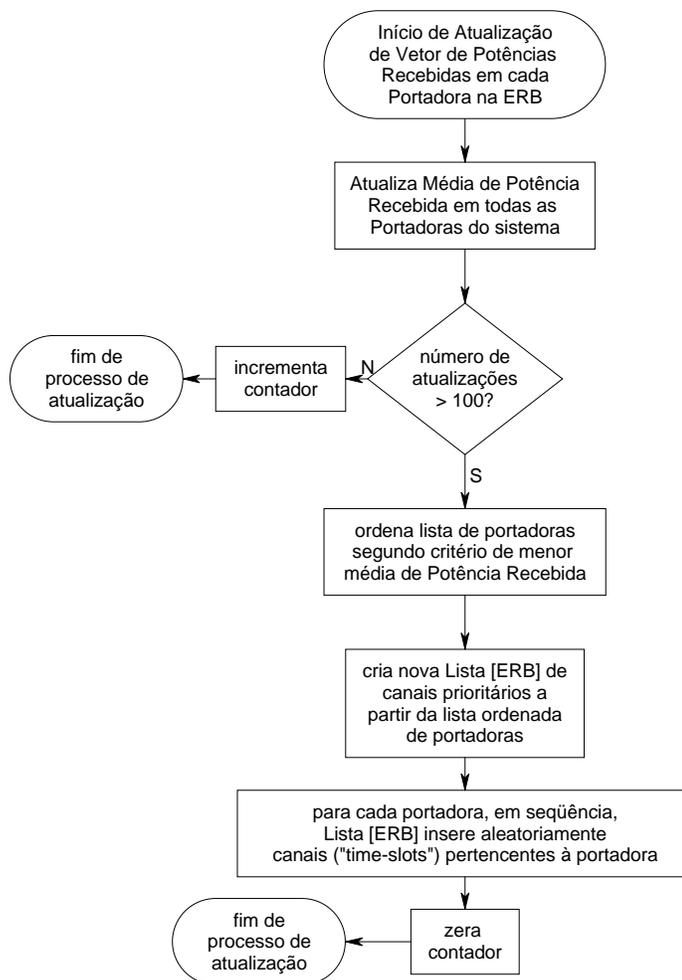


Fig. 6.2 - Fluxograma do Algoritmo DCA "SLOW ACA" (SLACA) (continuação)

6.1.1.4. Algoritmo DCA com Prioridade baseada na Localização dos Usuários ("Reuse Partitioning") (DCA-RUP de Portadoras)

Da mesma forma que no caso FDMA/analógico, se considerarmos a portadora de canais como um todo, pode-se imaginar um algoritmo que construa a partição de reuso das portadoras. As ERBs alocariam canais de uma portadora baseado na atenuação entre TM e ERB. Este procedimento permitirá diferentes padrões de reuso das portadoras no sistema.

Uma vez decidida a portadora, o algoritmo escolhe aleatoriamente o "time-slot" da portadora a alocar para a chamada.

O algoritmo DCA-RUP de Portadoras também se encaixa no grupo de algoritmos DCA-TDMA-TSR-AI porque permite que canais de uma portadora possam ser utilizados mesmo que os outros canais desta portadora estejam em uso por outras ERBs.

A figura 6.3 apresenta o fluxograma do Algoritmo DCA-RUP de Portadoras considerado:

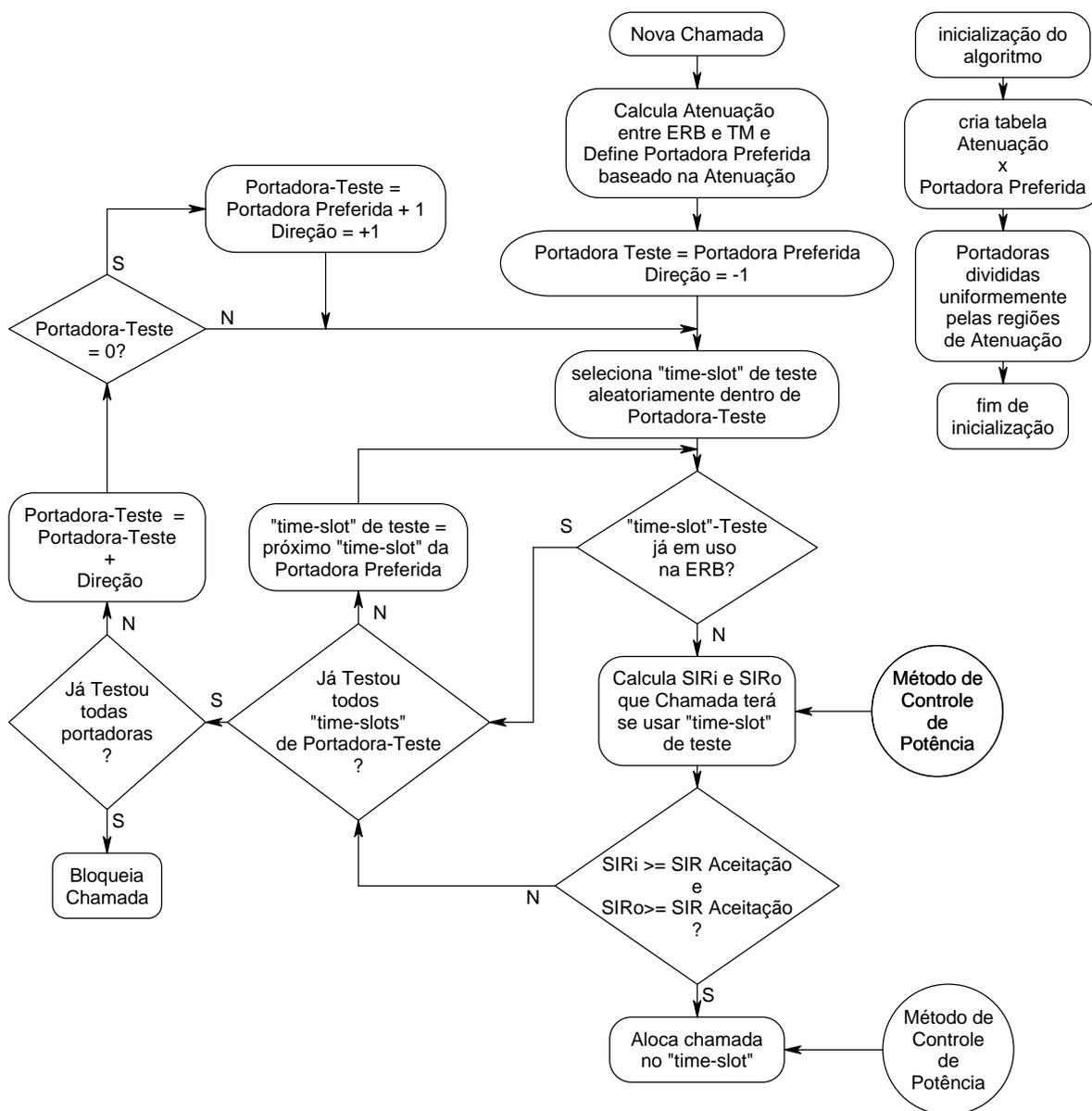


Fig. 6.3 - Fluxograma do Algoritmo DCA-TDMA de Partição de Reuso de Portadoras (RUP)

6.1.2. Cenário de Simulação

Procurou-se manter o mesmo cenário de simulação utilizado na análise dos algoritmos DCA para sistemas FDMA/analógicos. A única diferença foi quanto ao número de canais que por conveniência seria múltiplo de 3 para resultar em número inteiro de portadoras e também múltiplo de 7 para permitir a distribuição uniforme de portadoras no caso do algoritmo FCA de 7 células por "cluster". Mobilidade não foi considerada nos cenários deste item. Considerou-se também que o bloqueio de chamadas é sempre causado por limitações de interferência e nunca por falta de transceptores.

Assim, o cenário utilizado foi o mesmo descrito no item 4.1.2, com as modificações da tabela 6.1:

número de canais:	63
número de "time-slots" por portadora:	3
controle de potência no TM:	perfeito (quando utilizado)
controle de potência na ERB:	imperfeito ³⁹ (quando utilizado)

Tabela 6.1: Modificações do cenário de simulação para o caso TDMA.

Apesar do nível SIR mínimo necessário para sistemas TDMA ser bem mais baixo que o nível SIR utilizado em sistemas analógicos, o mesmo nível de SIR mínimo utilizado nos cenários analógicos também foram considerados nos cenários TDMA. Considera-se que isto não afetará as conclusões pois está-se estudando o impacto que o agrupamento de canais e suas imperfeições causam no desempenho dos algoritmos DCA-AI.

Cenários considerando a falta de sincronismo entre portadoras interferentes também foram simulados. Nestes cenários, cada ERB possuiu um tempo diferente de início de transmissão da seqüência de "time-slots". Os "time-slots" que interferem em um dado "time-slot" de uma portadora de uma ERB é determinado através da diferença entre os tempos de início de transmissão da seqüência de "time-slots" de cada ERB.

³⁹ potência de transmissão ajustada para a mínima potência necessária para satisfazer o TM com a pior atenuação que esteja utilizando o transceptor.

Observe que na condição de falta de sincronismo, um "time-slot" pode gerar interferência em até 2 "time-slots" da mesma portadora sendo utilizada por outras ERBs. Note também que 2 "time-slots" diferentes podem estar interferindo em um dado "time-slot" da mesma portadora. Neste caso, considerou-se que a maior das interferências geradas pelos 2 "time-slots" estaria prevalecendo.

Considerou-se que as ERBs estariam sempre sincronizadas no período dos "time-slots". Isto é, o deslocamento relativo entre ERBs se manteve constante durante a simulação.

As medidas de desempenho utilizadas foram as mesmas utilizadas para os algoritmos analógicos/FDMA e descritas no item 4.1.3.

6.2. Análise de Desempenho: Sem Controle de Potência

O algoritmo FCA e os algoritmos DCA-AI descritos no item 6.1.1 foram simulados primeiramente sem a aplicação do controle de potência. Isto é, os TMs e os transceptores das ERBs estariam sempre transmitindo à máxima potência permitida.

Os algoritmos foram primeiramente simulados sob as mesmas condições, incluindo parâmetros de SIR de Aceitação (ajustados para máxima capacidade) e tráfego gerado. Os resultados permitirão uma comparação do desempenho entre algoritmos. O item 6.2.1 apresenta os resultados e conclusões para o caso com sincronismo. A comparação para o caso sem sincronismo será apresentada no item 6.2.3.

O efeito da falta de sincronismo no desempenho de cada algoritmo também será analisado. O item 6.2.2 apresenta comparações de desempenho dos algoritmos com e sem sincronismo.

No item 6.2.4 serão apresentados resultados de ganho de capacidade que cada algoritmo DCA-TDMA consegue fornecer sobre o algoritmo FCA-TDMA. Da mesma forma que no caso analógico, a análise será feita com parâmetros ajustados para equalização de qualidade e estabilidade de chamadas.

Supôs-se que todas as ERBs estariam equipadas com 1 transceptor por portadora; assim, não ocorreu bloqueio por "canais inacessíveis", dado que qualquer canal (combinação de "time-slot" e portadora) pôde ser acessado por 1 dos transceptores da ERB.

6.2.1. Comparação de Desempenho de Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com Sincronismo entre Portadoras

Da mesma forma que no caso analógico/FDMA, o desempenho dos algoritmos DCA-AI para sistemas TDMA podem variar bastante com a variação dos parâmetros de simulação. Assim, os desempenhos entre algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI foram comparados sob condições de simulação idênticas, diferindo somente o algoritmo em si. A tabela 6.2 apresenta resultados da simulação dos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência, com sincronismo de portadoras e sob o mesmo tráfego gerado.

Algoritmo	prob. de bloqueio (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
FCA-TDMA	30,3	3,9	6,1	0,03	27,5	27,5
SLACA	7,8	4,9	20,0	0,32	24,8	24,9
CHANSO	8,2	5,0	18,7	0,29	24,9	25,0
RUP-TDMA	1,3	1,0	30,4	0,53	21,6	21,7

Tabela 6.2 - Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência e com sincronismo de portadoras, sob o mesmo tráfego gerado (2100 Erlangs).

Através da tabela 6.2 pode-se verificar que os algoritmos DCA-AI oferecem melhoras de desempenho com relação ao algoritmo FCA também em sistemas TDMA. Ao observar os resultados de probabilidade de bloqueio e nível médio de SIR, novamente pode-se verificar o compromisso entre qualidade e capacidade de algoritmos DCA-AI. Além disso, da mesma forma que nos resultados encontrados para algoritmos DCA-AI em sistemas analógicos, a menor probabilidade de bloqueio

acompanhou uma maior instabilidade no sistema. Sob o mesmo tráfego gerado, pode-se notar que os algoritmos DCA-AI fornecem probabilidades de chamada sofrer "intracell handoff" muito superiores ao encontrado no algoritmo FCA-TDMA.

Da mesma forma que nos sistemas analógicos, o algoritmo RUP foi o que apresentou o melhor resultado dentre todos os algoritmos simulados. O melhor desempenho do algoritmo RUP pode ser justificado pela partição de reuso de portadoras. A partição de reuso permite que usuários próximos da ERB possam utilizar as mesmas portadoras, de forma compacta. Por outro lado, RUP foi o algoritmo que mostrou a maior probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" dentre os algoritmos DCA-TMDA-RTS-AI.

Os algoritmos CHANSG e SLACA tiveram desempenhos semelhantes entre si, tanto de probabilidade de bloqueio quanto nos aspectos de estabilidade e qualidade de chamadas.

A estabilidade de algoritmos DCA-AI em sistemas TDMA possui o mesmo conceito utilizado no caso analógico. Isto é, alocações de canais podem causar degradações de qualidade em chamadas já existentes, exigindo rearranjo destas chamadas em outros canais na mesma célula ("intracell handoff").

A figura 6.4 apresenta histogramas de SIR das chamadas nos cenários simulados que auxiliam no entendimento do comportamento dos algoritmos.

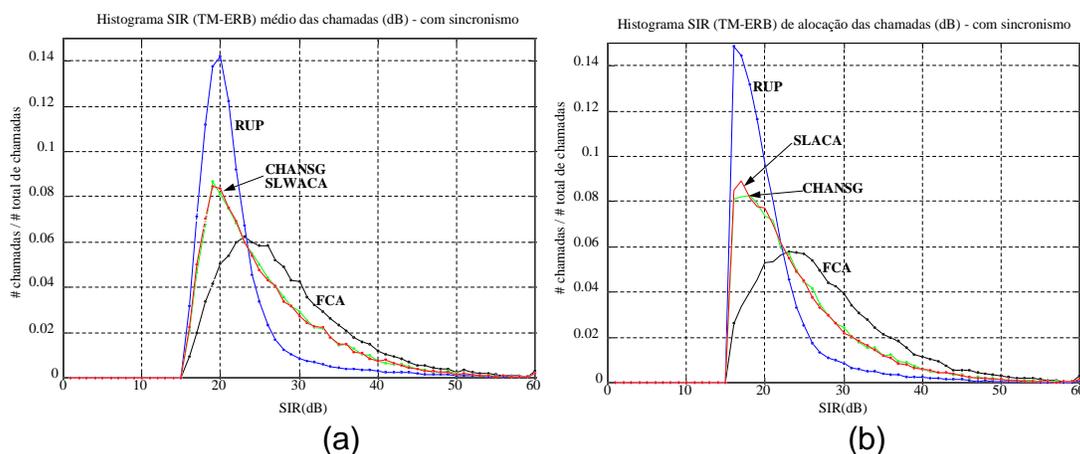


Fig. 6.4 - Histogramas de SIR (TM-ERB)⁴⁰ para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência, com sincronismo e operando sob a mesma carga (2100 Erlangs).

(a): Histograma de SIR(TM-ERB) médio de chamadas completadas;

⁴⁰ Mostram-se somente os histogramas de SIR no sentido "inbound" (sentido TM - ERB) pois os histogramas para o sentido "outbound" (ERB- TM) são bem semelhantes.

(b): Histograma de SIR(TM-ERB) de Alocação de chamadas alocadas;

O histograma de SIR de Alocação da figura 6.4-b justifica a alta probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff” do algoritmo RUP: muitas chamadas são alocadas com SIR próximo ao SIR mínimo (15dB). Da mesma forma, a similaridade entre os histogramas de SIR de Alocação dos algoritmos SLACA e CHANSG justificam o comportamento semelhante entre estes algoritmos. Além disso, os histogramas de SIR médio dos algoritmos SLACA e CHANSG (vide figura 6.4-a) são mais distribuídos do que o histograma do algoritmo RUP, justificando a maior probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff” deste último. O algoritmo FCA manteve uma probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff” baixa porque a distância preestabelecida entre ERBs garante um distanciamento mínimo entre chamadas utilizando o mesmo canal/"time-slot", diminuindo a chance de interferência.

Apesar dos algoritmos SLACA e CHANSG possuírem probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff” inferior à do algoritmo RUP, a probabilidade de queda de chamadas devido à "intracell handoff" destes foi superior à probabilidade de queda observada no algoritmo RUP. A menor probabilidade de queda do algoritmo RUP sugere que este possua uma melhor capacidade de rearranjo de chamadas. Note que cada rearranjo (causado por uma interferência) representa uma oportunidade para que o algoritmo reconfigure suas chamadas de forma mais compacta. Considerando que as chamadas na portadora compacta tem menor chance de sofrer interferência, cada rearranjo permitiu que o algoritmo RUP torne suas chamadas mais compactas, permitindo a entrada de novas chamadas ou abrindo mais espaços para rearranjos.

O número médio de intracell handoffs por chamada seguiu o mesmo comportamento da probabilidade da chamada sofrer “intracell handoff”.

Observando novamente as figuras 6.4, pode-se notar, da mesma forma que no caso analógico, a correlação existente entre a capacidade de um algoritmo DCA-AI e sua capacidade de alocar chamadas com SIRs próximos ao SIR mínimo. Ao observar os histogramas de SIR médio dos algoritmos CS e SLOW-ACA, pode-se notar que os mesmos são bem semelhantes. Lembrando que algoritmos CS e SLOW-ACA não se baseiam na localização dos usuários para a alocação das

chamadas, pode-se dizer que a similaridade na distribuição de SIR é resultado do mesmo número de usuários ativos no sistema em cada algoritmo. Assim, estes histogramas confirmam a capacidade semelhante de ambos algoritmos.

Os histogramas mostram ainda que, da mesma forma que no caso analógico, o algoritmo FCA possui um histograma de SIR bem distribuído, possuindo chamadas com altos SIRs e chamadas com SIRs próximos ao SIR mínimo.

6.2.2. Efeito da Falta de Sincronismo entre Portadoras

A fim de verificar o efeito da falta de sincronismo nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI, analisou-se cada algoritmo separadamente sob as mesmas condições, com a única diferença sendo a retirada do sincronismo das portadoras. A tabela 6.3⁴¹ apresenta os resultados das simulações que serão utilizadas para análise.

Algoritmo	tráfego gerado (Erl)	prob. bloq. (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
FCA-TDMA							
com sinc.	990	4,6	1,7	5,6	0,06	29,3	29,3
sem sinc.	990	7,0	2,8	7,1	0,06	26,7	27,9
SLACA							
com sinc.	1690	3,8	3,2	17,1	0,29	25,4	25,4
sem sinc.	1690	11,8	5,4	18,1	0,25	24,2	25,2
CHANSG							
com sinc.	1330	1,5	1,8	13,3	0,22	26,5	26,6
sem sinc.	1330	8,7	5,8	18,9	0,27	24,8	25,1
RUP-TDMA							
com sinc.	2500	4,9	2,7	32,8	0,55	21,5	21,5
sem sinc.	2500	18,3	7,4	35,6	0,56	20,9	21,2

Tabela 6.3 - Análise do efeito da falta de sincronismo entre portadoras em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência.

⁴¹ note que a tabela 6.3 não deve ser utilizada para comparação entre algoritmos pois os valores se referem a diferentes cargas de tráfego utilizadas em cada algoritmo. Para comparação entre algoritmos, refira aos itens 6.2.1 e 6.2.3.

Pode-se observar na tabela 6.3 que a falta de sincronismo provocou aumento da probabilidade de bloqueio de todos os algoritmos, inclusive do algoritmo FCA-TDMA. Tal queda é justificada pela interferência adicional que é gerada e sentida pelos "time-slots" das portadoras interferentes. Conforme visto no item 5, a falta de sincronismo permite que um "time-slot" ocupado possa gerar interferência em até 2 "time-slots" livres de outra célula; tal fenômeno seria equivalente a se ter um número maior de usuários interferentes no caso sem sincronismo. Como existem mais usuários interferentes, um "time-slot" que normalmente estaria livre de interferências terá uma maior chance de não poder ser utilizado. O aumento na probabilidade de bloqueio equivale, conforme será visto no item 6.2.4, a quedas de capacidade dos algoritmos.

Mesmo com um menor número médio de chamadas em curso no sistema devido à maior probabilidade de bloqueio, os algoritmos sem sincronismo mostraram uma maior probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff". Tal fenômeno também era esperado pois, conforme visto no item 5, a falta de sincronismo provoca interferência adicional provocada por outros "time-slots" da mesma portadora. Esta interferência adicional explica também a redução no SIR médio das chamadas.

A maior taxa de chamadas necessitando de "intracell handoff" e a menor chance de alocação devido à interferência adicional gerada nos canais livres provocou o aumento na probabilidade de queda de chamadas em todos os algoritmos.

Dentre os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI, o algoritmo SLACA foi o que menos sofreu com a falta de sincronismo. Apesar da probabilidade de bloqueio ter aumentado sensivelmente, as probabilidades de queda de chamadas em "intracell handoff" e de chamada sofrer "intracell handoff" aumentaram ligeiramente, enquanto os algoritmos CHANSG e RUP sofriam aumentos maiores nestas medidas. O menor impacto da falta de sincronismo no algoritmo SLACA é devido à forma com que este aloca as chamadas favorecendo a utilização de portadoras já em uso (vide item 6.1.1.3) e pelo aumento da ocupação média de "time-slots" em uma portadora. Dessa forma, conforme visto no item 5, reduz-se a chance de interferência entre "time-slots" de portadoras sem sincronismo.

Observando o fluxograma do algoritmo RUP no item 6.1.1.4, pode-se notar que o algoritmo RUP começa a procurar "time-slots" vagos em uma portadora preferencial baseada na atenuação entre a ERB e o TM em questão. A portadora preferencial não é necessariamente uma portadora já em uso. Da mesma forma, o algoritmo CHANSG (item 6.1.1.2) possui funções de prioridade que definem "time-slots" prioritários, baseadas em alocações passadas com sucesso. Embora indiretamente estes algoritmos possam alcançar o efeito de alocar os mesmos "time-slots" da mesma portadora, estas funções não fornecem maior prioridade à alocação de "time-slots" em portadoras já em uso pela célula.

