

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

A TECNOLOGIA OFDMA E SUA APLICAÇÃO
NO CANAL DE INTERATIVIDADE
INTRABANDA DE SISTEMAS DE TELEVISÃO
DIGITAL TERRESTRE

ANDRÉ CARLOS GUEDES DE CARVALHO REIS

ORIENTADOR: PAULO ROBERTO DE LIRA GONDIM
TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.TD - 376 A/2009

Brasília/DF: Março - 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

A TECNOLOGIA OFDMA E SUA APLICAÇÃO NO CANAL DE
INTERATIVIDADE INTRABANDA DE SISTEMAS DE TELEVISÃO
DIGITAL TERRESTRE

ANDRÉ CARLOS GUEDES DE CARVALHO REIS

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Paulo Roberto de Lira Gondim

Aprovada em 20 de abril de 2009 pela seguinte Banca Examinadora:

Paulo Roberto de Lira Gondim , D.C., UnB - Presidente

Weiler Alves Finamore , Ph.D., PUC-Rio - Membro

José Augusto Suruagy Monteiro , Ph.D., da UNIFACS - Membro

Luís Geraldo P. Meloni , Ph.D., da Unicamp - Membro

Lúcio Martins da Silva , D.C., da UnB - Membro

Brasília
2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que me incentivaram, apoiaram e possibilitam esta oportunidade de ampliar meus conhecimentos.

Aos meus pais, Prof^a MSc. Maria de Lourdes Guedes de Carvalho Reis e Prof. Dr. José de Carvalho Reis, pelo exemplo, incentivo e apoio dados durante toda a vida.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Lira Gondim, por sua disponibilidade, atenção, paciência e proficiência no campo da engenharia.

Em especial a minha querida esposa Ane Beatriz dos Santos Reis, pelo amor, carinho e paciência nas longas noites e fins de semana em que estive privada de minha companhia e ajuda para cuidar de nossos quatro filhos: Maria Cecília (3 anos), Ana Carolina (9 anos), Pedro Gabriel (11 anos) e Camille Beatriz (16 anos).

Ao Instituto Militar de Engenharia, alicerce da minha formação na graduação e no mestrado.

À Universidade de Brasília, pela oportunidade concedida para realização deste doutorado.

RESUMO

A TECNOLOGIA OFDMA E SUA APLICAÇÃO NO CANAL DE INTERATIVIDADE INTRABANDA DE SISTEMAS DE TELEVISÃO DIGITAL TERRESTRE

Autor: André Carlos Guedes de Carvalho Reis

Orientador: Paulo Roberto de Lira Gondim

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, março de 2009

A demanda por sistemas de acesso em banda larga sem fio tem levando à busca de soluções tecnológicas que propiciem alto desempenho, expresso não apenas em termos de número de usuários atendidos mas também da qualidade de serviço e de experiência oferecidos. Devido à escassez de recursos do espectro eletromagnético, essas tecnologias devem permitir a utilização flexível e eficiente dos recursos de transmissão tais como frequência, tempo e potência suportando alto grau de mobilidade e cobertura.

Nesse contexto, a tecnologia OFDMA possui características que recomendam seu emprego nos supracitados sistemas, tais como alto ganho de concentração para operação em condições sem linha de visada direta, redução da interferência co-canal dentro da mesma célula, desde que conservada a ortogonalidade entre subportadoras, e redução da interferência co-canal entre células adjacentes em virtude do ganho de processamento.

Além de propor modelos analíticos para cálculo de probabilidade de colisão entre subportadoras e da interferência em sistemas celulares baseadas na tecnologia OFDMA, esta tese avaliou e comparou o desempenho de padrões nela baseados, tais como DVB-RCT e WiMAX, quando utilizados para prover o canal de interatividade intrabanda de um sistema de televisão digital.

Dentre os resultados obtidos estão o dimensionamento de sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA utilizando tanto o ganho de processamento como o ganho de concentração e a determinação da adequabilidade de utilização do padrão DVB-RCT para prover o canal de interatividade intrabanda tanto em áreas rurais como urbanas, utilizando uma arquitetura celular com até dois setores por célula.