Em um dado instante de operação do sistema, foi levantada a ocupação média das portadoras para cada um dos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI: o algoritmo CHANSG mostrou ocupação média de 1,18 "time-slots" ocupados por portadora, o algoritmo RUP também mostrou 1,18 "time-slots" ocupados por portadora, enquanto o algoritmo SLACA mostrou ocupação média de 1,76 "time-slots" ocupados em média por portadora. Tais resultados confirmam a melhor resistência do algoritmo SLACA à falta de sincronismo.

Pode-se observar na tabela 6.3 que a probabilidade de bloqueio de chamadas no algoritmo RUP aumentou bastante com a falta de sincronismo. A princípio este comportamento não era esperado pois a falta de sincronismo afeta portadoras individualmente não provocando interferência entre portadoras; dado que o algoritmo RUP promove diferentes padrões de reuso para portadoras como um todo, não era esperado que a falta de sincronismo prejudicasse a formação dos padrões de reuso. Entretanto, a falta de sincronismo prejudica a formação dos diferentes padrões de reuso porque o algoritmo RUP (vide fluxograma do algoritmo no item 6.1.1.4) prefere alocar canais fora do padrão ideal de reuso a bloquear uma chamada. Isto é, se por alguma razão, o "time-slot" na portadora ideal correspondente à atenuação entre ERB e TM não puder ser alocado, o algoritmo RUP aloca a chamada em um outro "time-slot" de outra portadora fora do padrão de reuso. Assim, a interferência adicional gerada em "time-slots" disponíveis, causada pela falta de sincronismo, dificulta a alocação das chamadas nos diferentes padrões de reuso.

O algoritmo FCA-TDMA foi o que menos sofreu com a falta de sincronismo dado o espaçamento pré-definido entre ERBs interferentes. Assim, mesmo que os

"time-slots" comecem a se interferir, os mesmos estão suficientemente espaçados entre si. Observe que, ao contrário dos algoritmos DCA-TDMA, todos os "time-slots" das portadoras são sempre utilizados com um mínimo espaçamento entre "time-slots" interferentes. Os algoritmos DCA-TDMA-TSR-AI permitem que um determinado "time-slot" de uma portadora possa ser utilizado por uma ERB, mesmo que as ERBs vizinhas estejam utilizando outro "time-slot" da mesma portadora.

Akaiwa [10] também simulou o efeito da falta de sincronismo de portadoras da mesma forma que aqui simulado. Analisando o algoritmo CHANSG, suas simulações mostraram que a probabilidade de bloqueio aumentou de 1% para 5% com a perda de sincronismo. Embora Akaiwa tenha utilizado um sistema TDMA de 12 "time-slots" por portadora e um cenário de simulação bem diferente, a ordem de grandeza do resultado encontrado por Akaiwa confirma o resultado obtido.

Ao observar os valores de SIR médio das chamadas na tabela 6.3, verifica-se que o SIR médio dos algoritmos reduz de valores variando de 1dB a 3dB com a retirada do sincronismo. A redução no SIR médio era esperada pois o nível de interferência aumentou com a retirada do sincronismo. Chuang [14] também explorou o efeito da falta de sincronismo no SIR médio das chamadas e encontrou o mesmo resultado qualitativo. Não foi possível comparar os resultados quantitativos devido à grande diferença entre os ambientes de simulação utilizados.

Pode-se observar também que o caso sem sincronismo causa uma diferença maior entre os níveis de SIR médio nos sentidos TM-ERB e ERB-TM. Pode-se intuitivamente explicar este fenômeno com o seguinte raciocínio. Sejam TMs que operam em uma mesma portadora em diversas ERBs de um sistema sincronizado. Ao retirar o sincronismo, os TMs que anteriormente não geravam interferência em um determinado "time-slot" de uma ERB se tornam interferentes. Dado que a maior interferência prevalece quando um "time-slot" sofre interferência de 2 "time-slots" da portadora de uma mesma célula, a interferência sentida no "time-slot" desta ERB tende a aumentar, diminuindo o SIR no sentido TM-ERB.

A figura 6.5 apresenta os histogramas de SIR das chamadas para os cenários analisados neste item, antes e depois da retirada do sincronismo entre portadoras⁴². Note que esta figura não deve ser utilizada para comparação entre algoritmos, mas

⁴² note que os histogramas são relativos ao total de chamadas alocadas (no histograma de SIR de

sim para análise da modificação do histograma devido à falta de sincronismo em cada algoritmo individualmente.

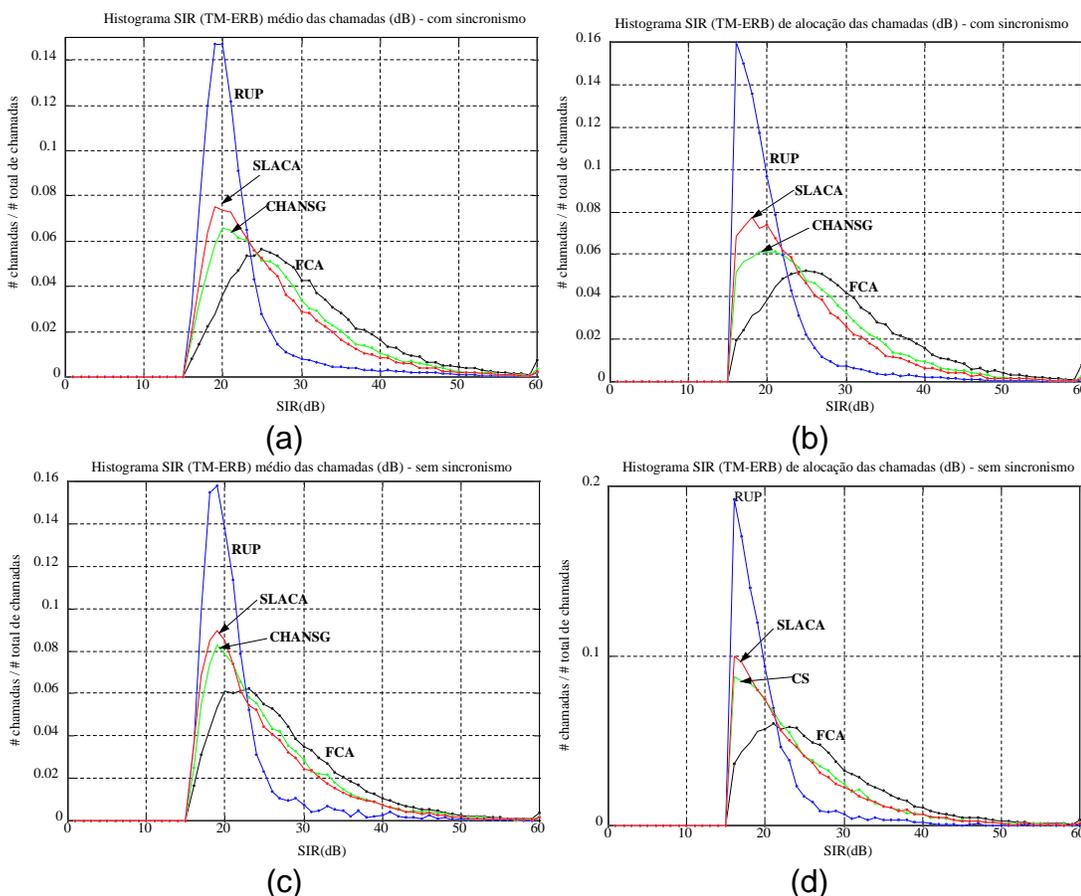


Fig. 6.5 - Histogramas de SIR (TM-ERB)⁴³ para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência, com e sem sincronismo.

- (a): Histograma de SIR médio de chamadas completadas - com sincronismo;
- (b): Histograma de SIR de Alocação de chamadas alocadas - com sincronismo;
- (c): Histograma de SIR médio de chamadas completadas - sem sincronismo;
- (d): Histograma de SIR de Alocação de chamadas alocadas - sem sincronismo.

Ao comparar os histogramas da figura 6.5, pode-se verificar que a falta de sincronismo provoca um aumento na concentração dos histogramas de SIR de Alocação próximo ao nível de SIR mínimo em todos os algoritmos DCA. Isto justifica a maior probabilidade de chamadas sofrerem “intracell handoffs” e o menor SIR médio de cada algoritmo. Comparando as diferenças nos histogramas de alocação, pode-se notar que o algoritmo CHANSNG teve um aumento de concentração maior

alocação) ou ao total de chamadas completadas (no histograma de SIR médio).

⁴³ Mostram-se somente os histogramas de SIR no sentido "inbound" (sentido TM - ERB) pois os

que o algoritmo SLACA, justificando o maior aumento na probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" no algoritmo CHANSO mostrado na tabela 6.3.

Apesar do aumento na concentração dos níveis de SIR dos algoritmos, o formato geral ainda se mantém o mesmo, mostrando que a falta de sincronismo não afeta substancialmente a forma com que os algoritmos alocam seus recursos.

6.2.3. Comparação de Desempenho de Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem Sincronismo entre Portadoras

A fim de completar a análise do efeito da falta de sincronismo nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI, comparou-se novamente os algoritmos sob as mesmas condições do item 6.2.1, com a única diferença sendo a retirada do sincronismo entre portadoras. Os algoritmos foram simulados sob a mesma carga, sem sincronismo, e os resultados se encontram na tabela 6.4⁴⁴.

algoritmo	prob. de bloqueio (%)	prob. de queda por falha "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR med TM-ERB (dB)	SIR med ERB-TM (dB)
FCA-TDMA	14,9	3,7	7,6	0,05	26,2	27,6
SLACA	6,7	3,9	16,8	0,25	24,6	25,7
CHANSO	8,7	5,8	18,9	0,27	24,8	25,1
RUP-TDMA	2,7	1,7	30,1	0,55	21,4	21,7

Tabela 6.4 - Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência, sem sincronismo de portadoras e sob o mesmo tráfego gerado (1330 Erlangs).

Da mesma forma que visto no item 6.2.1, os algoritmos DCA-AI possuem desempenho melhor que o oferecido pelo algoritmo FCA mesmo na condição sem sincronismo. Entretanto, a diferença de desempenho é substancialmente menor. Apesar das tabelas 6.2 e 6.4 se referirem a tráfegos diferentes, pode-se verificar na

histogramas para o sentido "outbound" (ERB- TM) são bem semelhantes.

⁴⁴ Observe que a tabela 6.4 não deve ser utilizada para análise do efeito da falta de sincronismo em cada algoritmo individualmente. Esta análise foi feita no item 6.2.2; assim, a tabela deve ser utilizada somente para comparação entre desempenho de algoritmos.

tabela 6.2 que os algoritmos DCA (algoritmo CHANSNG por exemplo) sofriam 8% de probabilidade de bloqueio contra 30% de probabilidade de bloqueio do FCA. Na tabela 6.4, pode-se verificar que esta relação abaixou bastante. Além disso, pode-se verificar que o desempenho do algoritmo SLACA melhorou em relação ao algoritmo CHANSNG, tanto no aspecto de probabilidade de bloqueio, como nos aspectos de estabilidade, mantendo praticamente a mesma qualidade. Pode-se verificar inclusive que o algoritmo RUP não mostrou um desempenho tão superior aos algoritmos CHANSNG e SLACA quanto no caso com sincronismo.

As outras conclusões obtidas no item 6.2.1 se verificaram novamente; dentre elas, cabe destacar que novamente a menor probabilidade de bloqueio dos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI acompanhou uma maior instabilidade no sistema e uma menor qualidade nas chamadas.

A maior instabilidade e menor qualidade de chamadas sugere a equalização dos algoritmos para se analisar a capacidade dos mesmos com relação ao algoritmo FCA, da mesma forma que feita no caso analógico.

6.2.4. Análise de Capacidade de Algoritmos

Os algoritmos DCA foram equalizados da mesma forma que nas análises de DCA em sistemas analógicos. Isto é, os níveis de SIR de Aceitação de cada algoritmo foram gradualmente elevados até que o algoritmo apresentasse, sob 5% de probabilidade de bloqueio, um nível de probabilidade de queda de chamadas por "intracell handoff" por volta de 2% a 3%, e um nível "SIR_10%" igual ou superior ao do algoritmo FCA. Os algoritmos DCA equalizados foram simulados na condição sem sincronismo e as capacidades obtidas em cada algoritmo estão apresentadas na tabela 6.5:

Da mesma forma que no caso analógico, o aumento do SIR de Aceitação provocou um aumento na probabilidade de bloqueio de novas chamadas, pois chamadas com SIR na faixa de 15dB, que antes eram aceitas, agora são bloqueadas. A maior probabilidade de bloqueio reflete-se na queda da capacidade do algoritmo, a 5% de probabilidade de bloqueio.

A figura 6.6 mostra os histogramas de SIR na condição sem sincronismo e com os algoritmos equalizados segundo qualidade e estabilidade.

Algoritmo	níveis de SIR de Aceitação (dB)	Tráfego Gerado a 5% de prob. de bloqueio (Erl)	capacidade adicional sobre FCA (%)
FCA-TDMA	15	853	-
CHANSNG	16	987	16
SLACA	17	1004	18
RUP-TDMA	18	1115	31

Tabela 6.5: Ganhos de capacidade de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sobre algoritmo FCA. Algoritmos operavam sem controle de potência, sem sincronismo e com parâmetros ajustados para equalização.

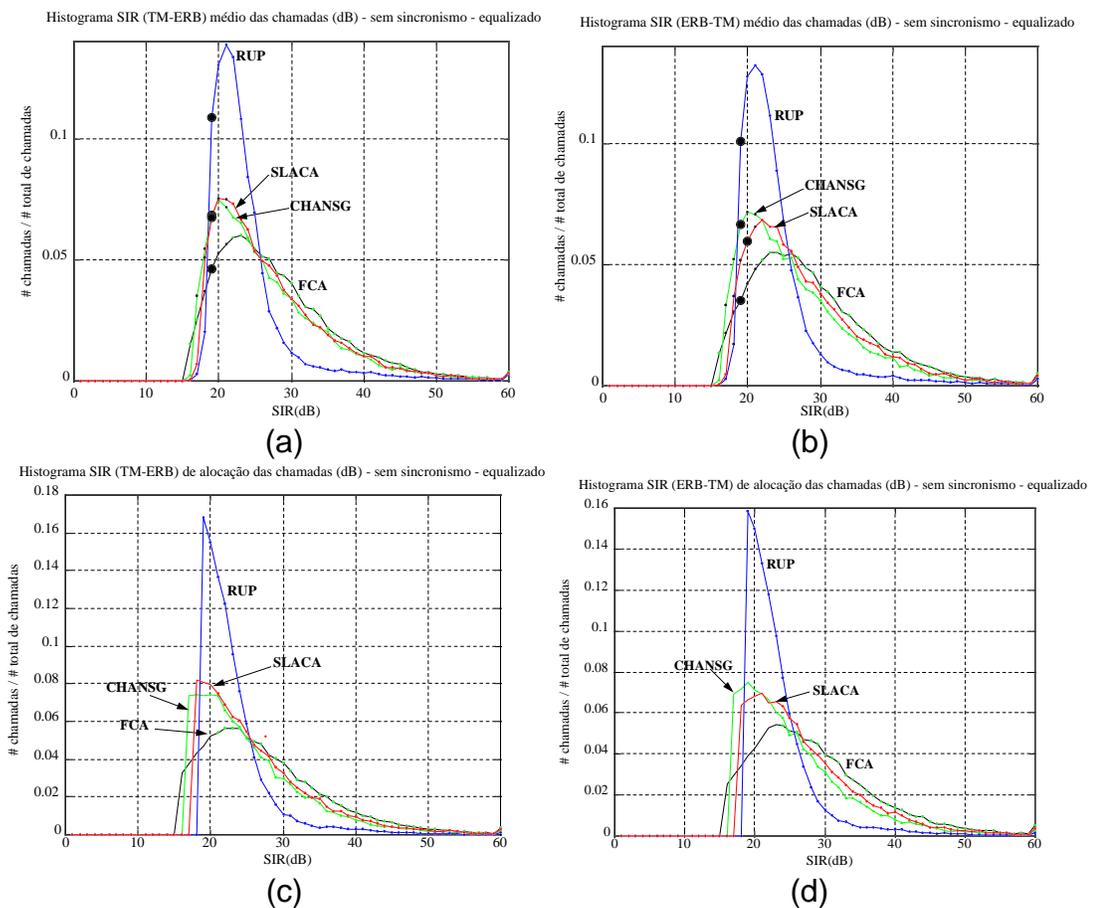


Fig. 6.6 - Histogramas de SIR para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência, sem sincronismo e com parâmetros ajustados para equalização.

- (a): Histograma de SIR (TM-ERB) médio de chamadas completadas⁴⁵;
 (b): Histograma de SIR (ERB-TM) médio de chamadas completadas;
 (c): Histograma de SIR (TM-ERB) de Alocação de chamadas alocadas;

⁴⁵ os diversos pontos nas curvas de histograma de SIR médio representam o nível de "SIR_10%" encontrado no histograma.

(d): Histograma de SIR (ERB-TM) de Alocação de chamadas alocadas;

Observando os histogramas de SIR médio da figura 6.6 (a,b), pode-se verificar que os algoritmos estão equalizados com respeito à qualidade. Pode-se observar que a equalização dos algoritmos aproximou os histogramas dos algoritmos CHANSG e SLACA do histograma do algoritmo FCA.

Resultados de estabilidade na condição de equalização de qualidade e estabilidade também foram obtidos. A tabela 6.6 resume os resultados no ponto de operação e com o sistema operando sem sincronismo:

Algoritmo	SIR Aceitação (dB)	Probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff" (%)	Número Médio de "Intracell Handoffs" por Chamada	Probabilidade de Queda devido à "Intracell Handoffs" (%)
FCA-TDMA	15	6,7	0,06	2,3
CHANSG	16	11,6	0,16	2,8
SLACA	17	9,0	0,10	2,1
RUP	18	9,9	0,11	0,6

Tabela 6.6: Medidas de estabilidade de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI. Algoritmos operando sem controle de potência, sem sincronismo e com parâmetros ajustados para equalização.

Pode-se observar na tabela 6.6 que todos os algoritmos tinham probabilidade de queda de chamadas devido à falhas de "intracell handoff" entre 2% e 3%, confirmando a equalização.

Conforme esperado, o aumento do SIR de Aceitação de novas chamadas reduziu a probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" e o número médio de "intracell handoffs" por chamada. A redução nestes resultados é justificada pela margem do SIR de Aceitação sobre o SIR mínimo. Além disso, a margem do SIR de Aceitação provoca redução na carga do sistema, reduzindo a chance de interferência. Pode-se notar que quanto maior a margem no SIR de Aceitação, maior a queda na probabilidade de interferência do algoritmo.

Note que os algoritmos SLACA e RUP, além de fornecerem maior capacidade do que o algoritmo CHANSG, ainda permitem maior estabilidade.

6.2.5. Resumo das Observações

Os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI possuem melhor desempenho do que o algoritmo FCA mesmo na condição equalizada; entretanto, a falta de sincronismo das portadoras reduz o ganho de capacidade dos mesmos. O ganho de capacidade variou de 16% (algoritmo CHANSG) a 31% (algoritmo RUP-TDMA).

Ao comparar estes valores com os obtidos no caso analógico, nota-se a redução do ganho de capacidade, mostrando que a falta de sincronismo é um aspecto importante a se considerar. Observou-se no item 6.2.2 que a falta de sincronismo provocou aumento na probabilidade de bloqueio, na probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" e na probabilidade de queda devido às falhas de "intracell handoff" em todos os algoritmos; além de causar ligeiras perdas na qualidade média das chamadas. Isto mostra como a falta de sincronismo é prejudicial aos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI.

Os algoritmos CHANSG e SLACA tiveram desempenhos semelhantes entre si no caso com sincronismo; entretanto, ao retirar o sincronismo, pode-se verificar que o desempenho do algoritmo SLACA melhorou em relação ao algoritmo CHANSG e que o algoritmo RUP não possuiu desempenho tão superior aos outros algoritmos. O algoritmo SLACA conseguiu melhorar seu desempenho em relação ao algoritmo CHANSG devido à sua característica de concentrar chamadas em portadoras já em uso, reduzindo o efeito da falta de sincronismo.

Dado o pequeno ganho obtido pelos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI, um bom tópico para estudos futuros é a análise do desempenho de algoritmos DCA-TDMA-RP-AI que provavelmente não irão sofrer tanto com o problema de falta de sincronismo. Por outro lado, estes algoritmos devem sofrer com o problema de bloqueios devidos ao agrupamento de canais sugerido por [8].

6.3. Análise de Desempenho: Com Controle de Potência

Quando operando com controle de potência, conforme descrito no item 5.1, os sistemas TDMA podem apresentar degradações no desempenho devido às limitações tecnológicas no controle de potência, adicionalmente à limitação no sincronismo das portadoras. A fim de estudar o comportamento dos algoritmos DCA operando em sistemas TDMA com estas limitações, impôs-se que os transceptores não consigam ajustar diferentes potências de transmissão entre "time-slots" consecutivos. Assim, os algoritmos foram simulados de tal forma que a potência de transmissão da portadora fosse sempre a mínima potência necessária para atender a todos os TMs operando nesta portadora. Isto é, caso um dos TMs utilizando uma portadora esteja localizado no limiar de cobertura de sua célula, todos os TMs utilizando esta portadora estarão recebendo sinais da ERB à máxima potência, conforme ilustrado na figura 5.5. Deve-se lembrar que esta limitação se refere somente ao sentido ERB-TM, não se aplicando no sentido TM-ERB.

Os mesmos algoritmos FCA e DCA-AI foram simulados nos mesmos cenários com a aplicação do controle de potência. O cenário e algoritmos simulados são os mesmos definidos no item 6.1 e as medidas de desempenho utilizadas para análise foram as mesmas utilizadas nos cenários anteriores e descritas no item 4.1.3. O modelo de controle de potência de potência utilizado foi o mesmo descrito no item 4.3.1. A potência máxima de transmissão utilizada foi igual à potência constante utilizada no caso sem controle de potência e esta potência é suficiente para permitir a operação de TMs no limiar da área de cobertura da célula.

Deve-se observar que a limitação no ajuste de potência entre "time-slots" não é considerada pelos TMs no momento de decisão de canal a alocar. Isto é, quando um TM está inferindo qual o SIR que a chamada teria no sentido ERB-TM em um dado "time-slot" de uma portadora já em uso pela ERB, não se considera a potência que a ERB está utilizando no momento; considera-se a potência que a ERB utilizaria para satisfazê-lo. Note que a potência que a ERB pode estar usando neste momento pode ser maior que a potência que o TM precise. Esta consideração é conservadora mas é importante para evitar a ocorrência de "intracell handoffs" causados pela

redução na potência de transmissão da ERB com o fim de alguma chamada na fronteira da célula.

Neste item, serão estudados os seguintes aspectos:

- efeito do controle de potência nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI;
- efeito da falta de sincronismo entre portadoras em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência;
- comparação de desempenho entre algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sobre o mesmo tráfego gerado, nas condições com e sem sincronismo;
- análise da capacidade adicional que algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI conseguem fornecer sobre o algoritmo FCA em sistemas TDMA.