ABSTRACT

THE OFDMA TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION TO THE IN-TRABAND INTERACTION CHANNEL OF TERRESTRIAL DIGITAL TELEVISION

Author: André Carlos Guedes de Carvalho Reis

Supervisor: Paulo Roberto de Lira Gondim

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, March of 2009

The demand for broadband wireless access systems has stimulated the search for high performance technological solutions considering not only the number of subscribers served but also the quality of service and quality of experience delivered. Given the scarce nature of spectrum resources, these technologies should allow a flexible and efficient usage of transmissions resources like frequency, time and power supporting high degree of mobility and coverage.

Within this context, the OFDMA technology has characteristics that recommend its usage into the aforementioned systems like high concentration gain for operation in non-line of sight conditions, reduced intracell co-channel interference due to the orthogonality property of OFDMA subcarriers and reduced intercell co-channel interference due to processing gain.

Besides proposing analytical models for subcarrier collision probability and interference calculation in OFDMA-based cellular systems, this thesis has evaluated and compared the performance of standards based on OFDMA technology like DVB-RCT and WiMAX when used to provide the interactive channel for digital television systems.

Among the obtained results are the dimensioning of OFDMA-based cellular systems using both the processing and concentration gains and the determination of suitability of using the DVB-RCT standard to provide an intraband interactive channel in rural and urban areas using a simple cellular architecture with up to two sectors per cell.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES	xvii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - PADRÕES DE TELEVISÃO DIGITAL TERRESTRE	1
1.2 - SISTEMA BRASILEIRO DE TELEVISÃO DIGITAL	3
1.2.1 - Implantação do SBTVD Terrestre	4
1.2.2 - Relatórios e Estudos Realizados	5
1.3 - MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	5
1.4 - PROPOSTA DE TRABALHO	7
1.5 - ORGANIZAÇÃO	8
2 - TELEVISÃO DIGITAL INTERATIVA	10
2.1 - INTERATIVIDADE	10
2.2 - MODELO DE REFERÊNCIA DO SISTEMA DE TELE-	
VISÃO DIGITAL INTERATIVA	10
2.3 - SERVIÇOS DA TELEVISÃO DIGITAL INTERATIVA ...	11
2.3.1 - Serviço de Distribuição	12
2.3.2 - Serviço de Recuperação/Interação	12
2.3.3 - Serviço de Mensagem	12
2.3.4 - Serviço de Conversação	13
2.4 - CANAL DE INTERATIVIDADE	13
3 - O CANAL DE INTERATIVIDADE INTRABANDA BASEADO	
NA TECNOLOGIA OFDMA	15
3.1 - ACESSO MÚLTIPLO AO MEIO BASEADO NA MODULAÇÃO	
OFDM	15
3.1.1 - Alocação Flexível de Recursos de Transmissão	16
3.1.2 - Modos de Permutação de Subportadoras	17

3.1.3	- Ganho de Concentração	18
3.1.4	- Ganho de Processamento	19
3.1.5	- Capacidade	19
3.2	- PADRÕES BASEADOS EM OFDMA	19
3.3	- CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
4	- INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS CELULARES OFDMA	21
4.1	- INTERFERÊNCIA	21
4.1.1	- Classificação da Interferência	21
4.1.2	- Interferência Co-canal	22
4.1.2.1	- Correção da Interferência no Enlace de Subida	24
4.1.3	- Interferência do Canal Adjacente	25
4.2	- TÉCNICA DE MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS CELULARES	26
4.2.1	- Planejamento de Frequências	29
4.2.1.1	- Reuso de Frequência	29
4.2.1.2	- Setorização de Células usando Antenas Direcionais	29
4.2.2	- Antenas Múltiplas	30
4.3	- MODELOS DE CANAL	30
4.4	- MODELOS DE PERDA DE PERCURSO	31
4.5	- MODELO DE SOMBREAMENTO	31
4.6	- MODELO DE MULTIPERCURSO	31
4.7	- MODELO DE SISTEMA	31
4.8	- MODELO DE COLISÃO ENTRE SUBPORTADORAS	32
4.8.1	- Exemplo Numérico	36
4.8.2	- Ganho de Processamento	37
4.9	- MODELO DE INTERFERÊNCIA ANALÍTICO	38
4.9.1	- Exemplo Numérico	40
4.9.1.1	- Especificações da Estação Base e Estação de Assinante	41
4.9.1.2	- Sensibilidade de Receptor	41
4.9.1.3	- Margens	44
4.9.1.4	- Máximo Raio de Célula	44
4.9.1.5	- Capacidade da Célula	45