6.3.1. Efeito do Controle de Potência em Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI

A fim de verificar o desempenho dos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com a introdução do controle de potência, considerou-se cada algoritmo operando sob um determinado conjunto de parâmetros (inclusive tráfego gerado) e aplicou-se o controle de potência, analisando-se as diferenças nos resultados. Dessa forma, alterações nos resultados serão devidas apenas à introdução do controle de potência.

Neste item, será considerado que os algoritmos estão operando com total sincronismo entre as ERBs.

Os resultados estão resumidos na tabela 6.7⁴⁶.

Observa-se na tabela 6.7 que os algoritmos CHANSG e SLACA apresentam uma redução na probabilidade de bloqueio de novas chamadas com a introdução do controle de potência. Entretanto, ao comparar estas reduções com as encontradas no caso analógico (tabela 4.14), pode-se verificar que as reduções foram mais modestas.

O controle de potência melhora o desempenho dos algoritmos CHANSG e SLACA referente à probabilidade de bloqueio de novas chamadas porque o controle de potência reduz as potências de transmissão nas chamadas, conforme explicado no item 4.3.2. Entretanto, a imperfeição no controle de potência no sentido ERB-TM

⁴⁶ esta tabela deve ser utilizada somente para efeitos de análise do impacto do controle de potência

não permite que a probabilidade de bloqueio reduza como no caso analógico. Note que o controle de potência imperfeito faz com que a potência transmitida nos "time-slots" da portadora não seja tão reduzida. Por exemplo, se um único TM estiver usando um "time-slot" na fronteira da célula, a potência transmitida por qualquer outro "time-slot" em uso nesta portadora, nesta célula, será alta também, como se o TM usando o outro "time-slot" estivesse igualmente operando na fronteira da célula. Assim, uma potência de interferência menos reduzida será sentida em todos os TMs que estejam reutilizando a mesma portadora desta célula, dificultando a alocação de novas chamadas, permitindo somente uma menor redução na probabilidade de bloqueio, conforme visto na tabela 6.7.

alg.		Tráfego gerado (Erl)	prob bloq. (%)	prob. queda por "intracell handoff" (%)	prob. chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR TM-ERB med (dB)	SIR ERB-TM med (dB)
FCA	NPC	990	4,6	1,7	5,6	0,06	29,3	29,3
	BPC	990	7,4	1,5	7,0	0,07	26,6	27,9
CHANSRG	NPC	2100	8,7	5,0	18,7	0,28	24,9	25,0
	BPC	2100	4,2	5,6	39,0	0,67	21,0	21,9
SLACA	NPC	2100	7,8	4,9	20,0	0,32	24,8	24,9
	BPC	2100	5,9	7,0	38,5	0,64	21,4	22,4
RUP	NPC	2500	4,9	2,7	32,8	0,55	21,5	21,5
	BPC	2500	7,5	9,4	47,3	0,84	20,1	21,2

tabela 6.7 - efeito da introdução de controle de potência em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com sincronismo.

Provavelmente este efeito causou o pior desempenho do algoritmo RUP com a aplicação do controle de potência, tanto com respeito à probabilidade de bloqueio quanto com respeito à probabilidade de queda de chamadas. Observe que, se as alocações fossem ideais, esta limitação não causaria problema, pois uma portadora seria utilizada por TMs à mesma distância da ERB. Entretanto, no caso com controle de potência, as alocações imperfeitas prejudicam o algoritmo RUP de 2 formas: (1)

em cada algoritmo individualmente, não devendo ser utilizada para comparação entre algoritmos.

TMs utilizando o mesmo canal com diferentes distâncias à suas ERBs e (2) TMs utilizando um mesmo canal poderão estar transmitindo em potências diferentes. Note que, no caso sem controle de potência, as alocações são perfeitas no ponto de vista do aspecto (2). A figura 6.7 ilustra os dois aspectos de imperfeição das alocações das chamadas que prejudicam o algoritmo RUP.

Idealmente o algoritmo RUP procura alocar portadoras para usuários localizados à uma mesma distância, conforme ilustrado na figura 6.7-b). Entretanto, conforme ilustrado na figura 6.7-a), devido à própria aleatoriedade de geração de chamadas e ocupação do sistema, os "time-slots" de uma portadora TDMA foram alocados para usuários em diferentes distâncias da ERB. As diferentes distâncias às ERB prejudicam a formação dos padrões compactos de reuso, da mesma forma que no caso analógico e no caso do sistema TDMA sem controle de potência. Adicionalmente, no caso do sistema TDMA com controle de potência, o controle de potência imperfeito prejudicará ainda mais a formação do padrão compacto. Referenciando-se na figura 6.7-a), se o controle de potência fosse perfeito, os móveis nas diferentes células que estejam ocupando o "time-slot" 1 poderiam estar operando próximo ao padrão compacto de reuso. Entretanto, a presença do TM ocupando o "time-slot" 3 a uma maior distância da ERB força o uso da portadora a uma maior potência em todos os "time-slots", prejudicando o padrão de reuso de todos eles. Se o sistema possuísse controle de potência perfeito entre "time-slots", os padrões de reuso dos "time-slots" 1 e 2 não seriam prejudicados.

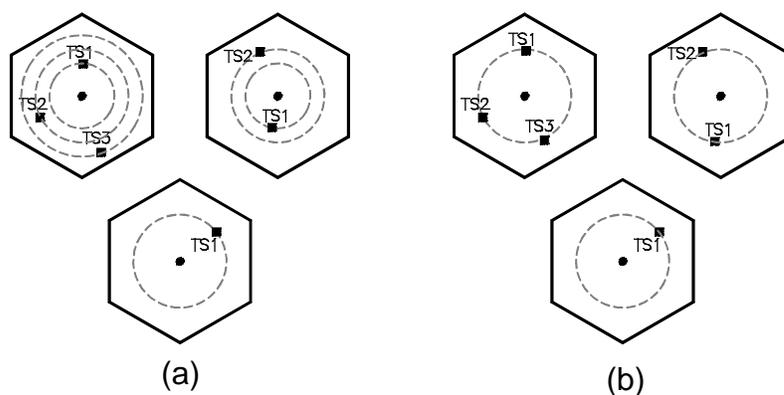


figura 6.7 - Exemplo de Alocações imperfeitas no algoritmo RUP-TDMA

(a): alocações imperfeitas;

(b): alocações perfeitas.

A tabela 6.7 também mostra que todos os algoritmos tem maior chance de suas chamadas sofrerem "intracell handoff"s. Note que os algoritmos SLACA e RUP são também penalizados por uma maior probabilidade de queda de chamadas por falha em "intracell handoff". Apesar da maior probabilidade de "intracell handoff", o algoritmo CHANSO consegue reduzir a probabilidade de bloqueio sem penalizar sua probabilidade de queda de chamadas. Isto demonstra que o algoritmo CHANSO é o algoritmo que mais se beneficia do controle de potência.

O maior aumento na probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" é justificada pela redução no nível de sinal desejado, causado pelo controle de potência, que reduz a relação SIR das chamadas ativas, tornando-as mais susceptíveis à interferência. Apesar deste aumento ter sido semelhante ao aumento sofrido no caso analógico, acredita-se que o controle de potência imperfeito também gere maior interferência em chamadas em andamento pois a alocação de uma chamada em uma portadora já sendo utilizada por um TM localizado no limiar de cobertura da célula irá transmitir em alta potência no sentido ERB-TM. Maiores estudos são necessários a fim de clarificar o fenômeno.

Com respeito à qualidade das chamadas, o controle de potência reduziu o SIR médio das chamadas, com reduções variando de 1dB (algoritmo RUP) até 5 dB (algoritmo CHANSO). Conforme esperado, a redução do SIR médio ocorre devido ao controle da potência que evita a ocorrência de níveis de SIR excessivos.

Em todos os algoritmos, pode-se notar que o controle de potência imperfeito no sentido ERB-TM desbalanceou o SIR médio. Com controle de potência, os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI, que antes possuíam SIR médio no sentido TM-ERB praticamente igual ao SIR médio no sentido ERB-TM, tiveram este nível de SIR aproximadamente 1dB superior ao SIR médio do sentido TM-ERB. Este comportamento pode ser justificado pelo controle de potência imperfeito no sentido ERB-TMs, onde a potência foi sempre ajustada, em todos os "time-slots", à máxima potência necessária para alcançar o TM mais distante da ERB; assim, alguns TMs compartilhando esta portadora estariam recebendo níveis de potência superiores ao nível constante de recepção, aumentando o nível médio de SIR. Por outro lado, a maior potência de transmissão da portadora gerou maior interferência em outras

ERBs reutilizando esta portadora. Os resultados mostraram que o efeito final foi positivo no nível de SIR médio.

6.3.2. Efeito da Falta de Sincronismo em Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI-BPC

Conforme verificado no item 6.2, a falta de sincronismo entre ERBs é prejudicial aos algoritmos DCA-TDMA-TSR-AI sem controle de potência. A fim de verificar como a falta de sincronismo afeta os algoritmos DCA-TDMA-TSR-AI com controle de potência, retirou-se o sincronismo dos algoritmos com os mesmos operando ao mesmo tráfego gerado, permitindo a comparação dos resultados.

Os resultados estão resumidos na tabela 6.8.

Algoritmo		tráfego gerado	prob bloq.	prob. queda por "intracell handoff"	prob. chamada sofrer "intracell handoff"	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR TM-ERB med	SIR ERB-TM med
		(Erl)	(%)	(%)	(%)		(dB)	(dB)
FCA BPC	sinc	800	3,3	0,6	6,0	0,064	27,6	28,6
	sem sinc	800	6,7	1,6	8,0	0,075	24,1	26,5
CHANS BPC	sinc	1690	0,6	0,9	30,3	0,53	21,8	22,2
	sem sinc	1690	11,9	10,0	34,4	0,47	20,4	22,5
SLACA BPC	sinc	1690	1,3	2,1	30,6	0,53	22,1	23,1
	sem sinc	1690	12,4	10,6	33,2	0,43	20,4	22,8
RUP BPC	sinc	1900	0,3	0,5	40,0	0,81	20,6	21,2
	sem sinc	1900	14,2	13,4	41,8	0,61	19,8	21,6

Tabela 6.8 - Efeito da falta de sincronismo em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência.

A tabela 6.8 mostra que a falta de sincronismo provocou um aumento pequeno na probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" com a retirada do sincronismo. Inclusive o número médio de "intracell handoff"s diminuiu com a perda

de sincronismo. Estes resultados podem parecer inesperados pois, conforme explicado, a falta de sincronismo faz com que os "time-slots" comecem a se interferir entre si, provocando maior interferência. Entretanto, ao se observar os resultados de probabilidade de bloqueio e probabilidade de queda de chamadas em andamento, pode-se entender o fenômeno. A alta probabilidade de bloqueio significa que o tráfego sendo alocado no sistema sem sincronismo é muito inferior ao tráfego alocado no caso sincronizado. A maior probabilidade de bloqueio é devida justamente à falta de sincronismo, pois "time-slots" vazios não conseguem ser ocupados devido à interferência gerada por outros TMs, apesar do controle de potência, conforme mencionado no item 5.1.1. Além disso, a alta queda de chamadas por "intracell handoff"s reduz ainda mais o tráfego em andamento no sistema, reduzindo a chance de geração de novos "intracell handoff"s. Assim, o pequeno aumento na probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff"s representa na verdade uma alta diferença se considerarmos que o tráfego alocado foi muito reduzido. Se aumentarmos o nível de tráfego alocado, a probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoff" tende a aumentar.

O menor número médio de "intracell handoff"s por chamada pode ser explicado pelo mesmo fenômeno acima descrito. Dado que esta medida é calculada somente nas chamadas bem sucedidas, a alta probabilidade de queda do caso sem sincronismo retira da média muitas chamadas que possuíam alto número de "intracell handoff" mas que caíram antes de se completar. Maiores estudos são necessários para confirmar esta explicação.

Além disso, a falta de sincronismo também causou uma redução no nível de qualidade das chamadas bem sucedidas.

Observou-se que a falta de sincronismo causou efeitos similares em cada um dos algoritmos. Assim, a mesma não deve afetar significativamente o desempenho relativo entre os algoritmos. Uma melhor análise entre algoritmos está apresentada no item 6.3.4.

Observando as conclusões obtidas neste item com as conclusões obtidas no item 6.2.2, referente ao caso sem controle de potência, pode-se observar que o efeito da falta de sincronismo foi similar em ambos os casos.

6.3.3. Efeito do Controle de Potência em Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com Falta de Sincronismo

No item 6.3.2 observou-se o efeito da falta de sincronismo nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência aplicado. A fim de ilustrar melhor o efeito da falta de sincronismo com controle de potência, aplicou-se controle de potência aos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência e sem sincronismo estudados no item 6.2. A comparação e análise são possíveis porque a única diferença entre os cenários comparados é a introdução do controle de potência.

Os resultados estão resumidos na tabela 6.9:

algoritmo		tráfego gerado	prob bloq.	prob. queda por "intracell handoff"	prob. chamada sofrer "intracell handoff"	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR TM-ERB med	SIR ERB-TM med
		(Erl)	(%)	(%)	(%)		(dB)	(dB)
FCA s/ sinc	NPC	990	7,0	2,8	7,1	0,06	26,7	27,9
	BPC	990	12,2	2,4	8,5	0,07	23,5	26,5
CHANSG s/ sinc	NPC	1330	8,7	5,8	18,9	0,27	25,0	25,3
	BPC	1330	4,1	4,5	31,3	0,50	20,8	22,6
SLACA s/ sinc	NPC	1330	6,7	3,9	16,8	0,25	24,6	25,7
	BPC	1330	4,3	4,6	29,7	0,46	20,8	23,0
RUP s/ sinc	NPC	1470	4,4	2,6	30,8	0,54	21,2	21,5
	BPC	1470	4,4	5,2	38,8	0,71	19,9	21,4

Tabela 6.9 - efeito do controle de potência em algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI operando em sistema sem sincronismo.

Observando a tabela 6.9 e comparando os resultados relativos com os reportados na tabela 6.7, observa-se que o efeito do controle de potência nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI são praticamente os mesmos relatados no item 6.3.1, mesmo na condição de falta de sincronismo.

No algoritmo RUP sem sincronismo, observou-se que a queda no desempenho com a aplicação do controle de potência imperfeito não foi tão grande

como no caso sem sincronismo. Pode-se sugerir que a falta de sincronismo já estaria perturbando os padrões de reuso o bastante; entretanto, maiores estudos são necessários.

Pode-se observar também que o desbalanceamento entre os SIRs médios do sentido TM-ERB e sentido ERB-TM foi superior no caso com controle de potência, mostrando valores superiores a 1,5dB, chegando a até 3dB.

A partir destes resultados, pode-se concluir que o efeito relativo que o controle de potência causa nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI é independente do sincronismo no sistema.

6.3.4. Comparação de Desempenho entre Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com Controle de Potência

A fim de comparar o desempenho dos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência, simularam-se o mesmo cenário com o mesmo tráfego, modificando-se somente o algoritmo de alocação. Primeiramente serão comparados os algoritmos sob sincronismo e posteriormente os mesmos serão comparados sob o efeito da falta de sincronismo.

6.3.4.1. Comparação de Algoritmos com Sincronismo

Os resultados com sincronismo estão resumidos na tabela 6.10:

algoritmo	tráfego gerado (Erl)	prob bloq (%)	prob. de queda por "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR TM-ERB med (dB)	SIR ERB-TM med (dB)
FCA-BPC	1900	34,6	4,3	8,6	0,05	25,2	27,7
CHANSB-BPC	1900	1,9	3,1	35,3	0,62	21,3	22,0
SLACA-BPC	1900	3,2	5,0	35,4	0,59	21,7	22,8
RUP-BPC	1900	0,3	0,5	40,0	0,81	20,6	21,2

Tabela 6.10 - Comparação de Desempenho de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência e com sistema operando de forma sincronizada.

Analisando a tabela 6.10, pode-se observar que os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI oferecem desempenho superior ao algoritmo FCA-TDMA em sistemas sincronizados. Os algoritmos DCA conseguem reduzir bastante a probabilidade de bloqueio com pouco aumento na probabilidade de queda. Entretanto, a chance de chamadas sofrerem "intracell handoff"s aumenta bastante alcançando valores de até 40%, enquanto o algoritmo FCA opera com 8,6% sob o mesmo tráfego gerado. A alta probabilidade de uma chamada sofrer "intracell handoff" provoca um alto número médio de "intracell handoff" por chamada.

O compromisso entre qualidade e capacidade pode ser novamente observado nas medidas de SIR médio obtido em ambos os sentidos de propagação. Mesmo sob alta carga, o algoritmo FCA obteve de 4dB a 5dB a mais no SIR médio de suas chamadas.

Comparando os algoritmos DCA entre si, pode-se observar que, da mesma forma que no caso analógico com controle de potência, os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência tiveram desempenhos mais semelhantes do que os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sem controle de potência.

Apesar dos problemas impostos pelo controle de potência imperfeito, o algoritmo RUP com controle de potência se mostrou o algoritmo que consegue as menores probabilidades de bloqueio e queda para o mesmo tráfego gerado. Da mesma forma que no caso TDMA sem controle de potência (vide item 6.2.1), o algoritmo RUP mostrou uma maior probabilidade de uma chamada sofrer "intracell handoff" devida à maior incidência de chamadas alocadas com nível de SIR próximo ao nível de SIR mínimo. Dessa forma, as chamadas ficam mais susceptíveis à interferências que causam "intracell handoff". A menor probabilidade de queda por falha em "intracell handoff" verificada no algoritmo RUP reforça a hipótese de este algoritmo possui boa capacidade de rearranjar chamadas.

Diferentemente do caso sem controle de potência, o algoritmo SLACA com controle de potência foi o que mostrou o pior desempenho, pois resultou na maior probabilidade de bloqueio e na maior probabilidade de queda. Note que a maior probabilidade de bloqueio resulta em um menor tráfego entrante. Mesmo com este menor tráfego entrante, o algoritmo SLACA mostrou uma pior probabilidade de queda de chamadas por "intracell handoff". Note que o pior desempenho do

algoritmo SLACA se deve principalmente à sua forma de alocar chamadas. Lembre-se que este algoritmo procura concentrar chamadas em portadoras já em uso pelo sistema. Esta sistemática de alocação realça o controle de potência imperfeito, degradando o desempenho final.

Os histogramas de SIR dos algoritmos operando sob 1900 Erlangs de tráfego está apresentado na figura 6.8 para auxiliar e confirmar conclusões obtidas.

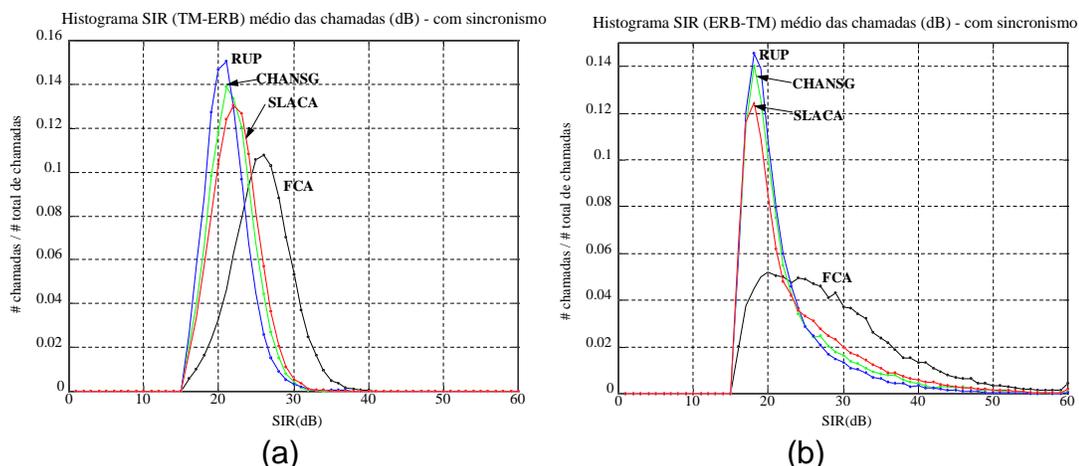


Fig. 6.8 - Histogramas de SIR médio para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência, com sincronismo e sob o mesmo tráfego de 1900 Erlangs.
 (a): Histograma de SIR (TM-ERB) médio de chamadas completadas;
 (b): Histograma de SIR (ERB-TM) médio de chamadas completadas;

Pode-se observar grandes diferenças entre o sentido TM-ERB e o sentido ERB-TM na figura 6.8. Observe na figura 6.8-a que no sentido TM-ERB, o formato dos histogramas é bem semelhante aos formatos encontrados no caso analógico com controle de potência (veja por exemplo figura 4.20), mostrando que os algoritmos conseguem aplicar o controle de potência de forma ideal neste sentido de propagação; entretanto o histograma de SIR médio no sentido ERB-TM ilustra os problemas mencionados no item 5.1.1, mostrando que o controle de potência imperfeito faz com que a potência transmitida seja superior à necessária em boa parte das chamadas. Note que enquanto o histograma no sentido TM-ERB possui valores de SIR até 30dB, o histograma no sentido ERB-TM apresenta valores de SIR até 40dB nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI, justificando o maior SIR médio das chamadas no sentido ERB-TM.

6.3.4.2. Comparação de Algoritmos sem Sincronismo

Ao final do item 6.3.2, sugeriu-se que a falta de sincronismo não perturba o desempenho relativo entre os algoritmos. A fim de confirmar tal fenômeno, levantou-se o comportamento dos algoritmos sobre o mesmo tráfego gerado sem sincronismo.

Os resultados sem sincronismo estão resumidos na tabela 6.11:

Algoritmo	prob. bloq. (%)	prob. de queda por "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR TM-ERB médio (dB)	SIR ERB-TM médio (dB)
FCA-BPC	28,2	4,1	9,3	0,06	22,7	26,6
CHANSO-BPC	7,1	7,0	33,2	0,50	20,5	22,5
SLACA-BPC	7,1	7,0	32,2	0,48	20,6	22,8
RUP-BPC	4,4	5,2	38,8	0,71	19,9	21,3

Tabela 6.11 - Comparação de Desempenho de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência, com sistema operando sem sincronismo e com 1470 Erlangs de tráfego gerado.

Observando a tabela 6.11, pode-se verificar que boa parte das conclusões acima tiradas para o caso sincronizado se mantiveram. Isto é, ao comparar com o algoritmo FCA, observaram-se menores probabilidades de bloqueio e maiores probabilidades de chamada sofrer "intracell handoff", acompanhadas de maiores números médios de "intracell handoff" por chamada.

Os algoritmos continuam com desempenho similar entre si. O algoritmo RUP continua com melhor desempenho mesmo com a perda de sincronismo; porém com menor diferença para com os outros algoritmos.