4.10-	CONCLUSÃO	46
5	- AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PADRÃO DVB-RCT	51
5.1	- TRABALHOS RELACIONADOS	52
5.2	- DESCRIÇÃO DO SISTEMA DVB-T/RCT	54
5.3	- PARÂMETROS DO SISTEMA DVB-T/RCT	55
5.3.1	- Arquitetura de camadas	56
5.3.2	- Camada Física	57
5.3.3	- Cenários e coberturas	59
5.3.4	- Subcamada MAC	64
5.4	- MODELO DA FONTE DE TRÁFEGO	67
5.5	- RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	68
5.5.1	- Metodologia para execução das simulações e coleta de estatísticas	69
5.5.2	- Apresentação dos resultados	69
5.5.3	- Discussão dos resultados	70
5.5.4	- Análise dos intervalos de confiança	71
5.5.5	- Validação dos resultados	72
5.5.6	- Cálculo da capacidade do sistema	73
5.6	- CONCLUSÃO	74
6	- COMPARAÇÃO DOS DESEMPENHOS DOS PADRÕES DVB-RCT E WIMAX	85
6.1	- TRABALHOS RELACIONADOS	85
6.2	- PARÂMETROS DO SISTEMA WIMAX FIXO	86
6.3	- MODELO DA FONTE DE TRÁFEGO	87
6.4	- RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	88
6.5	- CONCLUSÃO	90
7	- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	92
7.1	- CONCLUSÕES	92
7.2	- RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	94

APÊNDICE	103
A - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PADRÃO DVB-RCT ..	104
A.1 - CAMADA FÍSICA	104
A.1.1 - Subcamada MAC	107
A.1.1.1 - Contenção	109
A.1.1.2 - Reserva	111
A.1.1.3 - <i>Ranging</i>	112
A.1.1.4 - Taxa Constante	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Correção de interferência no enlace de subida em [%] no cenário LOS de acordo com o tamanho do <i>cluster</i> (k) e número de setores por célula (s)	26
Tabela 4.2 - Correção de interferência no enlace de subida em [%] no cenário LOS de acordo com o tamanho do <i>cluster</i> (k) e número de setores por célula (s)	26
Tabela 4.3 - Valores de N_{FFT} , N_G e N_{sch} , de acordo com o padrão	39
Tabela 4.4 - Valores dos parâmetros nos enlaces de subida e descida da estação rádio base de acordo com seu perfil	42
Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros dos enlaces de subida e descida da estação de assinante de acordo com seu perfil	42
Tabela 4.6 - Valores de SINR em dB de acordo com o código FEC e o MCS utilizado [1]	43
Tabela 4.7 - Valores dos parâmetros para cálculo da capacidade de um quadro de 5 ms com 72 subportadoras de dados agrupadas em quatro subcanais e duração de 48 símbolos OFDM	46
Tabela 5.1 - Valores dos parâmetros da camada física do padrão DVB-T	57
Tabela 5.2 - Valores dos parâmetros da camada física do padrão DVB-RCT	58
Tabela 5.3 - Mínimo ganho de concentração [dB], de acordo com a modulação e o esquema de acesso ao meio	58
Tabela 5.4 - Fator de correção de localização [dB], de acordo com a porcentagem de locais e o cenário de propagação.	62
Tabela 5.5 - Pontos de mudança de modo de transmissão [km] / porcentagem da área de superfície da célula servida por modo de transmissão[%], de acordo com esquema de acesso ao meio e modo de transmissão no cenário LOS	63
Tabela 5.6 - Pontos de mudança de modo de transmissão [km] / porcentagem da área de superfície da célula servida por modo de transmissão[%], de acordo com esquema de acesso ao meio e modo de transmissão no cenário NLOS	64
Tabela 5.7 - Valores dos parâmetros da subcamada MAC DVB-RCT	65