Não se observou diferença no desempenho entre os algoritmos SLACA e o CHANSO. Lembrando que o algoritmo SLACA possuía desempenho ligeiramente pior que o algoritmo CHANSO no caso com sincronismo, observa-se que o desempenho do algoritmo SLACA foi menos degradado que o algoritmo CHANSO ao retirar o sincronismo do sistema. Conforme verificado no caso sem controle de potência, o algoritmo SLACA sofre menos com a perda de sincronismo ao procurar

alocar canais em portadoras já existentes. É interessante observar que este mesmo procedimento realça a imperfeição do controle de potência.

Os histogramas de SIR dos algoritmos operando sem sincronismo sob 1470 Erlangs de tráfego está apresentado na figura 6.9 para auxiliar e confirmar conclusões obtidas.

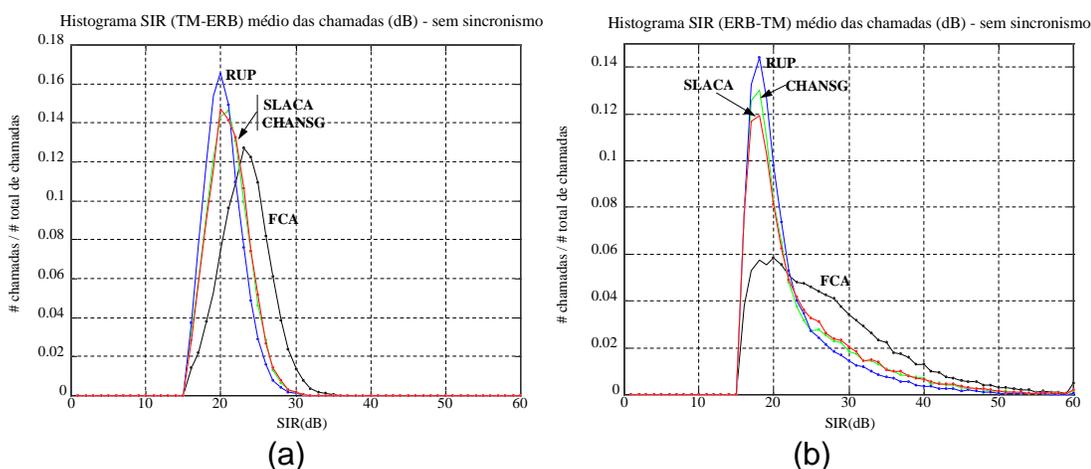


Fig. 6.9 - Histogramas de SIR médio para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência, sem sincronismo e sob o mesmo tráfego de 1470 Erlangs.

(a): Histograma de SIR (TM-ERB) médio de chamadas completadas;

(b): Histograma de SIR (ERB-TM) médio de chamadas completadas;

Ao comparar os histogramas da figura 6.9 com os da figura 6.8 pode-se verificar que os histogramas mantêm formato relativo bastante similar.

As conclusões obtidas a partir da tabela 6.11 e a similaridade entre os histogramas de SIR confirma que a falta de sincronismo afeta, aproximadamente, da mesma forma os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência, mantendo o desempenho relativo entre os mesmos. O algoritmo SLACA foi o único ligeiramente beneficiado.

Deve-se mencionar que as medidas de desempenho obtidas nas tabelas 6.10 e 6.11 também foram obtidas para outros valores de tráfego, mantendo-se as conclusões.

6.3.5. Análise de Capacidade de Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com Controle de Potência

A fim de comparar a capacidade fornecida por cada algoritmo DCA-TDMA-RTS-AI com a capacidade fornecida pelo algoritmo FCA em sistemas TDMA, deve-se equalizar o desempenho dos algoritmos. Assim, os parâmetros dos algoritmos foram ajustados de forma a cursar o máximo de tráfego possível com o sistema operando de forma aceitável.

Neste item, considerou-se a equalização dos algoritmos para que os mesmos operassem dentro das seguintes condições:

- probabilidade de bloqueio: $\leq 5\%$;
- probabilidade de queda de chamadas por "intracell handoff": $\leq 3\%$;
- nível de "SIR_10%" médio: $\geq 19\text{dB}$ (sentido TM-ERB) e $\geq 18\text{dB}$ (sentido ERB-TM).

A probabilidade da chamada sofrer "intracell handoff" e o número médio de "intracell handoff"s por chamada não foram considerados como parâmetros de equalização. Entretanto, deve-se observar que os algoritmos devem possuir estes valores reduzidos de forma a não exigir um processamento excessivo da ERB⁴⁷.

Somente a condição sem sincronismo foi considerada, dada que a mesma representa um pior caso.

Da mesma forma que nos outros cenários, o parâmetro de ajuste utilizado em cada algoritmo foi o SIR de Aceitação de chamadas ("SIR_Aceit", "SIR_Intraho"). Diversas simulações com diversos valores para os níveis de SIR de Aceitação para cada algoritmo foram efetuadas e os parâmetros finais utilizados foram:

algoritmo	SIR de Aceitação (dB)
FCA	15,0
CHANSO	16,5
SLACA	16,5
RUP	17,0

Tabela 6.12 - Parâmetros utilizados para equalização dos algoritmos com sistema operando sem sincronismo.

⁴⁷ está-se supondo que sistemas distribuídos possuirão processamento distribuído ficando a ERB encarregada de boa parte do processamento para alocação e realocação de chamadas.

A tabela 6.13 apresenta os resultados obtidos com os sistemas equalizados e operando a 5% de probabilidade de bloqueio.

Algoritmo	tráfego gerado (Erl)	prob. bloq. (%)	prob. de queda por "intracell handoff" (%)	prob. de chamada sofrer "intracell handoff" (%)	# médio de "intracell handoffs" por chamada	SIR TM-ERB med (dB)	SIR ERB-TM med (dB)
FCA	726	5,0	1,3	7,5	0,07	24,5	26,8
CHANSNG	1216	5,0	2,9	20,5	0,28	21,5	23,0
SLACA	1175	5,0	2,8	18,3	0,24	21,7	23,7
RUP	1264	5,0	2,9	21,7	0,31	21,1	22,2

Tabela 6.13 - Comparação de Capacidade de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência em relação ao FCA, com sistema operando sem sincronismo.

Os resultados da tabela 6.13 confirmam que os algoritmos estavam operando de forma equalizada com respeito à estabilidade. Pode-se observar comportamentos de estabilidade e qualidade similares entre os algoritmos. A figura 6.10 mostra que os algoritmos também se encontravam equalizados com respeito à qualidade, mostrando o mesmo nível "SIR_10%" entre os algoritmos.

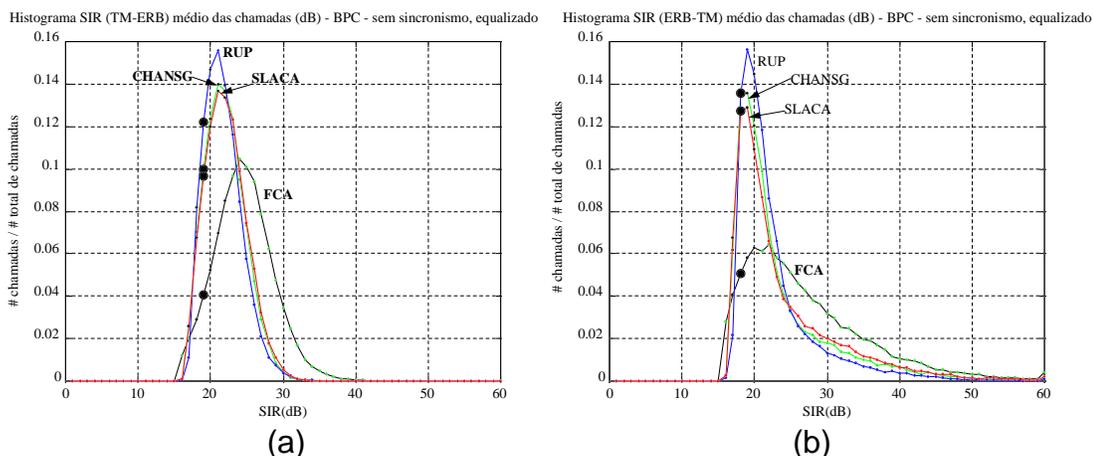


Fig. 6.10 - Histogramas de SIR para Algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência, sem sincronismo e com parâmetros ajustados para equalização.
 (a): Histograma de SIR (TM-ERB) médio de chamadas completadas;
 (b): Histograma de SIR (ERB-TM) médio de chamadas completadas.

Com respeito à capacidade, a tabela 6.14 apresenta o ganho de capacidade resultante de cada algoritmo:

Algoritmo	Ganho de Capacidade sobre algoritmo FCA (5% de prob. Bloqueio) (%)
CHANSG	67
SLACA	62
RUP-TDMA	74

Tabela 6.14 - Ganho de capacidade de algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI sobre algoritmo FCA, com parâmetros ajustados para equalização e com sistema operando sem sincronismo.

Pode-se observar que o algoritmo RUP é o que possui melhor desempenho dentre todos os algoritmos. Entretanto, a diferença não é significativa, da mesma forma que observado no caso sem controle de potência.

Deve-se observar que o algoritmo FCA esteve ajustado para máxima capacidade, com seu nível de SIR de Aceitação ajustado igual ao nível de SIR mínimo do sistema.

6.3.6. Resumo das Observações

Confirmou-se que as imperfeições no controle de potência devidas às limitações tecnológicas podem causar diferenças no desempenho dos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI. Observou-se que um controle de potência imperfeito causa maior potência transmitida no sentido ERB-TM, dificultando a alocação de chamadas, provocando interferência em outras chamadas e contribuindo para a alta probabilidade das chamadas sofrerem "intracell handoffs" nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI com controle de potência.

O efeito da falta de sincronismo também foi analisado nos algoritmos utilizando controle de potência. Conclui-se, da mesma forma que no caso sem controle de potência, que a falta de sincronismo causa maior probabilidade de bloqueio e maior probabilidade de chamadas sofrerem "intracell handoffs". Verificou-se ainda que estas degradações afetam os algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI

aproximadamente da mesma forma, sendo o algoritmo SLACA o que menos se degrada pelo efeito da falta de sincronismo. Entretanto, este algoritmo realiza o controle de potência imperfeito.

Verificou-se que o efeito do controle de potência no desempenho dos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI é independente do sincronismo no sistema. O efeito do controle de potência nos algoritmos variou. O algoritmo CHANSG conseguiu melhor desempenho com o controle de potência enquanto o algoritmo SLACA teve pouca melhora. O algoritmo RUP mostrou desempenho pior com o controle de potência.

Apesar dos diferentes efeitos do controle de potência, o ganho de capacidade final de cada algoritmo sobre o FCA foi parecido, variando de 62% de ganho no algoritmo SLACA a 74% de ganho no algoritmo RUP. Note que no caso sem controle de potência a diferença de ganho entre algoritmos é maior, provavelmente porque RUP não possui seu desempenho degradado neste caso.

7. Conclusões

A partir dos diversos resultados encontrados neste trabalho, pode-se verificar que a análise de desempenho de algoritmos DCA-AI não pode ser feita analisando-se somente a probabilidade de bloqueio. Verificou-se que a análise de capacidade baseada somente nesta medida pode levar a conclusões errôneas. A análise deve levar em consideração capacidade, qualidade e estabilidade de chamadas de forma conjunta.

Neste trabalho, os aspectos de qualidade e estabilidade dos algoritmos foram analisados em detalhes juntamente com a capacidade dos mesmos. Diversas medidas de desempenho de estabilidade verificaram que algoritmos que alocam suas chamadas com nível de SIR muito próximo ao nível de SIR mínimo são mais sujeitos à instabilidade. Histogramas de SIR de alocação se revelaram uma ótima ferramenta para análise da instabilidade dos algoritmos. Quanto à qualidade, pode-se verificar o compromisso entre qualidade e capacidade de um algoritmo DCA-AI. Histogramas de SIR médio das chamadas também foram apresentados, permitindo uma análise mais completa do desempenho dos algoritmos.

Confirmou-se que o nível de SIR de Aceitação dos algoritmos é um parâmetro importante dos algoritmos DCA-AI que consegue regular diretamente os aspectos de qualidade, estabilidade e capacidade dos algoritmos, podendo ser utilizado como um parâmetro de ajuste e equalização dos algoritmos. Verificou-se que um maior SIR de Aceitação força a alocação de chamadas em canais que lhe permitam um maior nível SIR de alocação fornecendo-as maior margem para suportar interferências adicionais que venham a acontecer durante a duração das chamadas, melhorando a estabilidade dos algoritmos. Ao mesmo tempo, ao aumentar o nível SIR de Aceitação, aumenta-se a qualidade média das chamadas. Por outro lado, a capacidade do algoritmo DCA-AI é penalizada pelo maior SIR de alocação requerido, pois o mesmo força um espaçamento maior entre Terminais Móveis reutilizando um mesmo canal.

O impacto de diferentes aspectos de um sistema celular foram analisados separadamente. Controle de potência, mobilidade e limitação no número de transceptores foram analisados.

A implementação de algoritmos DCA-AI foi estudada em detalhes em sistemas TDMA. A falta de sincronismo entre portadoras de diferentes células e a imperfeição no controle de potência mostraram ser aspectos que não podem ser desprezados na análise.

O trabalho estudou cada um destes aspectos simulando a inclusão de cada aspecto passo a passo, permitindo a análise detalhada do efeito de cada um deles.

Verificou-se que o controle de potência permite que as ERBs e Terminais Móveis gerem menos potência interferente no sistema. Os algoritmos DCA-AI conseguem se aproveitar deste fato para alocar mais chamadas no sistema. Por outro lado, o nível de sinal desejado também é reduzido, causando a alocação de chamadas com níveis de SIR muito próximos ao nível de SIR mínimo, aumentando a instabilidade no sistema. O ajuste dos níveis de SIR de Aceitação foi necessário para equalizar a estabilidade e qualidade do sistema. Apesar da equalização, os algoritmos DCA-AI com controle de potência conseguem ganhos de capacidade superiores ao algoritmo FCA, sendo inclusive superiores aos ganhos obtidos no caso sem controle de potência.

A introdução da mobilidade de usuários causou alto impacto na instabilidade do sistema devido à alta variabilidade dos níveis de interferência no sistema. Foram necessários níveis de SIR de Aceitação muito mais altos do que os utilizados no caso sem mobilidade para nivelar a probabilidade de queda de chamadas em níveis aceitáveis. O ganho de capacidade reduziu bastante com a introdução da mobilidade. Verificou-se que a mobilidade não influencia nas características de cada algoritmo e a introdução do controle de potência juntamente com mobilidade de usuários mostrou os mesmos efeitos qualitativos que no caso sem mobilidade.

Analisou-se também o efeito da limitação do número de transceptores equipados em cada ERB e verificou-se que não é necessário equipar todas as ERBs com todos os transceptores; entretanto, os transceptores e seus sistemas de antenas devem ser capazes de se auto ajustar aos diferentes canais sendo alocados nos mesmos. Verificou-se também que esta limitação não afeta aspectos de qualidade e estabilidade dos algoritmos. Sugeriu-se um simples método para determinar o número de transceptores necessários para evitar a ocorrência de bloqueio por falta de transceptores.

A implementação de algoritmos DCA em sistemas TDMA também foi estudada e verificou-se que não se pode aplicar os resultados obtidos no caso analógico/FDMA diretamente. As limitações tecnológicas como a falta de sincronismo e a dificuldade em sintonizar diferentes portadoras e potência entre "time-slots" de um transceptor mostraram-se aspectos que não se podem desprezar. Resultados mostraram que a falta de sincronismo causa forte degradação no sistema, piorando a capacidade, estabilidade e qualidade dos sistemas. A imperfeição no controle de potência entre "time-slots" de um mesmo transceptor também causou degradação na capacidade e na estabilidade das chamadas. Verificou-se ainda que a falta de sincronismo afeta o sistema TDMA com controle de potência da mesma forma que no caso sem controle de potência.

Este trabalho comparou diversos algoritmos DCA de sistemas analógicos/FDMA e TDMA no mesmo ambiente de simulação permitindo uma perfeita comparação entre o desempenho dos mesmos. O algoritmo RUP confirmou-se como um sendo um dos melhores algoritmos DCA, conforme verificado na literatura, principalmente na situação sem controle de potência. A aplicação do controle de potência nivela o desempenho dos algoritmos, em todos os cenários simulados, podendo-se selecionar algoritmos de menor complexidade que o desempenho não será muito afetado. No caso do sistema analógico, pode-se verificar inclusive que o algoritmo QUAL, apesar de parecer muito conservador a princípio, mostrou-se possuir a estabilidade suficiente para suportar as grandes variações de potência interferente que foram verificadas nas simulações com mobilidade. Assim, o algoritmo QUAL é um ótimo candidato em situações de controle de potência ou caso o algoritmo RUP encontre problemas de implementação.

No caso do sistema TDMA, sugeriu-se a implementação de um algoritmo RUP de portadoras baseado em pequenas modificações no algoritmo RUP do sistema analógico/FDMA e verificou-se que o mesmo permite melhor desempenho que os algoritmos CHANSO e SLACA anteriormente citados na literatura. Verificou-se que os algoritmos CHANSO e SLACA possuem desempenhos semelhantes, com ligeira vantagem para o algoritmo SLACA que se comporta melhor em ambientes

sem sincronismo, apesar do mesmo sofrer maior degradação com a imperfeição do controle de potência.

A tabela 7.1 resume os resultados referentes aos ganhos de capacidade dos algoritmos DCA-AI nas diversas situações simuladas:

Sistema		Ganho de Capacidade sobre algoritmo FCA (condição equalizada)	
		sem mobilidade	com mobilidade
Analógico	sem controle de potência	de 29% a 70% (tabela 4.9)	de -6% a 55% (figura 4.30)
	com controle de potência	de 84% a 94% (tabela 4.16)	de 19% a 33% (figura 4.35)
TDMA (sem sincronismo)	sem controle de potência	de 16% a 31% (tabela 6.5)	estudos futuros
	com controle de potência (imperfeito)	de 67% a 74% (tabela 6.14)	estudos futuros

Tabela 7.1 - Resumo dos ganhos de capacidade obtidos nos diversos cenários do trabalho.

Nas condições com mobilidade, pode-se verificar que os ganhos dos algoritmos DCA são mais modestos que os ganhos normalmente encontrados na literatura, dado que estes não consideraram o movimento dos usuários. Pode-se inferir ainda que o impacto da mobilidade também será sentido de forma semelhante nos algoritmos DCA para sistemas TDMA.

Dessa forma, conclui-se que os algoritmos DCA não devem ser considerados principalmente para aumentar a capacidade de sistemas. Este é um aspecto secundário dos mesmos. Os algoritmos DCA devem ser considerados principalmente pelas suas características de planejamento automático de frequências e adaptabilidade às variações de tráfego.

Adicionalmente, este trabalho analisou cuidadosamente aspectos teóricos que permitem guiar o leitor na interpretação dos resultados divergentes encontrados na literatura, permitindo verificar o impacto dos diversos parâmetros do sistema no

desempenho de algoritmos DCA-AT e DCA-AI. O trabalho também conseguiu verificar formulações teóricas que relacionam a capacidade do sistema com a qualidade do mesmo, validando os resultados obtidos e a formulação teórica. Verificou-se também que os algoritmos DCA simulados se encontraram dentro do intervalo teórico de variação do ganho de capacidade.

Um completo Sistema Simulador (vide apêndice A) foi totalmente modelado e construído especialmente para a simulação de métodos de alocação de canais em sistemas celulares. A modularidade do mesmo permitirá diversas futuras pesquisas que se venham realizar.

8. Estudos Futuros

Conforme pode ser verificado neste trabalho, o tema de alocação dinâmica de canais em sistemas celulares é muito extenso e os resultados aqui apresentados devem ser complementados com estudos futuros.

Como possíveis tópicos para futuras pesquisas, podem-se citar:

a) Análise do impacto da variação de tráfego no sistema: conforme mencionado no capítulo 3, uma das principais vantagens dos algoritmos DCA é a sua adaptabilidade às variações de tráfego no sistema. Os resultados aqui apresentados consideraram o tráfego uniformemente distribuído. Um tópico interessante para futura pesquisa é o impacto da variabilidade temporal e espacial de tráfego entre células. Espera-se que os algoritmos DCA-AI possam oferecer probabilidades de bloqueio bem menores do que o algoritmo FCA nestas condições.

b) Análise da Mobilidade de Terminais Móveis em sistemas TDMA: embora os resultados obtidos na análise deste aspecto no sistema analógico / FDMA permitam inferir o impacto do mesmo no desempenho de sistemas TDMA, maiores estudos devem ser realizados para se confirmar o efeito do mesmo no desempenho de algoritmos DCA para sistemas TDMA. O Sistema Simulador já está preparado para a simulação destes cenários.

c) Análise da limitação de transceptores em sistemas TDMA: embora os resultados obtidos na análise deste aspecto no sistema analógico / FDMA permitam inferir o impacto do mesmo no desempenho de sistemas TDMA, o problema de "canais inacessíveis" (vide capítulo 5) nos transceptores pode exigir transceptores de alta tecnologia que permitam a mudança de portadora entre "time-slots" ou o número de transceptores necessários para evitar a degradação por falta de transceptores que pode ser alta. O Sistema Simulador já está preparado para estudar este aspecto.

d) Análise de Algoritmos DCA-TDMA-RP-AI: conforme visto no capítulo 6, a falta de sincronismo entre "time-slots" causa redução nos ganhos de capacidade e maior instabilidade nos algoritmos DCA-TDMA-RTS-AI. Como alternativa a este problema, algoritmos DCA-TDMA-RP-AI devem ser melhor estudados.

e) Análise em sistemas microcelulares: os resultados apresentados aqui consideraram sistemas macrocelulares. Antes de se aplicar os resultados aqui obtidos em sistemas microcelulares, maiores estudos devem ser realizados devido às diferentes condições de propagação e interferência dos ambientes microcelulares.

f) Análise de outros tipos de controle de potência: alguns trabalhos, inclusive trabalhos teóricos [70,80], mostraram que o controle de potência baseado no nível SIR da chamada pode melhorar a capacidade de algoritmos DCA-AI [32,34,58,59,63,67]. Entretanto, outros problemas de instabilidade podem aparecer [58,59,63]. Dado o comportamento diferente do algoritmo com este tipo de controle de potência, maiores estudos devem ser realizados antes de aplicar os resultados aqui obtidos. Além disso, nenhum trabalho conhecido fez uma análise da diferença entre os dois tipos de controle de potência. Deve-se observar que o Sistema Simulador desenvolvido neste trabalho já está preparado para a simulação deste tipo de controle de potência.

g) Análise das medidas para determinação da disponibilidade dos canais: todos os cenários aqui simulados consideraram que o Terminal Móvel e a ERB eram capazes de inferir e medir o nível SIR presente nos canais. Entretanto, alguns trabalhos mencionaram a dificuldade em se obter tais medidas [14,27,80], especialmente no momento de alocação de um canal. Deve-se estudar degradações que erros nesta medida possam gerar. Pode-se também estudar a medida de potência interferente recebida como critério alternativo para determinar a disponibilidade dos canais⁴⁸, confrontando os resultados com os aqui reportados.

h) Análise da variação do grau-de-serviço na área de cobertura da célula: os resultados aqui obtidos consideraram a média das medidas de desempenho. Entretanto, o fato dos algoritmos DCA-AI basearem suas alocações nas medidas de interferência e SIR, a localização do Terminal Móvel relativa à ERB certamente influi na probabilidade de bloqueio [9,78]. Esta é uma característica indesejada no sistema e maiores estudos são necessários para analisar em detalhes este fenômeno e como os algoritmos DCA-AI podem ser ajustados para balancear este efeito.

⁴⁸ por exemplo, o algoritmo QUAL escolheria o canal de menor potência interferente.

i) Análise da combinação da facilidade de Reroteamento de chamadas com algoritmos DCA-AI: conforme anteriormente mencionado, os algoritmos DCA-AI simulados aqui não permitiram o reroteamento de chamadas para ERBs vizinhas. O Sistema Simulador desenvolvido já está preparado para a análise da introdução desta facilidade, permitindo a comparação com os resultados aqui encontrados.

j) Análise do uso de algoritmos DCA em sistemas com células hierárquicas [5,81,82]: a cobertura de uma área com apenas microcélulas pode acarretar em um custo muito alto para a operadora do serviço celular [82]. Uma das formas de minimizar este alto custo, é combinar micro e macro células. Entretanto, ao dividir o espectro de frequências em diferentes conjuntos de frequências para micro e macrocélulas, perde-se capacidade no sistema. Além disso, as pequenas dimensões das microcélulas causarão muitos "intercell handoffs" em Terminais Móveis operando dentro de veículos [81]. Poucos trabalhos estudaram a melhor maneira de se dividir os canais entre as duas camadas de células e o comportamento dos algoritmos DCA nestes ambientes ainda necessita estudos devido às diferentes condições de interferência entre macro e microcélulas reusando o mesmo canal.

k) Implementação do Canal de Controle: conforme mencionado no item 3.2.6, a forma de implementação do canal de controle ainda não foi bem pesquisada, sendo necessários estudos neste assunto para permitir a implementação dos algoritmos DCA. Algoritmos DCA-AI Híbridos são uma boa opção, conforme sugerido por Hansen [42], entretanto, a mesma exige o planejamento de frequências.

l) Análise da redução no número de canais sendo vasculhados: em todos os algoritmos deste trabalho, considerou-se que todos os canais são vasculhados pelo Terminal Móvel e pela ERB durante a alocação de um canal para uma chamada. Conforme já mencionado no item 3.2.6, tal funcionalidade pode impactar diretamente no tempo de conexão. Assim, maiores estudos devem ser realizados para analisar o efeito da redução do número de canais sendo vasculhados para a alocação de um canal.

m) Análise da aplicação de algoritmos DCA em sistemas CDMA: o aparecimento de sistemas CDMA e a sua potencialidade para uso em sistemas

futuros sugerem a importância do estudo da aplicação de algoritmos DCA em sistemas CDMA.

Além dos tópicos acima mencionados, que envolvem um grande trabalho de simulação e análise de resultados, pode-se sugerir tópicos de pesquisa teórica para algoritmos DCA:

o) Análise teórica da capacidade de rearranjo dos algoritmos: se uma chamada não conseguiu ser alocada da melhor forma possível, a ocorrência de "intracell handoff" pode beneficiar o sistema ao permitir uma nova chance para esta chamada ser alocada de forma ótima permitindo que outras chamadas possam ocupar o sistema. Alguns resultados obtidos neste trabalho mostraram que o algoritmo RUP em alguns cenários mostrou aumento da probabilidade de ocorrência de "intracell handoff" mas sem o correspondente aumento na probabilidade de queda de chamada, sugerindo que o algoritmo RUP talvez esteja conseguindo rearranjar suas chamadas, melhorando a configuração do sistema. Modelos alternativos podem auxiliar no esclarecimento da questão.

p) Múltiplos "Intracell handoffs" em seqüência: os resultados obtidos neste e na maioria dos trabalhos pesquisados sempre consideraram que a ocorrência de "intracell handoffs" causados pela realocação de uma chamada que sofreu "intracell handoffs" da mesma forma que o "intracell handoff" causado por uma nova chamada. Note que seqüências de "intracell handoffs" podem ser muito prejudiciais à instabilidade do sistema. Neste trabalho considerou-se que os "intracell handoffs" eram executados instantaneamente e sucessivos "intracell handoffs" eram tratados até o seu fim antes do surgimento de uma nova chamada. Observe que a ocorrência de novas chamadas durante uma seqüência de "intracell handoffs" pode forçar o sistema a um estado instável, onde muitas chamadas estejam necessitando de "intracell handoff". Estudos na área de instabilidade de sistemas operando com algoritmos DCA-AI podem ajudar a avaliar este aspecto.

q) Validação da premissa de estado estacionário único: Considerou-se neste trabalho que o sistema celular operando com um algoritmo DCA possui somente um estado estacionário para um dado conjunto de parâmetros e entradas. Estudos devem ser realizados a fim de confirmar tal premissa.

r) Medidas de desempenho alternativas: conforme pode ser observado no decorrer do trabalho, as medidas de desempenho utilizadas possuem uma correlação muito forte entre si, dificultando a análise dos resultados. O estudo de medidas de desempenho menos correlacionadas pode facilitar no estudo e comparação dos algoritmos.

s) Melhores Limites Teóricos: conforme pode-se verificar ao final de cada item de resultados, os resultados de capacidade encontrados estão dentro dos limites teóricos apresentados no item 3.2.4. Entretanto, pode-se observar que a variação entre estes limites é muito grande. Estudos de limites teóricos com menor variação representam um tópico importante para futuras pesquisas.

t) Análise teórica para algoritmos DCA em sistemas TDMA: a formulação teórica do item 3.2.4 mostrou ser útil na análise de algoritmos DCA-AI para sistemas analógicos / FDMA. É interessante a extensão da mesma para a análise de algoritmos DCA para sistemas TDMA, considerando os efeitos de falta de sincronismo e controle de potência imperfeito.

9. Bibliografia

- [1] LEE, W.C.Y. **Mobile Cellular Telecommunications**. 2.ed. Nova Iorque, McGraw-Hill, 1995.
- [2] LEE, W.C.Y. Smaller Cells for Greater Performance. **IEEE Communications Magazine**., pp. 19-23. Novembro 1991.
- [3] ERIKSSON, GUDMUNDSON, SKOLD, UGLNAD , WILLARS. Multiple Access Options for Cellular Based Personal Communications. **IEEE Veh. Tech. Conf.-93**, pp. 957-962, Maio1993.
- [4] ERIKSSON, H.. Personal Communications - a Possible Evolution of Cellular TDMA. **Proc. IEEE ICC'93**; pp. 930-934. 1993.
- [5] HAMABE, K.; FURUYA, Y. Distributed dynamic channel allocation for the evolution of TDMA cellular systems. **IEICE Transactions on Communications** Vol: E79-B Iss: 3 p. 230-6, Março 1996.
- [6] WEI, W.; SOONG, B.H.; TAN, P.T.; GUNAWAN, E.; SOH, C.B. Distributed Algorithms for Dynamic Channel Allocation in Cellular Mobile Systems. **IEEE 0-7803-1823-4/94**. Abril 1994.
- [7] CIMINI, L.J.; FOSCHINI, G.J.; CHIN-LIN,I. Call Blocking Performance of Distributed Algorithms for Dynamic Channel Allocation in MicroCells. **IEEE Trans. Commun.** pp2600-2607, Agosto 1994.
- [8] EVERITT D.; MANFIELD, D.. Performance Analysis of Cellular Mobile Communication Systems with Dynamic Channel Assignment. **IEEE Journ. on. Sel. Areas in Commun.**, Outubro 1989.
- [9] VALENZUELA,R. Dynamic Resource Allocation in Line-Of-Sight Microcells. **IEEE Journal of Selected Areas on Communications**, Agosto 1993.
- [10] AKAIWA, Y. ANDOH, H.. Channel Segregation - A Self Organized DCA Method: Application to TDMA/FDMA Microcellular Systems. **IEEE Journal of Sel. Areas in Comm.**, Agosto 1993.
- [11] BECK,R.; PANZER,H. Strategies for Handover and Dynamic Channel Allocation in Micro-Cellular Mobile Radio Systems. **IEEE Veh. Tech. Conference. 1989**, pp. 668-672. Maio 1989.
- [12] BECK,R.; PANZER,H. Adaptive Resource Allocation in Metropolitan Area Cellular Networks. **IEEE Veh. Tech. Conf. 1990**. Maio1990

- [13] ALMGREN,M.; ANDERSSON, H.; WALLSTEDT,K.. Capacity Enhancements in a TDMA System. **Proc. IEEE Veh. Tech. Conf.**, Secaucus, pp. 277-280, Maio1993.
- [14] JUSTIN C.-I. CHUANG. Performance Issues and Algorithms for DCA. **IEEE Journal of Selected Areas**, Agosto 1993.
- [15] RAITH,K.; UDDENFELDT, J.. Capacity of Digital Cellular TDMA Systems. **IEEE Trans. Veh. Tech.** pp. 323-332, 1991. Maio1991.
- [16] SEONG-LYUN KIM; YOUNGNAM HAN; SEON-HO HWANG. A traffic and interference adaptive DCA algorithm with rearrangement in microcellular systems. **IEEE Vehicular Technology Conference 1995**. Countdown to the Wireless Twenty-First Century (Cat. No.95CH35821and 95CB35821) pp. 130-4 vol.1. 1995.
- [17] SERIZAWA,M.;GOODMAN, D. Instability and Deadlock of Distributed DCA **IEEE Veh. Tech. Conf. 1993**, Maio 1993, pp. 528-531
- [18] SERIZAWA,M.; GOODMAN,D.J. Traffic Sharing Scheme for Distributed Dynamic Channel Allocation **17th IEE European Conf. on Mobile and Personal Communication**, pp. 131-135, Dezembro 1993
- [19] SERIZAWA, M.; ASAKAWA, S. Interruption characteristics of distributed dynamic channel allocation with reuse partitioning and power control. **Transactions of the Institute of Electronics**, Information and Communication Engineers B-II Vol: J78B-II Iss: 6 p. 421-34 Date: Junho 1995
- [20] GOODMAN, D.J.; GRANDHI, S.A., VIJAYAN, R. Distributed Dynamic Channel Assignment Schemes **IEEE Veh. Tech. Conf. 1993**, pp. 532-535, Maio1993.
- [21] KATZELA, I.; NAGHSHINEH, M. Channel Assignment Schemes for Cellular Mobile Telecommunication System: A Comprehensive Survey. **IEEE Personal Communications**, pp. 10-31, Junho 1996.
- [22] ONOE,S; YASUDA,S. Flexible Re-use for DCA in Mobile Radio Systems **Proc. IEEE ICC' 89**, pp. 472-476, Junho 1989.
- [23] FURUKAWA,H.; AKAIWA, Y. Self-Organized Reuse partitioning, a Distributed Dynamic Channel Assignment Method in Cellular Systems. **Electronics and Communications in Japan**, Part I, Vol. 80, No.5, pp. 67-75. 1997.
- [24] KANAI, T. Autonomous Reuse Partitioning in Cellular Systems **IEEE Veh. Tech. Conf. 1992**, pp. 782-785, Maio1995.
- [25] HAMABE,K.; UEDA,T.; OTSU, T. Distributed Adaptive Channel Allocation Scheme with Variable C/I Threshold in Cellular Systems. **IEEE Veh. Tech. Conf. 1993**, pp. 164-167, Maio1993.

- [26] CHENG, M.M.-L.; CHUANG, J.C.-I. Distributed Measurement-based Dynamic Channel Assignment for Personal Communications. **IEEE Veh. Tech. Conf. 1995**, pp. 769-773, Maio1995.
- [27] CHENG, M.M.; CHUANG, J.C. Performance Evaluation of Distributed Measurement-Based Dynamic Channel Assignment in Local Wireless Communications **IEEE Journal of Select. Areas**, Vol. 14, no. 4, pp. 698-710, Maio1996.
- [28] CARCIOFI,C.; FALCIASECCA, G.; FRULLONE, M.; MAGNANI, N.P.; PALESTINI, V. Traffic-Adaptive and Interference-Adaptive Resource Allocation Schemes in GSM and DCS1800 Systems under Realistic Traffic and Propagation Conditions: a Case Study **IEEE Veh. Tech. Conf. 1996**, pp. 497-501. Maio1996.
- [29] ALMGREN,M.; FRODIGH, M.; LUNDEQUIST, J.; HANSSON, B. ; WALLSTEDT,K. Adaptive Channel Allocation in TACS. **Proceeding of GLOBECOM'95**, Singapore, pp. 1517-1521, Novembre 1995.
- [30] CHIH-LIN, I; CHAO, P.H.. Local Packing - Distributed Dynamic Channel Allocation at Cellular Base Station. **IEEE 0-7803-0917-0/93**. 1993.
- [31] ZANDER, J. Radio Resource Management - An Overview **IEEE Veh. Tech. Conf. 1996**, pp. 16-20, Maio1996.
- [32] GRANDHI,S.A.;YATES, R.D.;GOODMAN, D.J. Resource Allocation for Cellular Radio Systems **IEEE Trans. Veh.Tech.** vol. 46, pp-581-587, Agosto 1997.
- [33] YEUNG,K.L; YUM,T.K.P.. Compact Pattern Based DCA for Cellular Systems. **IEEE 0-7803-0917-0 1993**, pp. 108-112. 1993.
- [34] ARGYROPOULOS, Y.; JORDAN, S.; KUMAR, S.P.R. Dynamic Channel Allocation Performance under Uneven Traffic Distribution Conditions **IEEE Veh. Tech. Conf. 1995**, pp. 1855-1859, Junho 1995.
- [35] WANG, J.Z. Simulation and Performance Analysis of Dynamic Channel Allocation Algorithm in DECT. **IEEE Trans. Veh. Tech.**, Vol. 42, No. 2, pp. 563-569, Novembre 1993.
- [36] ELNOUBI, S.M.; SINGH, R.; GUPTA, S.C.. A New Frequency Channel Assignment Algorithm in High Capacity Mobile Communication Systems.. **IEEE Trans. Veh. Tech.** pp. 125-131. Agosto 1982.
- [37] FALCIASECCA,G.; FRULLONE,M.; RIVA,G.; SERRA, A.M. On the impact of traffic burst on performances of high capacity cellular systems **IEEE Vehicular Technology Conference 1990**. pp. 646-51. Maio1990.
- [38] HAAS, Z.J.; WINTERS, J.H.; JOHNSON, D.S. Simulation Results of the Capacity of Cellular Systems **IEEE Trans. Veh. Tech.**, vol. 46, no. 4, pp. 805-817, Novembre 1997.

- [39] ZANDER, J.; ERIKSSON, H.. Asymptotic Bounds on Performance of a Class of Dynamic Channel Assignment Algorithms. **IEEE Journal of Selected areas in Communications**, Vol 11, no. 6, pp. 926-933. Agosto 1993.
- [40] NETTLETON, R. Traffic Statistics in a Self-Organizing Cellular Telephone System **IEEE Veh. Tech. Conf. 1990**, pp. 305-310, Maio 1990.
- [41] SAUNDERS, R.; LOPES, L.. Performance Comparison of Global and Distributed Dynamic Channel Allocation Algorithms. **IEEE Veh. Tech. Conf. 1994**, pp. 799-803, Junho 1994.
- [42] HANSEN, C.J.; POTTIE, G.J. A Distributed Access Algorithm for Cellular Radio Systems with Channel Partitioning **IEEE Trans. Veh. Tech.**, Vol. 48, no. 1, pp. 76-82, Janeiro 1999.
- [43] ANDERSON, L.G.. A simulation study of some dynamic channel assignment algorithms in a high capacity mobile telecommunications system. **IEEE Trans. Veh. Tech.** pp. 210-217. Novembro 1973.
- [44] COX, D.C.; REUDINK, D.O.. Increasing Channel Occupancy in Large-Scale Mobile Radio Systems. **IEEE Trans. on Vehicular Tech.**, pp. 218-222. Novembro 1973.
- [45] BAKRY, S.H.; ACKROYD, M.H.. Teletraffic Analysis for Multicell Mobile Radio Telephone Systems. **IEEE Trans. Comm.**, pp. 1905-1909, Agosto 1982.
- [46] EVERITT, D.E.; MACFADYEN, N.W.. Analysis of multicellular radio Telephone systems with Loss. **British Telecom. Technol. Journal**, vol. 1 pp. 37-45. Outubro 1983.
- [47] ZHANG, M.; YUM, T.S.. Comparisons of Channel Assignment Strategies in Cellular Mobile Telephone Systems. **IEEE Trans. Vehicular Tech.** pp. 211-215 Novembro 1989.
- [48] RAYMOND, P.A.. Performance Analysis of Cellular Networks. **IEEE Trans. Comm.**, pp. 1787-1793, Dezembro 1991.
- [49] KUEK, S.S.; WONG, W.C.. Ordered Dynamic Channel Allocation. **IEEE Trans. on Veh. Tech.**, pp. 271-277, Agosto 1992.
- [50] SHINODA, A.A.; YACOUB, M.D.. **Algoritmos de Alocação de Canais para Sistemas de Comunicação sem Fio**. Tese (Doutorado); 182 pg.; Universidade de Campinas; São Paulo; Abril 1996.
- [51] WEST, K.A.; STILBER, G.L.. An aggressive dynamic channel assignment strategy for a microcellular environment.. **IEEE Trans. Veh. Tech.** pp. 1027-1038; Novembro 1994.
- [52] OKADA, K.; KUBOTA, F. On dynamic channel assignment strategies in cellular mobile radio systems **IEICE Transactions on Fundamentals of**

Electronics, Communications and Computer Sciences Vol: E75, pp. 1634-41, Dezembro 1992.

- [53] MCELIECE, R.J.; SIVARAJAN, K.N. Dynamic Channel Assignment in Cellular Radio **IEEE Veh. Tech. Conf. 1990**, pp. 631-637, Maio1990.
- [54] ZHANG, M.; YUM, T.S.P. The Nonuniform Compact Pattern Allocation Algorithm for Cellular Mobile Systems. **IEEE Trans. Veh. Tech.** Vol. 40, no.2. pp. 387-391. Maio1991.
- [55] Del Re, E.; Fantacci, R.; Giambene, G.. Handover and dynamic channel allocation techniques in mobile cellular networks. **IEEE Trans. Veh. Tech.** Vol: 44 Iss: 2 p. 229-37, Maio1995.
- [56] WHITEHEAD, J.F.. Performance And Capacity of Distributed Dynamic Channel Assignment and Power Control in Shadow Fading. **Proc. IEEE ICC'93**; 1993.
- [57] FURUKAWA,H.; AKAIWA, Y. Self-Organized Reuse partitioning, a Dynamic Channel Assignment Method in Cellular Systems **IEEE Veh. Tech. Conf. 1993**, Secaucus, pp. 524-527, Maio1993.
- [58] ISHII,K.; YOSHIDA,S. Dynamic Channel Allocation Algorithm with Transmitter Power Control **IEEE Veh. Tech. Conf. 1994**, Stockholm, pp. 838-842, Junho 1994.
- [59] ISHII,K.; OSAWA, T. An Effective Integration of Dynamic Channel Allocation with Transmitting Power control **IEEE Veh. Tech. Conf. 1996**, pp. 247-251, Maio1995.
- [60] LAW, A.; LOPES, L.B. Performance Comparison of DCA Call Assignment Algorithm within DECT **IEEE Veh. Tech. Conf. 1996**, pp. 726-730, Maio1995.
- [61] NETTLETON,R; SCHLOEMER, G;. A High Capacity Assignment Method for Cellular Mobile Telephone Systems. **Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. 89'**, pp. 359-367; Maio 1989.
- [62] Ishikawa, Y.; Umeda, N. An adaptive channel allocation strategy using multiple overlaid priority for cellular systems **Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers B-II** Vol: J78B-II Iss: 10 pp. 646-54. Outubro 1995.
- [63] ARGYROPOULOS, Y.; KUMAR, S.P.R. Capacity Improvement in Cellular Systems Through Distributed C/I-Based Power Control **IEEE Veh. Tech. Conf. 1997. pp.** ,Maio1997
- [64] TAKENAKA, T.; NAKARUMA, T.; TAJIMA,Y.. All Channel Concentric Allocation in Cellular Systems. **Proc ICC'93** pp. 920-924; 1993.

- [65] ERIKSSON,H; BOWNDS,R. Performance of DCA in the DECT System. **IEEE Veh. Tech. Conf. 1991**, pp. 693-698; Maio1991.
- [66] BORST, S.C.; GRANDHI, S.A.; KAHN, C.L.; KUMARAN, K.; LUBACHEVSKY, B.D.; SAND, D.M. Wireless Simulation and Self-Organizing Spectrum Management. **Bell Labs Technical Journal**; pp. 81-98. Verão 1997.
- [67] ZENKNER PERCIA; G. **Aplicação Conjunta de Controle de Potência e Alocação Dinâmica de Canais a Sistemas Móveis Celulares** Rio de Janeiro 1997. 147p. Dissertação de Mestrado, Dept. Eng. Elétrica PUC/RIO; Abril 1997.
- [68] FURUKAWA,H.; OISHI, M.; SHIMIZU, H.; AKAIWA, Y. Performance Comparison of Dynamic Channel Assignment for Indoor Microcell Environment **IEEE Veh. Tech. Conf. 1996**, pp. 928-932, Maio1996.
- [69] JUSTIN C.-I. CHUANG. Autonomous Adaptive Frequency Assignment for TDMA Portable Radio Systems. **IEEE Trans. on Vehicular Tech.**, pp. 627-635, Agosto 1991.
- [70] ZANDER, J. Performance of Optimum Transmitter Power Control in Cellular Radio Systems. **IEEE Trans. Veh. Tech.** Vol. 41, no. 1, pp. 57-62, Fevereiro 1992.
- [71] BAIOCCHI, A; PRISCOLI,F.D.; GRILLI,F.; SESTINI,F.. The Geometric Dynamic Channel Allocation as a Practical Strategy in Mobile Networks with Bursty User Mobility. **IEEE Trans. on Veh. Tech.**, Fevereiro 1995.
- [72] NANDA,S; GOODMAN,D.J.. Dynamic Resource Acquisition: Distributed Carrier Allocation for TDMA Cellular Systems. **Proc. GLOBECOM 91'**, pp. 883-888, Dezembro 1991.
- [73] JIANG, H; RAPPAPORT, S.S.. A Channel Borrowing Scheme for TDMA Cellular Communication Systems. **IEEE Veh. Tech. Conf 1995.**, pp. 97-101, Abril 1995.
- [74] PATTAVINA, A.; QUADRI, S.; TRECORDI, V. Reuse Partitioning in Cellular Networks with Dynamic Channel Allocation **IEEE GLOBECOM'95**, pp. 1543-1548, 1995.
- [75] PRISCOLI, F.D. The asynchronous technique for carrier acquisitioncoordination **IEEE Journal on Selected Areas in Communications** Vol: 13 pp. 908-12. Junho 1995.
- [76] CHUANG, J.C.-I.; SOLLENBERGER, N.R.. Performance of autonomous dynamic channel assignment and power control for TDMA/FDMA wireless access. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications** Vol: 12 Iss: 8 p. 1314-23; Outubro 1994.