Tabela 5.8 - Máxima vazão da subcamada MAC [Mbps] do DVB-RCT, de acordo com o modo de transmissão e o esquema de acesso ao meio	67
Tabela 5.9 - Especificação das distribuições, parâmetros e taxa da fonte de tráfego interativo do tipo ON/OFF	68
Tabela 5.10 - Densidade de usuários de uma célula DVB-T/RCT, de acordo com o cenário de propagação, raio da célula e número máximo de usuários	74
Tabela 6.1 - Valores dos parâmetros da camada física e da subcamada MAC do padrão WiMAX fixo utilizados em [2]	87
Tabela 6.2 - Especificação das distribuições, parâmetros e taxa da fonte de tráfego <i>Web</i>	88
Tabela A.1 - Valores dos parâmetros da camada física do padrão DVB-RCT . . .	105
Tabela A.2 - Valores da duração útil de símbolo no canal de subida baseado no padrão DVB-RCT, de acordo com a largura do canal de descida baseado no padrão DVB-T e do espaçamento entre subportadoras no canal de subida	105
Tabela A.3 - Valores da carga de dados útil de salvas físicas, de acordo com a modulação e a taxa de código	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo de referência do canal de interatividade [3].	11
Figura 2.2 - Diagrama simplificado do canal de interatividade.	13
Figura 4.1 - Classificação da interferência dentro de um sistema celular.	22
Figura 4.2 - Disposição das células co-canais interferentes no enlace de subida com um setor por célula de acordo com o tamanho do <i>cluster</i> (k).	27
Figura 4.3 - Disposição das células co-canais interferentes no enlace de subida de acordo com o número de setores por célula (s) e o tamanho do <i>cluster</i>	28
Figura 4.4 - Modos de atribuição de subportadoras numa rede celular baseada na tecnologia OFDMA	33
Figura 4.5 - Atribuição de subportadoras a subcanais por intermédio de processo aleatório baseado em permutações.	34
Figura 4.6 - Árvores das atribuições de subportadoras por subcanal nas células vítima e interferente	36
Figura 4.7 - Ganho de processamento de um sistema celular baseado na tecnologia OFDMA.	38
Figura 4.8 - SINR no enlace de subida relativo a uma SS localizada na borda da célula dentro de um sistema celular de setor único sem ganho de concentração de acordo com o cenário de propagação, carga da célula co-canal, ordem do <i>cluster</i> e raio da célula.	48
Figura 4.9 - SINR no enlace de subida relativo a uma SS localizada na borda da célula dentro de um sistema celular de setor único com ganho de concentração de 6 dB, de acordo com o cenário de propagação, carga da célula co-canal, ordem do <i>cluster</i> e raio da célula.	49
Figura 4.10 - Distribuição de SINR no enlace de subida dentro da célula vítima pertencente a um sistema celular com setor único, <i>cluster</i> de ordem três, raio de 2280m e carga nas células co-canais de 25% num cenário LOS.	50
Figura 4.11 - Distribuição de SINR no enlace de subida dentro da célula vítima pertencente a um sistema celular com setor único, <i>cluster</i> de ordem três, raio de 240m e carga nas células co-canais de 25% num cenário LOS.	50

Figura 5.1 - Modelo de referência para o sistema TVD interativo baseado nos padrões DVB-T e DVB-RCT.	55
Figura 5.2 - Modelo do sistema DVB-T/RCT com canal de subida DVB-RCT cobrindo toda a célula DVB-T.	56
Figura 5.3 - Camadas e protocolos da arquitetura cliente-servidor de uma célula DVB-T/RCT.	57
Figura 5.4 - O ciclo de requisição de reserva.	66
Figura 5.5 - Máquina de estados finitos simplificada do acesso por reserva.	67
Figura 5.6 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS1 no cenário NLOS com tráfego exponencial.	76
Figura 5.7 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS2 no cenário NLOS com tráfego exponencial.	77
Figura 5.8 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS3 no cenário NLOS com tráfego exponencial.	78
Figura 5.9 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS1 no cenário LOS com tráfego exponencial.	79
Figura 5.10 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS2 no cenário LOS com tráfego exponencial.	80
Figura 5.11 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS3 no cenário LOS com tráfego exponencial.	81
Figura 5.12 - Intervalos de confiança do retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação no cenário NLOS com tráfego exponencial.	82
Figura 5.13 - Intervalos de confiança do retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação no cenário LOS com tráfego exponencial.	83
Figura 5.14 - Comparação dos resultados de retardo médio fim-a-fim obtidos com aqueles gerados em um sistema $M/M/c$ com mesmo fator de carga e tempo médio de serviço no cenário LOS e tráfego exponencial.	84
Figura 6.1 - Retardo médio do sistema DVB-T/RCT carregado com fontes de tráfego Web	89
Figura 6.2 - Vazão média do sistema DVB-T/RCT carregado com fontes de tráfego Web	90
Figura A.1 - Distribuição física dos tipos de salvos nos dois tipos de quadros de	

transmissão	106
Figura A.2 - Sistema MC-CDMA explorando a diversidade de frequência, adaptado de [4]	107