- [77] MULDER, R.J. DECT, a Universal Cordless Access System **Phillips Telecommunications Review**, vol. 49, pp. 68-73. Setembro 1991.
- [78] NAKANO, K.; KARASAWA, N.; SENGOKU, M.; SHINODA, S.; ABE, T. Characteristics of Dynamic Channel Assignment in Cellular Systems with Reuse Partitioning **IEICE Trans. Fundamentals**, Vol. E79-A, no. 7, Julho 1996.
- [79] TAKANASHI, H.; OONO, T.; TANAKA, T. Frequency-Segregated Dynamic Channel Allocation for Asynchronized TDMA/TDD Frame Among Base Stations. **IEEE Veh. Tech. Conf. 1996**, pp. 933-937, Maio 1996.
- [80] ZANDER, J. Distributed Cochannel Interference Control in Cellular Radio Systems. **IEEE Trans. Veh. Tech.** pp305-311, Agosto 1992.
- [81] SCHEIBENBOGEN, M.; CLAUSEN, S.; GUNTSCH, A. Dynamical Channel Allocation in Hierarchical Cellular Systems. **IEEE Veh. Tech. Conf. 1996**, pp. 721-725, Maio 1996.
- [82] ALMGREN, M.; BERGSTROM, L.; FRODIGH, M.; WALLSTEDT, K. Channel Allocation and Power Settings in a Cellular System with Macro and Micro Cells Using the Same Frequency Spectrum **IEEE Veh. Tech. Conf. 1996**, pp. 1150- 1154, Maio 1996.
- [83] EDBOM G.; STJERNHOLM, P. Simulation of Cellular Networks. **IEEE Veh. Tech. Conf. 1994**, pp. 1839-1842, Junho 1994.
- [84] FISHWICK, P.A. **Simulation model design and execution: building digital worlds**. New Jersey, Prentice-Hall, 1995.
- [85] KAWASHIMA, K.; AKIMARU, H. **Teletraffic: Theory and Applications**. Springer-Verlag, New York, 1993.
- [86] BRATLEY, P.; FOX, B. L.; SCHRAGE, L. E. **A Guide to Simulation**. 2 ed. Springer-Verlag, New York, 1987.

Apêndice A: Modelagem do Simulador

A.1 Objetivos da Modelagem

O principal objetivo do simulador é simular sistemas de rádio celulares com o fim de analisar técnicas de alocação de canais adaptativas à interferência. A fim de permitir trabalhos e expansões futuras, o mesmo foi modelado com o intuito de permitir a análise de outras técnicas de alocação de canais e outros aspectos relevantes de um sistema celular, que podem ser analisados independentemente da técnica de alocação de canais.

Dessa forma, o simulador foi modelado de forma a permitir as seguintes análises (em ordem de prioridade):

- análise do desempenho de algoritmos de alocação de canais (DCA adaptativos à interferência, DCA adaptativos ao tráfego, FCA) em diferentes situações e parâmetros (número de transceptores por célula, número de canais no sistema etc), tanto em sistemas analógicos como digitais TDMA;
- análise do impacto da variação temporal e espacial do tráfego oferecido ao sistema;
- análise do impacto da mobilidade de usuários no desempenho do sistema celular com respeito à sua capacidade de tráfego;
- análise de diferentes modelos de mobilidade de usuários;
- análise do desempenho de sistemas celulares na presença de células congestionadas;
- análise da distribuição de equipamentos no sistema (ERBs e transceptores);
- análise do desempenho de sistemas celulares com distribuição irregular de células;
- análise da variância do grau-de-serviço entre células;
- análise da variância do grau-de-serviço em função da distância do terminal móvel ao transceptor;
- análise do impacto da utilização de microcélulas no sistema;

- análise de qualidade das chamadas em andamento no sistema;
- análise do uso de ERBs setorizadas (análise da variação do diagrama de radiação dos transceptores do sistema).

A.2. Conceitos Básicos do Sistema Simulador

A.2.1. Modelagem Espacial

Os algoritmos de alocação de canais adaptativos à interferência tem como uma de suas características básicas a alocação de canal baseada em medição de potências recebidas na ERB e no TM.

Dado que o nível de sinal recebido varia com a distância entre transmissor e receptor, a esta característica indica que o canal a ser alocado para um determinado terminal portátil depende de sua localização no sistema. Isto é, dependendo da localização do móvel em uma célula, um determinado canal pode ou não ser alocado para uma determinada chamada. Esta dependência exige que o simulador consiga modelar a localização dos TMs no sistema e o nível de sinal recebido de cada canal por cada TM [61,66,83].

Dessa forma, optou-se por uma MODELAGEM ESPACIAL do sistema [84]. Nesta modelagem, cada elemento do sistema (ERBs e TMs) tem sua posição definida no espaço. A área geográfica é dividida em pedaços uniformes discretos, algo como uma “grade” (“grid”) que divide a área. Cada ERB e TM possuirá uma posição definida nas coordenadas da área gradeada. A partir da escala do gradeamento e das posições de cada elemento na área gradeada, pode-se determinar as diversas distâncias que separam os diversos elementos, sendo portanto possível determinar níveis de sinais recebidos através da Modelagem de propagação. A figura A.1 permite um melhor entendimento

Este tipo de modelagem permite também a análise de diferentes configurações de sistemas celulares; permitindo não somente a simulação/análise de sistemas hexagonais regulares, como também a análise de sistemas irregulares.

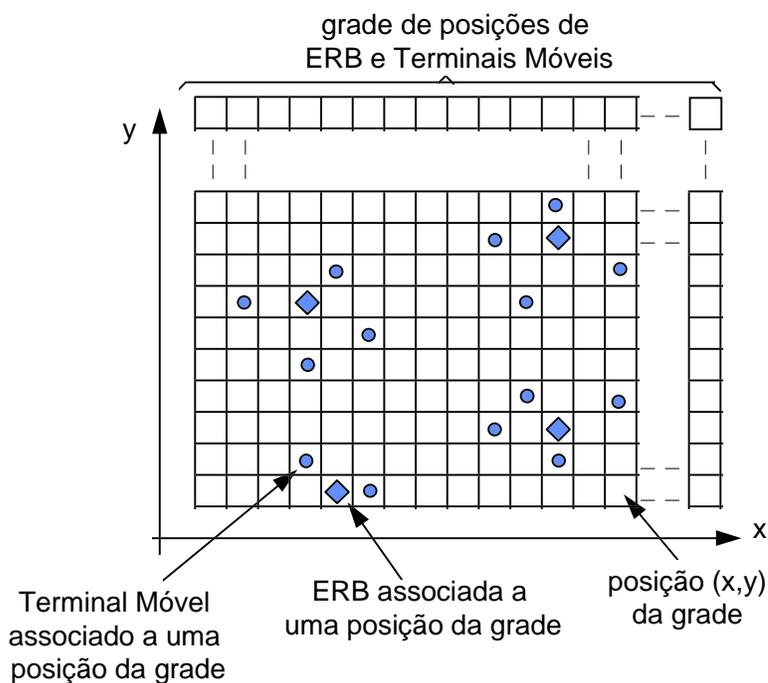


Fig. A.1 - Grade dividindo a área geográfica de serviço.

A.2.2. Independência entre Geração de Chamadas e Sistema Celular

Considerou-se que o fenômeno de geração de chamadas por usuários do sistema celular é completamente independente das características e estado do sistema celular. Esta consideração é bastante razoável, visto que o sistema celular opera de forma transparente ao usuário. Tal independência também foi sugerida em [83].

A independência entre a geração de chamadas e o sistema celular permite que se trate os dois fenômenos separadamente. Dessa forma, considerou-se um simulador separado para cuidar da geração de chamadas, enquanto outro simulador simula o funcionamento do sistema celular. Através desta separação, considera-se o sistema celular como um sistema genérico que recebe como entrada externa, os eventos gerados pelo gerador de chamadas.

O gerador de chamadas gera eventos que refletem ações dos usuários que exigem que o sistema celular tome ações. Os eventos podem ser:

- requisição de canal/recurso para efetuar chamada;
- liberação de canal/recurso ao final da chamada;

- movimento do usuário.

Note que, do ponto de vista do usuário, ações como mudança de célula, alocação de determinado canal em determinada ERB etc, são ações completamente transparentes. Tais ações concernem somente ao sistema celular.

A separação entre os usuários e o sistema celular permite que se utilize modelagens e simulações diferentes para cada um deles [83]. A modelagem para geração e fim de chamadas foi desenvolvida e será discutida mais adiante. Modelagem para a mobilidade de usuários pode ser considerada juntamente ou de forma independente ao processo de geração e fim de chamadas. Estas modelagens irão gerar o conjunto de eventos que representam a entrada do sistema celular.

O conjunto de eventos de entrada estarão ordenados de acordo com a ordem cronológica de acontecimento. Cada evento possuirá um marcador de tempo (“time-tag”) que indica o tempo em que o evento ocorre no sistema. O conjunto de eventos forma portanto uma “fila de eventos” de onde o simulador do sistema celular lê os eventos, um a um. Ao ler um evento, o simulador atualiza o seu “relógio interno”. A figura A.2 auxilia no entendimento.

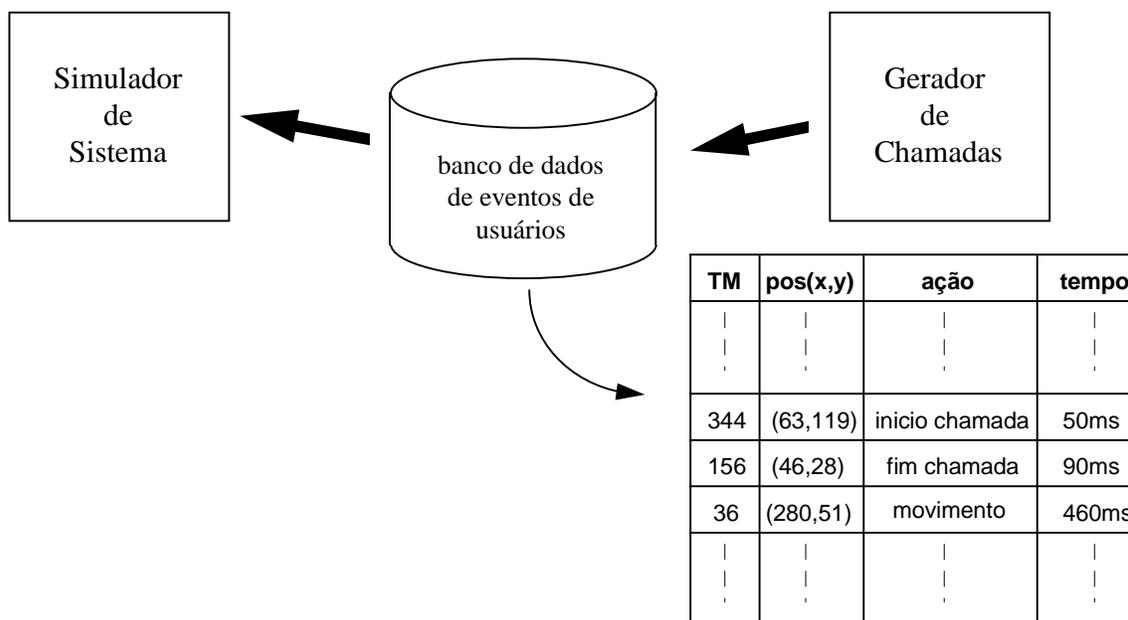


Fig. A.2: Fila de eventos de usuários passada pelo Gerador de Chamadas ao Sistema Simulador

Esta versão inicial do simulador de chamadas não considera a inclusão de eventos na fila. Desta forma, efeitos como retentativa de chamada imediatamente após o bloqueio não estão sendo modelados. No caso da requisição por canal ser negada a um TM, o simulador despreza os futuros eventos (“fim de chamada” ou “movimento do usuário”) relacionados com este TM.

Observe que a fila de eventos contém somente os eventos relevantes para o sistema celular. Desta forma, quando um usuário está inativo, suas ações de movimento não estão contidas na fila de eventos.

Este tipo de modelagem por eventos é caracterizado por ser rápido porque não simula tempos entre eventos, onde as variáveis de estado se mantêm constantes [84].

A.2.3 Modelagem do Sistema Celular por Variáveis de Estado

Todo o sistema pode ser modelado como um conjunto de variáveis de estado, perturbações externas (entradas) e conjunto de saídas. Um Sistema Celular também pode ser modelado desta forma.

À cada instante, um Sistema Celular pode ser descrito pelas chamadas que estão em andamento. Considerando a “Chamada em Andamento” como um elemento do Sistema Celular, o estado do mesmo pode ser descrito pelo estado destes elementos. Tais elementos nascem (novas chamadas), morrem (fim de chamadas) ou se modificam (mudança de célula, mudança de potência transmitida, movimento do usuário etc) durante o tempo. A modelagem adotada considerou as características de cada “Chamada em Andamento” (ou Enlace ERB-TM) como uma variável de estado do sistema.

Cada Enlace sendo mantido pelo Sistema Celular possui as seguintes variáveis; observe que cada conjunto destas variáveis define o estado de um Enlace e o conjunto de Enlaces constitui o estado do Sistema Celular.

- Identificação do TM envolvido na Chamada;
- Identificação da ERB envolvida na Chamada;
- Canal/Recurso sendo utilizado;
- Posição Geográfica do TM;

- Posição Geográfica da ERB;
- Potência Efetivamente Radiada do TM;
- Potência Efetivamente Radiada da ERB;
- Nível de Sinal recebido no TM⁴⁹;
- Nível de Sinal recebido na ERB;
- Nível de Sinal Interferente recebido no TM;
- Nível de Sinal Interferente recebido na ERB;

A entrada do Sistema Celular foi representada pelos eventos gerados pela modelagem de geração de chamadas e mobilidade, conforme explicado no item A.2.2.

As formas como o Sistema aloca, desaloca ou rearranja chamadas podem ser encaradas como funções de transição de estado.

Dessa forma, o Sistema Celular simulado foi modelado de forma a rastrear os estados de cada Enlace ERB-TM. Os estados dos diversos enlaces são modificados à medida que os eventos (entrada) ocorrem no sistema.

O número de chamadas bloqueadas, o número total de chamadas, o número de “intracell-handoffs” médio por chamada, a qualidade média das chamadas (relação Sinal Interferência) e uma série de outros parâmetros resultantes do funcionamento do sistema foram modelados como a saída do sistema.

A.2.4 Modelagem da Propagação de Sinais

Para calcular a atenuação ocorrida entre as ERBs e os TMs, considerou-se o modelo de propagação inversamente proporcional à distância elevado ao coeficiente de propagação:

$$\text{Aten(dB)} = \alpha \cdot 10,0 \cdot \log_{10}(\text{esc} \cdot d) + \text{LF(dB)} \quad (\text{A.1})$$

...onde:

- Aten(dB) = atenuação do sinal transmitido entre transmissor e receptor;
- α = coeficiente de atenuação com a distância;

⁴⁹ Através da potência recebida e da potência transmitida, infere-se a atenuação entre ERB e TM.

- esc = escala da grade (espaçamento entre cada unidade da grade em metros);
- d = distância em metros entre transmissor e receptor;
- $LF(dB)$ = parcela referente ao desvanecimento lognormal;

O desvanecimento de Rayleigh não foi modelado pois está-se supondo que o mesmo poderá ser compensado com diversidade de antenas [14], sendo esta consideração utilizada nas simulações de muitos trabalhos na literatura.

A fim de tornar a simulação mais próxima de situações reais, a parcela de desvanecimento lognormal entre uma determinada ERB e cada ponto do gradil da área de serviço é pré-calculada e mantida constante durante o tempo de simulação. Tais valores são armazenados em bancos de dados juntamente com as parcelas de atenuação referentes à distância.

Com este tipo de implementação, pode-se criar bancos de dados de atenuação que levam em conta a topografia do terreno, facilitando a simulação de sistemas celulares irregulares e mais próximos da realidade.

O cálculo prévio da atenuação torna a simulação mais rápida pois tal medida é muito utilizada durante a execução do simulador. Além disso, o mesmo banco de dados de atenuações pode ser acessado por simulações em outras condições e com outros algoritmos.

Um programa de computador à parte computa as diversas atenuações e componentes de desvanecimento, gerando o banco de dados de atenuações. O banco de dados de atenuações é acessado pelo programa simulador do sistema celular durante a execução deste.

Deve-se observar que esta foi a modelagem de propagação utilizada para os resultados apresentados. Entretanto, a modularidade do sistema permite que se modifique a modelagem de propagação para qualquer outra. Para o Simulador do Sistema, a modelagem utilizada é transparente, dado que o mesmo somente acessa as atenuações resultantes contidas no banco de dados de atenuações.

A.2.5 Sistema Determinístico

Dado que as aleatoriedades de geração de chamadas, mobilidade, e efeitos de desvanecimento estão sendo consideradas de forma externa ao simulador, este se torna determinístico. Isto é, as mesmas entradas geram exatamente as mesmas mudanças de estado e as mesmas saídas. (tal afirmação considera que o módulo do Algoritmo (“customizável”) não conterà aleatoriedades; isto será verdade para alguns tipos de algoritmos DCA, não sendo para outros.)

Assim, as ações ordenadas são sucessivamente aplicadas no sistema e as variáveis de estado vão sendo sucessivamente modificadas, não importando a diferença de tempo entre os marcadores de tempo de cada evento. Os marcadores de tempo são considerados somente para fins estatísticos.

A.2.6 Componentes do Sistema Simulador

Conforme visto acima, a simulação completa consiste de 4 módulos, conforme visto na figura A.3:

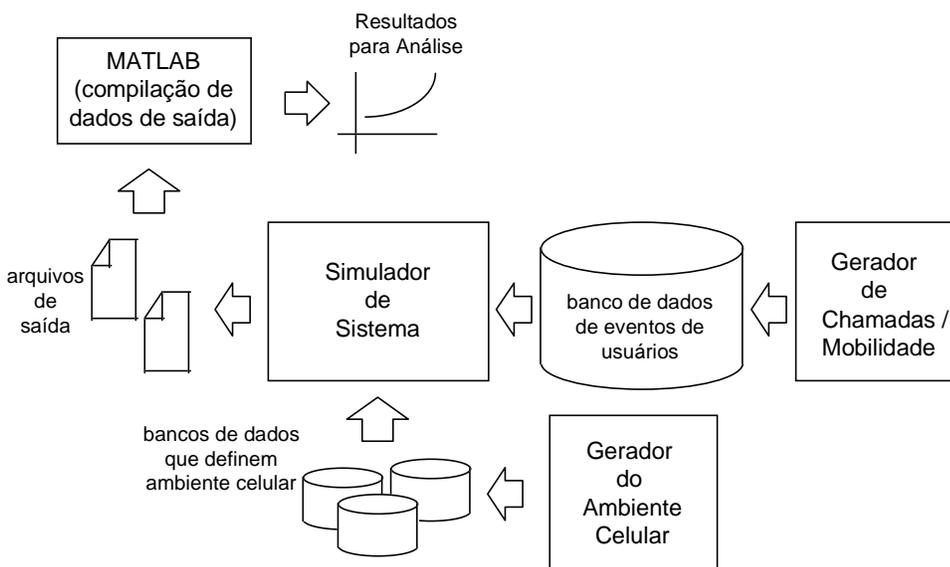


Fig. A.3: Módulos que Compõe o Sistema Simulador

O módulo Gerador de Chamadas/Mobilidade gera a fila de eventos que será lida pelo Simulador do Sistema Celular. O módulo Gerador do Ambiente Celular gera

uma série de bancos de dados que definem o ambiente celular, incluindo o banco de dados de atenuações. Durante sua execução, o Simulador do Sistema Celular usa estes bancos de dados e a fila de eventos. Portanto, os módulos Gerador de Chamadas e de Ambiente Celular são executados antes da execução do simulador do sistema.

À medida que o simulador do sistema celular é executado, as amostras das estatísticas de desempenho são armazenadas em um arquivo texto para posterior análise.

O módulo de Análise acessa o arquivo texto de saída do Simulador do Sistema Celular, trata estatisticamente os dados, gera gráficos comparativos etc.

Os módulos de Geração de Chamadas, de Ambiente Celular e o Simulador do Sistema foram programados na linguagem de computador C padrão ANSI, permitindo ser compilado em diversas plataformas de sistema operacional (DOS, Windows, UNIX etc). Os programas foram feitos de forma modular para permitir facilidade na manutenção e na portabilidade (somente alguns módulos serão trocados entre plataformas de sistema operacional). Os módulos também foram projetados de forma a permitir futura implementação do programa em máquinas multiprocessadas.

O módulo de Análise foi programado em MatLab devido às suas facilidades de programação, gerar gráficos e tratar valores.

A.3. Módulo Gerador das Chamadas e Mobilidade dos Usuários

Conforme já explicado, o Módulo Gerador das Chamadas e Mobilidade dos Usuários irá gerar uma fila de eventos ordenada que reflete as ações dos mesmos. As ações dos usuários se limitam a: (1) início de chamada, (2) fim de chamada ou (3) movimento. Note que a ação de movimento está relacionada com a posição no gradil com o qual a área geográfica foi dividida.

A modelagem do processo de geração de chamadas pode ser futuramente melhor definida para representar e estudar diferentes modelos de mobilidade, diferentes padrões de origem de chamadas, diferentes características de chamadas, etc. Apesar da saída deste processo representar a entrada para o Sistema Celular,

sua modelagem não é inteiramente parte do escopo do trabalho. Assim, utiliza-se uma modelagem simples para se gerar as entradas necessárias para estudar o comportamento de alocação de canais em sistemas celulares. Futuros trabalhos poderão se aprofundar na modelagem do processo de geração de chamadas.

A modelagem temporária utilizada foi implementada para gerar chamadas com tempo entre chamadas distribuído exponencialmente e com duração de chamadas distribuída exponencialmente.

No processo de geração e finalização de chamadas, simulam-se diversos intervalos de tempo. Durante cada intervalo, poderá acontecer a ocorrência e/ou finalização de 1 chamada. Os intervalos foram considerados pequenos o bastante para que a chance de ocorrer/terminar mais de 1 chamada fosse praticamente nula.

Conforme [85], em cada intervalo, as probabilidades de alocação e término de qualquer chamada são determinadas pelas relações (A.2) e (A.3):

$$P(\text{novachamada}) = \lambda \cdot \Delta t \quad (\text{A.2})$$

$$P(\text{fimchamada}) = n_{\text{ch}} \cdot \mu \cdot \Delta t \quad (\text{A.3})$$

...onde:

- $P(\text{novachamada})$ = Probabilidade que uma nova chamada ocorra durante o intervalo Δt .
- $P(\text{fimchamada})$ = Probabilidade que uma chamada termine durante o intervalo Δt .
- λ = taxa de geração de novas chamadas (número de chamadas por segundo)
- $1/\mu$ = duração média das chamadas (em segundos)
- Δt = intervalo de tempo
- n_{ch} = número de chamadas atuais em um determinado instante

Considerando que o intervalo de tempo Δt é muito pequeno, pode-se dizer que a chance da ocorrência de mais de 2 eventos (início ou fim de chamada) dentro de um intervalo Δt de tempo é praticamente nula. O módulo gerador de chamadas utiliza intervalos Δt de tempo pequenos o suficiente para garantir esta condição.

A figura A.4 ilustra o fluxograma do processo de geração e finalização de chamadas.

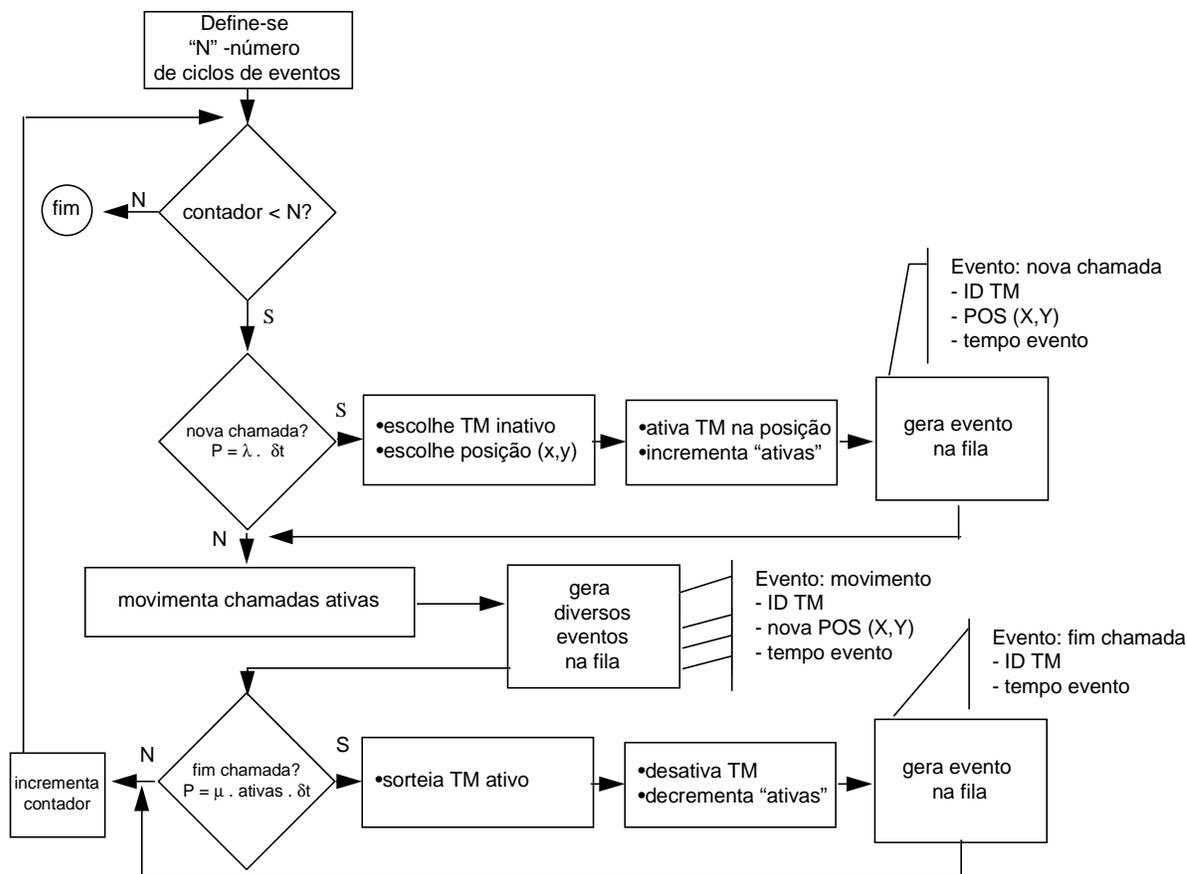


Fig. A.4: fluxograma do Módulo de Geração de Chamadas

Note que a determinação da posição do TM é aleatoriamente escolhida. A distribuição das posições pode tanto ser uniforme (para distribuições de tráfego uniforme), como também pode ter qualquer outra distribuição a fim de permitir a simulação de outros padrões de distribuições de tráfego.

O processo de geração dos eventos de movimento também permite o uso de diversas modelagens para o movimento de usuários. O programa gerador de eventos é modular, possuindo um módulo específico para a geração de eventos de movimento. A modularidade permitirá o estudo detalhado do impacto de diversas modelagens no desempenho do sistema. Esta forma de implementação permite o estudo de padrões estatísticos de movimento, padrões determinísticos, sendo possível ainda estudar aspectos como concentração de usuários em determinadas regiões e variações temporais e espaciais de tráfego.

Os eventos de movimento são gerados somente para os terminais ativos e a modelagem permite definir a quantidade de móveis se movimentando e a velocidade

de cada um deles. O módulo gerador de movimentos permite a geração de diversos eventos com a mesma referência de tempo ("time tag"), sendo possível simular a situação de movimento simultâneo de usuários. Neste caso, diversos eventos de movimento seriam gerados e seriam tratados pelo Simulador do Sistema como se os usuários estivessem se movimentando instantaneamente.

Os eventos de movimento de usuários são tratados pelo Simulador do Sistema Celular e este ajusta os bancos de dados para que estes reflitam o novo estado do sistema. Dado que o movimento de um usuário provoca mudanças nos níveis de sinal recebido e nos níveis de sinal interferente, o ajuste de banco de dados inclui ajustar o estado de cada chamada afetada pelo movimento. Dessa forma, esta modelagem permitirá que o Simulador do Sistema Celular possa rastrear as condições de SIR de uma chamada durante o movimento dos usuários.

Note que eventos de mudança de célula não são gerados pelo módulo gerador de movimentos, dado que este evento não está relacionado com o usuário, e sim com o Sistema Celular.

Todos os eventos gerados por este módulo formam uma fila de eventos que é armazenada em banco de dados específico (BD_EVUS).

A.4. Módulo Gerador do Ambiente Celular

O módulo gerador do ambiente celular tem a função de gerar bancos de dados contendo informações referentes aos seguintes parâmetros do sistema celular a ser simulado:

- número de ERBs;
- número de canais;
- número de opções de roteamento (quando aplicável);
- número de transceptores equipados em cada ERB;
- alocação de canais (no caso existir canais alocados de forma fixa);
- definição da área de serviço;
- granularidade do gradil que cobre a área de serviço;
- escala do gradil;
- distribuição das ERBs na área de serviço (posição (x,y));

- características de propagação (coeficiente de propagação, variância do desvanecimento lognormal);
- configuração toroidal (onde ERBs extremas se tornam vizinhas) ou com efeito de borda;
- conexão à ERB mais próxima ou de melhor sinal;

Tais dados estão presentes em diferentes bancos de dados: banco de dados de ERBs (BD_ERB), banco de dados de atenuações (BD_POSATEN) e banco de dados de roteamento (BD_ROT). O Simulador do Sistema acessa estes bancos de dados para obter a configuração do Sistema Celular a ser simulado.

O módulo gerador do ambiente celular é bem flexível, podendo ter qualquer estrutura dependendo da pesquisa desejada. A única restrição é quanto aos bancos de dados e seus formatos. O módulo gerador utilizado para as simulações possui uma interface com o pesquisador, a fim de facilitar na geração de diversos tipos diferentes de ambientes celulares.

A.5. Módulo Simulador do Sistema Celular

A.5.1. Introdução e Filosofia do Módulo

O módulo Simulador do Sistema Celular é o módulo mais complexo de todo o ambiente de simulação. O módulo gerencia as variáveis de estado, processando as entradas provindas do Módulo Gerador de Chamadas e gerando as saídas que serão processadas pelo Módulo de Análise.

O módulo simulador foi projetado de forma modular a fim de facilitar futuras modificações. Além disso, os módulos foram projetados de forma a maximizar a independência dos módulos, facilitando a implementação futura de processamento distribuído. Cada módulo possui uma fila de mensagens. Cada mensagem indica um procedimento que deve ser tomado pelo módulo. O módulo processa as informações contidas na mensagem, gera mensagens para outros módulos e passa para a próxima mensagem de sua fila de mensagens.

O módulo Simulador opera as variáveis de estado evento a evento provindos da fila de eventos. Novos eventos somente são processados quando o evento atual

tiver terminado sua atuação. Está-se supondo portanto que os eventos são instantaneamente processados pelo sistema.

O módulo Simulador opera em ciclos. Um ciclo se inicia quando o Simulador adquire um evento da fila de eventos. Diversos módulos são acionados e processam as informações contidas no evento. As variáveis de estado (Enlaces Ativos e suas características) são modificadas de acordo com o tipo de evento. Uma vez que as variáveis de estado foram modificadas pela entrada, o Simulador pode reiniciar outro ciclo. Este ciclo será denominado Ciclo de Evento.

O módulo Simulador também opera o Ciclo de Verificação/Atualização. Este ciclo tem a função de verificar ou atualizar o estado das variáveis de estado; ou seja, este ciclo tem a função de verificar as modificações ocorridas nos Enlaces ERB-TM ativos devido ao processamento do evento; gerando ajustes ou atualizações conforme o impacto do evento em cada Enlace. Sob outro ponto de vista, o Ciclo de Verificação/Atualização reflete o comportamento distribuído do sistema celular sendo simulado. Conforme ficará mais claro adiante, o Ciclo de Eventos reflete o comportamento da Central Celular; o Ciclo de Verificação/Atualização reflete o comportamento e decisões das outras partes do sistema (ERBs e TMs).

O Ciclo de Verificação/Atualização pode ser executado de forma independente do Ciclo de Eventos. Nos resultados apresentados, cada Ciclo de Evento era seguido de um Ciclo de Verificação. Conforme se poderá perceber mais adiante, tal procedimento garantiu que, à cada evento, os Enlaces ativos estavam em condições satisfatórias.

A.5.2. Diagrama de Blocos do Módulo Simulador

Pode-se observar o diagrama de blocos do Sistema Celular na figura A.5. Nesta figura pode-se identificar os diversos módulos que tratam os eventos, os bancos de dados gerados pelo Módulo Gerador de Chamadas/Mobilidade e pelo Módulo de Ambiente Celular.

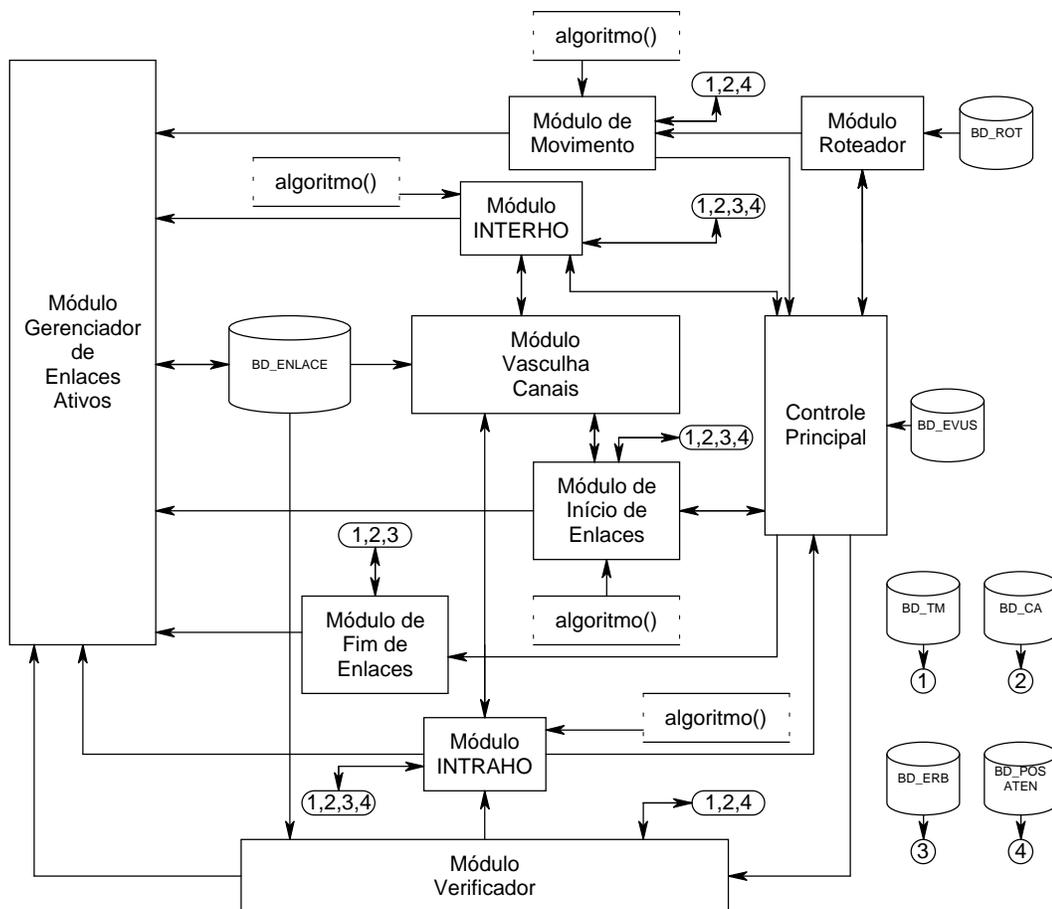


Fig. A.5 - Diagrama de Blocos do Módulo Simulador do Sistema

O Módulo Simulador, à medida que os eventos são tratados, acessa e modifica os bancos de dados mostrados no diagrama de blocos. Os principais bancos de dados que são acessados ou modificados pelo Módulo Simulador são:

Banco de Dados de ERBs (BD_ERB): este banco de dados guarda o estado de cada canal em cada ERB do sistema, além de armazenar diversos parâmetros de cada ERB, tais como: ERP de transmissão, número de canais disponíveis, estado de cada canal, número de transceptores. Conforme já mencionado, este Banco de Dados é inicialmente criado pelo Módulo externo de Ambiente Celular. À medida que as chamadas são alocadas e desalocadas, o Módulo Simulador modifica este banco de dados, modificando o estado de cada canal na ERB correspondente.

Banco de Dados de TMs (BD_TM): este banco de dados guarda o estado de cada TM (ativo ou inativo), sua posição e velocidade (para uso futuro). O Módulo Simulador utiliza este banco de dados para gerenciar o estado de cada TM.

Banco de Dados de Enlaces Ativos (BD_ENLACE): este banco de dados é gerenciado inteiramente pelo Módulo Simulador e representa as variáveis de estado do sistema. Este banco de dados é dividido em diversas subpartes, iguais ao número de canais no sistema. Cada subdivisão contém os dados referentes aos níveis de potência transmitida e sinal recebido dos diversos enlaces utilizando um determinado canal. À medida que as chamadas ocorrem, o Módulo Simulador altera o conteúdo deste banco de dados, criando, finalizando ou alterando dados de enlaces ativos.

Banco de Dados de Roteamento (BD_ROT): guarda lista de ERBs capazes de servir cada um dos pontos do gradil da área geográfica. Este banco de dados é pré-calculado pelo Módulo de Ambiente Celular e permanece fixo durante a simulação. O pré-cálculo do roteamento de chamadas agiliza a simulação.

Banco de Dados de Chamadas Ativas (BD_CA): este banco de dados guarda os dados que relacionam um TM com uma ERB. Este banco de dados está em sintonia com o BD_ENLACE.

Banco de Dados de Atenuação (BD_POSATEN): Este banco de dados é pré-calculado pelo Módulo de Ambiente Celular e contém informações com respeito ao terreno, desvanecimento lognormal etc. Este banco é subdividido em diversas partes, cada parte corresponde a uma ERB contendo a atenuação entre cada gradil da área e a ERB correspondente.

Banco de Dados de Eventos/Ações de Usuários (BD_EVUS): este é o banco de dados de entrada, gerado pelo Módulo de Geração de Chamadas.

Os principais módulos do Módulo Simulador e suas funções são:

Módulo CONTROLE PRINCIPAL: possui basicamente 4 funções: (1) ler o banco de dados contendo as ações dos usuários (BD_EVUS.TXT). (2) Interagir com o Módulo Roteador para determinar qual ERB irá alocar a chamada. (3) Distribuir Eventos lidos. (4) Comandar “IntraCell” e “InterCell Handoffs”.

Módulo ROTEADOR: recebe posição X,Y do TM, consulta BD_ROT e retorna número da ERB escolhida para se alocar chamada. O Roteador permite simular Rerroteamentos pois o banco de dados guarda diversas opções de ERBs capazes de servir a chamada.

Módulo de INÍCIO de Enlace: recebe posição X,Y e a ERB que deverá alocar o canal. Este módulo interage com o Módulo ALGORITMO para decidir qual canal será alocado. A alocação de canais é decidida pelo Módulo ALGORITMO, entretanto o módulo INÍCIO prepara as variáveis para que o ALGORITMO tome a decisão; por exemplo, o módulo INÍCIO consulta BD_ERB para saber quais canais estão livres na célula, interage com Módulo VASCULHA_CANAIS para consultar o nível de sinal recebido em cada canal na posição X,Y e troca mensagens de controle com o Módulo de Controle Principal, a fim de comunicar eventuais falhas na alocação. Uma vez decidido qual o canal a alocar, o Módulo INÍCIO de Enlace comanda o Módulo Gerenciador de Enlaces para alocar o enlace, seguindo os parâmetros decididos pelo Módulo ALGORITMO. Ao alocar um Enlace, o módulo INÍCIO acessa e atualiza os bancos de dados BD_CA, BD_ERB e BD_TM.

Módulo de FIM de Enlace: recebe o número do TM que está encerrando a chamada e liberando o canal sendo utilizado. Este módulo acessa e atualiza os bancos de dados BD_CA, BD_ERB e BD_TM. Ao determinar em qual enlace o TM está participando, o Módulo FINALIZAÇÃO comanda o Módulo Gerenciador de Enlaces para que este atualize BD_ENLACE.

Módulo de Mudança de ERB ("INTERHO"): é o módulo que comanda a desalocação do canal na antiga ERB e realoca novo canal em uma outra posição e noutra ERB. Este Módulo opera em sintonia com o Módulo de Controle Principal, pois necessita que este colete juntamente ao Módulo ROTEADOR a nova posição da ERB. INTERHO também aciona o Módulo VASCULHA_CANAIS para coletar dados para a realocação. Uma vez coletados os dados, o módulo aciona ALGORITMO, que decide qual o novo canal a utilizar (a modularidade do programa permite modificações para que o ALGORITMO possa confirmar ou rejeitar a nova ERB escolhida por ROTEADOR). Uma vez que a nova ERB e o novo canal foram decididos, comanda-se o Módulo Gerenciador de Enlaces para liberar o Enlace antigo e alocar o novo Enlace.

Módulo de Mudança de Canal ("INTRAHO"): é o módulo que comanda a desalocação de um canal com baixa qualidade e realoca em um outro novo canal na mesma ERB. INTRAHO aciona o Módulo VASCULHA_CANAIS para coletar dados referentes aos outros canais. Uma vez coletado os dados, o Módulo INTRAHO

aciona ALGORITMO e este decide qual o novo canal a utilizar. Uma vez que o novo canal foi decidido, o módulo comanda o Módulo Gerenciador de Enlaces para liberar o Enlace (canal) antigo e alocar o novo Enlace (canal).

Módulo VASCULHA_CANAIS: este módulo tem a função de auxiliar os módulos INÍCIO, INTRAHO e INTERHO. ALGORITMO precisa de subsídios para tomar decisões sobre a alocação ou realocação de um canal. Para tanto, ALGORITMO necessita saber qual o nível de sinal interferente sendo recebido em cada canal não alocado em uma ERB. Através destes valores (e de outros anteriormente adquiridos), ALGORITMO consegue inferir qual seria o SIR de uma dada chamada. VASCULHA_CANAIS consulta BD_ENLACE e preenche vetor com os níveis de sinais interferentes para que os Módulos INÍCIO, INTRAHO e INTERHO possam repassar para ALGORITMO. Esta função foi separada de ALGORITMO para se facilitar a programação deste último e também para facilitar a implementação de processamento paralelo em versões futuras.

Módulo MOVIMENTO: é o módulo que comanda o Módulo Gerenciador de Enlaces para atualizar os dados do Enlace. O Módulo MOVIMENTO passa dados sobre como seria o Enlace na nova posição para o Módulo ALGORITMO. ALGORITMO decidirá se o TM continuará utilizando o mesmo Enlace; decidirá se as potências transmitidas serão atualizadas e para qual valor; ou decidirá se um INTRAHO ou INTERHO são necessários. Dependendo do retorno do Módulo ALGORITMO, MOVIMENTO retorna comando para o CONTROLE PRINCIPAL ou comanda o Gerenciador de Enlaces para atualizar os dados do Enlace (nova posição e potências).

Módulo ALGORITMO: este módulo é o Cérebro do Simulador do Sistema Celular. Este módulo recebe dados dos diversos Módulos e decide qual canal a alocar, qual o tipo de controle de potência e qual a potência de transmissão a utilizar, decide se haverá “IntraCell” ou “InterCell Handoffs”. Este módulo foi projetado para ser facilmente configurado (“customizado”) pelo pesquisador e compilado juntamente com os outros módulos (não configuráveis). Dessa forma, para simular diversos tipos de algoritmos, basta modificar o Módulo ALGORITMO.

Módulo Gerenciador de Enlaces Ativos: este módulo recebe comandos de alocação e desalocação de canais em posições X,Y e ERBs determinadas. Os

comandos são providos dos módulos INÍCIO, FINALIZAÇÃO, INTRAHO, INTERHO e MOVIMENTO. O módulo cria, finaliza ou altera Enlaces em BD_ENLACE. Além disso, o módulo atualiza as variáveis de estado de cada Enlace, a fim de refletir as mudanças no meio de RF do canal devidas à criação, destruição e alteração das chamadas compartilhando o mesmo canal.

Módulo VERIFICADOR este módulo entra em ação periodicamente para verificar a qualidade dos Enlaces Ativos através de leitura do banco de dados de RF e avaliando a relação SIR de cada Enlace. Através desta análise, o Módulo VERIFICADOR comunica ao CONTROLE PRINCIPAL eventuais necessidades de troca de canal. O Módulo VERIFICADOR é acionado ao final de cada Ciclo de Processamento de Evento.

A.5.2.1. Fila de Mensagens dos Módulos

A comunicação entre módulos ocorre através de "filas de mensagens". Cada módulo possui uma fila de mensagens. A forma de execução do módulo será baseada nas informações contidas nas mensagens desta fila. Quando um determinado módulo deseja enviar um comando ou mensagem para outro módulo, o mesmo gera uma mensagem na fila de mensagens do módulo destinatário.

Uma mensagem típica trocada entre módulos possui as seguintes informações:

- tipo de comando ou mensagem
- informações sobre o evento relacionado com o comando/mensagem:⁵⁰
 - número de ordem do evento;
 - ação sendo executada pelo TM (movimento, início de chamada, fim de chamada);
 - número do TM;
 - posição anterior do TM (aplicável em ações de movimento)

⁵⁰ a relação apresentada contém todas as informações possíveis de estarem presentes na comunicação; entretanto, somente algumas informações podem estar sendo utilizadas em algumas comunicações. Por exemplo, quando o Módulo ROTEADOR envia um comando para o Módulo CONTROLE PRINCIPAL, o mesmo não acompanha o número do canal de comunicação a utilizar, pois o mesmo é decidido por outro módulo; entretanto, este comando contém informações como: o número da ERB com o qual o Terminal Móvel deve se comunicar, o número de opções de ERBs que

- posição atual do TM
- potência de transmissão do TM;
- ERB com o qual o TM se comunicava (aplicável em ações de "intercell handoff");
- posição da ERB com o qual o TM se comunicava (aplicável em ações de "intercell handoff");
- ERB com o qual o TM deve se comunicar ou se comunica atualmente;
- posição da ERB com o qual o TM se comunica atualmente;
- potência de transmissão da ERB;
- atenuação entre ERB e TM (incluindo parcela de desvanecimento lognormal);
- número de opções de ERBs que conseguem oferecer serviço a TM;
- número da opção de ERB sendo pesquisada (aplicável em reroteamento de chamadas);
- canal sendo utilizado na comunicação;
- canal anteriormente utilizado na comunicação (aplicável em ações de "intracell handoff");
- tempo relacionado com o evento.

Com o comando recebido, as informações contidas no mesmo e eventuais informações adicionais obtidas dos bancos de dados, o Módulo consegue efetuar suas operações de forma independente de outros módulos do sistema. Isto permite uma futura implementação distribuída do Sistema Simulador.

Apesar de muitos dos dados associados a um evento poderem ser obtidos nos diversos bancos de dados do sistema, um determinado módulo que tenha acessado dados nos diversos bancos de dados pode repassar estes dados obtidos dentro do comando. Este procedimento permite flexibilidade de utilização dos módulos além de facilitar a implementação distribuída, pois minimiza o acesso múltiplo aos bancos de dados, minimizando a competição pelo acesso ao banco de dados.

A.6. Módulo de Análise do Simulador

O Simulador do Sistema Celular gera em sua saída 5 arquivos-texto que representam o andamento e resultado da simulação.

Os 5 arquivos-texto e suas características são:

- Arquivo Geral de Resultados: fornece resultados básicos da simulação. Este arquivo não é utilizado para tratamento, o objetivo do mesmo é fornecer uma leitura imediata dos principais resultados da simulação sem precisar fazer análise completa dos mesmos;

- Arquivo de Resultados para Tratamento: fornece os resultados intermediários para tratamento pelo Módulo de Análise. A partir dos resultados intermediários, os valores finais e o intervalo de confiança de cada parâmetro são obtidos pelo Módulo de Análise;

- Arquivo de Histogramas: fornece os dados correspondentes aos histogramas resultantes da simulação;

- Arquivo de Estado Estacionário: fornece o andamento de uma série de medidas com o decorrer da simulação. Este arquivo é utilizado para verificar a correta obtenção dos resultados após o alcance estado estacionário do sistema.

- Arquivo de Estados: fornece o estado de cada chamada e detalhes de como os estados se modificaram à medida que os eventos foram processados. Nem todas as modificações de estados são direcionadas para este arquivo pois, caso contrário, este arquivo se tornaria muito grande. Os resultados deste arquivo podem ser utilizados para verificar detalhes de funcionamento do algoritmo/simulador.

Dado que os Arquivos Geral de Resultados e de Estados não são utilizados no tratamento dos resultados, os mesmos não serão discutidos.

A.6.1. Arquivo de Histogramas

O Arquivo de Histogramas é um arquivo-texto que contém 5 colunas separadas por um marcador de tabulação.

O conteúdo de cada coluna foi definido conforme abaixo:

- número de chamadas completas com " $SIR_{\text{médio}_{TM-ERB}} \leq X \text{ dB}$ " e " $SIR_{\text{médio}_{TM-ERB}} > (X-1) \text{ dB}$ ";
- número de chamadas completas com " $SIR_{\text{médio}_{ERB-TM}} \leq X \text{ dB}$ " e " $SIR_{\text{médio}_{ERB-TM}} > (X-1) \text{ dB}$ ";
- número de chamadas que foram alocadas com " $SIR_{TM-ERB} \leq X \text{ dB}$ " e " $SIR_{TM-ERB} > (X-1) \text{ dB}$ ";
- número de chamadas que foram alocadas com " $SIR_{ERB-TM} \leq X \text{ dB}$ " e " $SIR_{ERB-TM} > (X-1) \text{ dB}$ ";
- número de chamadas completas com "X" intracell handoffs

Cada coluna possui 60 linhas que correspondem, no caso de medidas de SIR, a ocorrência de SIRs variando de 0 dB a 60 dB. A primeira e última linhas de cada coluna acumulam ocorrências de SIRs menores que 0 dB e maiores que 60 dB respectivamente. No caso da coluna de "intracell handoffs", os valores de cada linha representam a ocorrência do número inteiro de "intracell handoffs" em chamadas completadas.

O Arquivo de Histogramas é lido diretamente pelo MATLAB e os histogramas são plotados facilmente com as facilidades gráficas do MATLAB. A única análise feita nos dados do Arquivo de Histogramas é a obtenção do nível de SIR correspondente a 10% das chamadas (nível "SIR_10%"). A partir do total de chamadas computadas, o MATLAB obtém o menor valor de SIR que engloba a ocorrência de 10% das chamadas.

A.6.2. Arquivo de Estado Estacionário

O Arquivo de Estado Estacionário é um arquivo-texto com 8 colunas separadas por um marcador de tabulação.

Cada coluna corresponde aos seguintes valores obtidos durante a simulação:

- número total de chamadas
- número de chamadas bloqueadas
- número de chamadas ativas
- número de chamadas completadas
- número de pedidos de intracell handoff

- número de pedidos de intercell handoff
- número de chamadas que caíram por intracell handoff
- número de chamadas que caíram por intercell handoff

À cada meio segundo de simulação, o Simulador do Sistema obtém os valores acima mencionados e adiciona-os em uma nova linha do arquivo.

Posteriormente à simulação, o MATLAB obtém o Arquivo de Estado Estacionário e permite a visualização de cada uma das medidas acima mencionadas e suas variações.

A determinação automática do Estado Estacionário é complexa e susceptível a falhas [86]. Portanto, o ponto de início do Estado Estacionário foi determinado a partir da visualização gráfica dessas medidas.

A figura A.6 ilustra um exemplo do gráfico do comportamento do número de chamadas ativas no sistema utilizado para a determinação do Estado Estacionário.

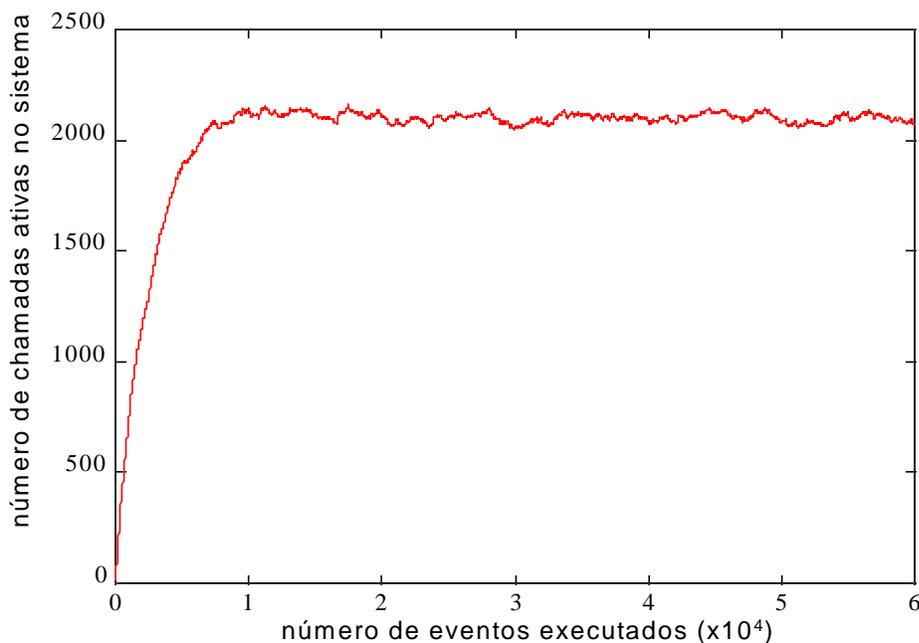


Fig. A.6 - Comportamento da variação do número de chamadas ativas no sistema com o decorrer da execução da simulação. O Exemplo se refere ao sistema utilizando o algoritmo RUP, com controle de potência, sem mobilidade, com SIR de Aceitação em 19dB e operando com carga gerada de 2500 Erlangs (11% de probabilidade de bloqueio e 5% de probabilidade de queda resultantes).

Na figura A.6, o estado estacionário seria considerado iniciado após o evento número 20000.

A.6.3. Arquivo de Resultados para Tratamento

O Arquivo de Resultados para Tratamento é o principal arquivo de análise e tem a função principal de fornecer a média e o intervalo de confiança de cada medida de cada simulação.

O Arquivo de Resultados para Tratamento é um arquivo-texto de 10 colunas. As colunas se referem às seguintes medidas:

- probabilidade de bloqueio de novas chamadas;
- probabilidade de chamada sofrer “intracell handoff” (equivalente à probabilidade de interferência);
- probabilidade de queda de chamadas em “intracell handoff”;
- probabilidade de queda de chamadas em “intercell handoff”;
- SIR médio de chamadas bem sucedidas (sentido TM-ERB);
- SIR médio de chamadas bem sucedidas (sentido ERB-TM);
- SIR de Alocação de chamadas alocadas (sentido TM-ERB);
- SIR de Alocação de chamadas alocadas (sentido ERB-TM).

Cada linha contém uma amostra de cada medida de desempenho relacionada acima.

A.6.3.1. Aquisição de Amostras

Dependendo do tempo de simulação, o número de amostras para cada simulação variou de 20 a 50 amostras para cada medida de desempenho.

Os resultados apresentados neste trabalho consideraram que um determinado sistema celular operando um algoritmo de alocação de canais terá um único estado estacionário para um determinado conjunto de entradas e parâmetros de operação. Dessa forma, as amostras das medidas de desempenho puderam ser retiradas a partir de uma única longa execução da simulação.

Para cada cenário, diversas amostras são obtidas para cada uma das medidas de desempenho do item 4.1.3.

A.6.3.2. Obtenção do Valor da Medida de Desempenho e Intervalo de Confiança

A partir das amostras obtidas, utilizou-se o software MATLAB para computar o valor final da medida de desempenho e intervalo de confiança.

A média da medida de desempenho foi obtida através da média aritmética de cada amostra obtida para a medida, conforme mostrado abaixo:

$$E[\text{medida}] = \frac{\sum^N \text{amostra}}{N} \quad (\text{A.4})$$

...onde N representa o total de amostras obtidas para a medida.

Uma estimativa para o intervalo de confiança pode ser obtida a partir de medidas de variância da medida de desempenho. Como o valor da variância da medida de desempenho não está disponível, foi obtida uma amostra desta variância.

Dado que os dados são amostras não independentes entre si, optou-se pelo uso do método de "batch-means" para descorrelacionar as amostras e obter uma estimativa de variância mais conservadora.

Conforme ilustrado em [85,86], podem-se diminuir a correlação das amostras ao separar o conjunto de amostras em diversos segmentos de amostras. A estimativa da variância é então calculada a partir da variância da média individual de cada segmento, conforme mostrado abaixo:

$$E[\text{segmento}_j] = \frac{\sum_{i=1+(j-1)b}^{ib} \text{amostra}_i}{b} \quad (\text{A.5})$$

$$S_{\text{segmento}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E[\text{segmento}_i] - E[\text{medida}])^2}{n-1}} \quad (\text{A.6})$$

...onde:

- $E[\text{segmento}_j]$: média individual de cada segmento j ;
- amostra_i : i -ésima amostra contabilizada dentro do segmento j ;
- b : número de amostras contidas dentro de um segmento j ;

- E[medida]: média de todas as amostras (igual à média das médias dos segmentos);
- S_{segmento} : representa a estimativa do desvio padrão das médias dos segmentos;
- n: representa o número de segmentos com que foi dividido o conjunto de amostras.

A estimativa para a variância da medida pode ser obtida por [85,86]:

$$S_{\text{medida}} = \frac{S_{\text{segmento}}}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.7})$$

...onde:

- S_{medida} : estimativa para a variância da medida.

A partir da estimativa da variância da medida, pode-se aproximar o intervalo de confiança de 90% a partir da distribuição de t-student com n-1 graus de liberdade.

$$\text{Intervalo}_{90\%} = \pm k \cdot S_{\text{medida}} \quad (\text{A.8})$$

...onde:

- k : valor correspondente à distribuição de t-student com n-1 graus de liberdade que engloba 95% da curva de distribuição (composição de 5% em ambos os lados totaliza o intervalo de 90%).

Nos gráficos apresentados neste trabalho, o intervalo de 90% de confiança está mostrado com um sinal de "+" ao redor do valor médio.

A.6.4. Arquivo de Estados

O Arquivo de Estados foi principalmente utilizado para verificar o correto funcionamento do programa. Entretanto, o mesmo foi projetado para permitir futuras aplicações, tais como: análise de resposta do sistema a entradas determinadas, análise do estado instantâneo do sistema e de medidas baseadas neste estado (tais como compactação).

O Arquivo de Estados é um arquivo texto que é construído da seguinte forma:

Logo após o início da construção do Arquivo de Estados, o Módulo Simulador envia para o arquivo o estado de todas as chamadas ativas no sistema neste instante. A partir daí, à cada evento seqüencial no sistema, o Módulo Simulador

envia para o Arquivo de Estados o estado das chamadas que foram afetadas pelo evento.

O Módulo Simulador envia os seguintes dados para o Arquivo de Estados:

- número do TM e da ERB envolvidos na chamada;
- número do canal sendo utilizado;
- potência de transmissão do TM;
- potência de transmissão da ERB;
- nível de sinal recebido no TM;
- nível de sinal recebido na ERB;
- atenuação entre TM e ERB;
- relação Sinal-Interferência (SIR) no sentido TM-ERB;
- relação Sinal-Interferência (SIR) no sentido ERB-TM.

O Arquivo de Estados permite a implementação futura de um programa que leia seus dados e consiga reconstruir o estado do sistema em um determinado instante e como o mesmo se modificou com as diversas entradas subsequentes.

A.7 Desempenho do Simulador (Tempo de Execução)

Uma das principais medidas de desempenho de um simulador é o seu tempo de execução.

A complexidade do sistema e as iterações entre os diversos elementos do sistema (interferência entre chamadas co-canais) exigem um alto processamento na simulação. Note que cada evento ocorrido no sistema está associado com diversos cálculos. Por exemplo, o início ou fim de uma nova chamada alocada em um determinado canal envolve cálculos relacionados com a nova condição de interferência em cada TM utilizando o mesmo canal. Da mesma forma, as condições de interferência devem ser reavaliadas à cada movimento de TM.

Além disso, novas relações de interferência podem exigir rearranjo de chamadas através de "intracell handoffs"; rearranjos podem por sua vez gerar outros rearranjos.

Dado que o objetivo do trabalho envolvia execução de diversos cenários em diversas condições, um dos critérios de projeto do Sistema Simulador foi a rapidez de execução.

Em um microcomputador Pentium II de 200MHz, o Sistema Simulador teve um tempo médio de execução de 100 mil eventos, para cada cenário, em cada carga de entrada, conforme mostrado na tabela A.1:

	sem mobilidade	com mobilidade	TDMA(sem mobilidade)
algoritmos FCA	~20m	~35m	~45m
algoritmos DCA	1h a 1,5h	1,5h a 2,5h	4h a 5h

tabela A.1: tempo aproximado de execução do Sistema Simulador em cada cenário, em cada carga, para 100 mil eventos.

As razões para o relativo curto tempo de execução dos algoritmos se encontram abaixo:

- programa desenvolvido especialmente para simulação de algoritmos de alocação de canais;
- atenuações e desvanecimento são previamente calculados e executados em todos cenários e simulações, evitando o repetitivo cálculo de atenuação entre uma ERB e um TM.
- tabelas para evitar uso de funções de cálculo complexas (como logaritmo).

Os tempos de execução dos cenários de algoritmos DCA em sistemas TDMA foram muito superiores aos dos sistemas analógicos pois em sistemas sem sincronismo, 1 "time-slot" pode interferir em 2 outros "time-slot" da mesma portadora sendo utilizada por outra ERB. Assim, qualquer modificação (alocação ou desalocação de chamadas) em um "time-slot" envolvia a verificação e atualização das condições de interferência de diversos TMs utilizando os "time-slots" da mesma portadora do "time-slot" envolvido na modificação.

Os tempos de execução dos cenários com mobilidade não aumentaram tanto devido à utilização de movimento síncrono de usuários (conforme explicado no item 4.4.2). Caso não se considere o movimento síncrono dos usuários, aumento considerável no tempo de simulação deve ser esperado.

A.8 Limitações do Sistema Simulador

Sem considerar o tempo de execução, o principal fator limitante do Sistema Simulador é a memória ocupada pelo mesmo durante sua execução.

A memória ocupada pelos bancos de dados é a principal razão para a necessidade de muita memória. Deve-se observar que para permitir uma execução rápida, os bancos de dados tinham de estar residentes na memória corrente ao invés de residentes no disco rígido.

O banco de dados que ocupa mais espaço na memória é o BD_POSATEN (Banco de Dados de Atenuação). Conforme explicado no item A.7, as atenuações e desvanecimento são previamente calculados e armazenados para cada ponto do gradil da área de serviço. BD_POSATEN armazena a atenuação entre todos os pontos do gradil e cada ERB do sistema. Assim, quanto maior o número de ERBs, maior será a memória necessária. Além disso, quanto maior a precisão do gradil, maior será a memória necessária.

O cenário utilizado neste trabalho é constituído de 196 ERBs e 70 metros de precisão, totalizando um gradil de 420 x 364 representando a área de serviço. Considerando que cada ponto do gradil necessita de 2 bytes para representar o valor inteiro correspondente à atenuação, o total de memória ocupada, somente pelo banco de dados BD_POSATEN, é de 60 Megabytes.

O total de memória ocupada por todos os bancos de dados e pelo programa é de aproximadamente 80Megabytes de memória no microcomputador.

Tal limitação pode ser ultrapassada se os cálculos de atenuação entre TM e ERB forem executados durante o tempo de execução do Sistema Simulador. Entretanto, o tempo de execução aumentará consideravelmente pelo tempo de processamento necessário para o cálculo de funções complexas.

A.9. Testes de Validação

A fim de garantir a validade dos resultados obtidos com a ferramenta de simulação, diversos testes foram realizados a fim de validar o simulador.

O Sistema Simulador possui facilidades de depuração que permitem execução passo a passo de eventos no sistema, permitindo que os diversos estados

e bancos de dados do sistema pudessem ser verificados durante a execução de um evento ou comando. O Sistema Simulador ainda permite que o usuário gere eventos manualmente no sistema mesmo durante a execução de uma seqüência de eventos provindos do Módulo Gerador de Chamadas. Dessa forma, pode-se verificar o comportamento do Sistema Simulador em situações específicas. Diversos testes foram realizados através destas facilidades, permitindo-se a verificação do correto funcionamento do Sistema Simulador.

Além disso, a modularidade do Sistema Simulador permitiu que os mesmos fossem testados separadamente através de programas de teste que geravam determinadas entradas no módulo e checavam as saídas do mesmo.

Dada a complexidade do sistema sendo simulado, não é suficiente testar somente determinadas funcionalidades do Sistema Simulador individualmente ou através da verificação da correta execução de determinados eventos.

Dessa forma, o Sistema Simulador teve seus resultados validados através da comparação com resultados esperados em diversos cenários.

O Sistema Simulador foi simulado em sistema ideal com algoritmo FCA com 10 canais em cada célula e 4 células no conjunto de células mutuamente interferente. Utilizando coeficiente de atenuação de propagação igual a 4,0 e sem considerar o desvanecimento lognormal, os resultados de probabilidade de bloqueio do simulador confirmaram a teoria de Erlang-B e os histogramas de SIR confirmaram a teoria de reuso de canais (relação entre SIR, distância de reuso e raio da célula) [1].

O algoritmo RUP sem controle de potência sugerido por Kanai [24] também foi simulado sob os mesmos parâmetros relatados no trabalho. Os resultados numéricos de probabilidade de bloqueio e probabilidade de interferência encontrados por Kanai foram confirmados com pouca diferença. As conclusões obtidas também foram confirmadas.

O algoritmo QUAL com controle de potência sugerido por Serizawa [17] também foi simulado para efeitos de teste do Sistema Simulador. Os resultados de probabilidade de bloqueio foram confirmados com pequenas diferenças nas 3 situações simuladas (sem controle de potência, com controle de potência somente

no sentido TM-ERB e com controle de potência em ambos os sentidos de propagação), verificando ainda as conclusões de Serizawa[17].

Verificação de resultados de simulação de algoritmos DCA em sistemas TDMA ou sistemas com usuários em movimento não foram feitos devido à falta de trabalhos que expliquem em detalhes os algoritmos e parâmetros utilizados.

Portanto, os resultados obtidos nestas simulações e as facilidades de depuração e verificação do simulador garantiram a validade dos resultados obtidos neste trabalho.

A.10. Futuras Implementações

Conforme anteriormente explicado, o Sistema Simulador foi projetado para permitir expansões e melhoramentos futuros. Sugestões para futuras implementações estão relacionadas a seguir:

Portabilidade para Máquinas mais poderosas: o Sistema Simulador foi programado em linguagem padrão ANSI C, com poucos módulos possuindo código específico para execução em computadores do padrão IBM; assim, o Sistema Simulador permite a sua portabilidade para máquinas mais poderosas, como Estações de Trabalho e supercomputadores.

Execução em Ambientes Multiprocessados: conforme pode ser observado no item A.5., a implementação em módulos e fila de mensagens permite a adequação dos programas do Sistema Simulador para processamento em ambientes multiprocessados, podendo reduzir em muito o tempo de processamento.

Ferramentas Gráficas para Visualização: uma ferramenta gráfica de visualização pode facilitar o entendimento do funcionamento dos algoritmos, podendo inclusive revelar características novas dos mesmos. A implementação em módulos permitirá uma fácil implementação de um módulo gráfico.