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES

SIGLAS

AAI5	<i>ATM Adaptation Layer 5</i>
ACLR	<i>Adjacent Channel Leakage Ratio</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
ASP	<i>Adjacent Subcarrier Permutation</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
ATSC	<i>Advanced Television System Committee</i>
BIM	<i>Broadcast Interface Module</i>
BNA	<i>Broadcast Network Adapter</i>
BS	<i>Base Station</i>
BST-OFDM	<i>Band Segmented Transmission OFDM</i>
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CPqD	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações
DSP	<i>Distributed Subcarrier Permutation</i>
DVB-H	<i>Digital Video Broadcasting - Handheld</i>
DVB-RCT	<i>Digital Video Broadcasting - Return Channel Terrestrial</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FHSS	<i>Frequency hopping spread spectrum</i>

GFC	<i>Generic Flow Control</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
IIM	<i>Interactive Interface Module</i>
INA	<i>Interactive Network Adapter</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial</i>
ISP	<i>Interactive Service Provider</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
ITU-R	<i>International Telecommunications Union - Radiocommunications Sector</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LOS	<i>Line-Of-Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MATV	<i>Master Antenna Television</i>
MC-CDMA	<i>Multi-Carrier Coded Division Multiple Access</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MMDS	<i>Multichannel Multipoint Distribution Service</i>
NIU	<i>Network Interface Unit</i>
NLOS	<i>Non-Line-Of-Sight</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PID	<i>Program Identifier</i>
QEF	<i>Quasi Error Free</i>

QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RCTT	<i>Return Channel Terrestrial Terminal</i>
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
SBTVD-T	Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre
SCM	Serviço de Comunicação Multimídia
SDTV	<i>Standard Definition Television</i>
SDU	<i>Service Data Units</i>
SFN	<i>Single Frequency Network</i>
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SMP	Serviço Móvel Pessoal
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
STFC	Serviço Telefônico Fixo Comutado
STU	<i>Set Top Unit</i>
TF	<i>Transmission Frame</i>
TS	<i>Transport Stream</i>
TVD	Televisão Digital
VCI	<i>Virtual Channel Identifier</i>
VPI	<i>Virtual Path Identifier</i>
VSF	<i>Vestigial Side Band</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

WITNESS *Wireless Interactive Terrestrial Network Systems and Services*

WRAN *Wireless Regional Area Network*

SÍMBOLOS

B Banda efetiva do canal

C_s Espaçamento entre subportadoras

N_G Número de subportadoras por subcanal

N_{sch} Número de subcanais

N_{sch}^{max} Número (máximo) de subcanais simultaneamente alocáveis por usuário

N_{used} Número de subportadoras utilizadas

T_g Tempo de guarda de símbolo OFDM

T_s Tempo de símbolo OFDM

T_u Tempo útil de símbolo OFDM

1 - INTRODUÇÃO

A Televisão Digital (TVD) é uma tecnologia de radiodifusão que permite às atuais emissoras de televisão públicas e privadas oferecer não apenas sua programação habitual com alta qualidade de imagem e som mas também novos serviços de valor adicionado por intermédio de novas capacidades de interação e multiprogramação disponibilizadas.

A possibilidade de oferecimento de novos serviços e aplicações tais como votação, comércio eletrônico, ensino a distância, transações bancárias, telemedicina, acesso a programas de governo, vídeo sob demanda e acesso à Internet levará a um novo paradigma relacionado à utilização das redes de televisão e sua integração com outras redes de telecomunicações em um cenário de convergência. A disponibilidade de tais serviços/aplicações, dentre outros, pode vir a se tornar um elemento chave para promover a inclusão digital, a inclusão social e a cidadania, especialmente nas áreas onde a penetração da televisão aberta predomina sobre outras modalidades tais como televisão por assinatura oferecida via cabo, *Multichannel Multipoint Distribution Service* (MMDS) ou satélite, como também em áreas em que o acesso a recursos computacionais e a redes como a Internet se mostra precário ou inexistente.

De modo a suportar os supracitados serviços/aplicações, um canal de interatividade, também conhecido como canal de retorno, do usuário para o provedor, é necessário. Dependendo não apenas das características das aplicações mas também de seus modelos de implantação e exploração, além de aspectos políticos e regulatórios, o canal de interatividade pode vir a ser provido por intermédio da interconexão com redes de telecomunicações existentes, tais como aquelas utilizadas para prestação do Serviço Móvel Pessoal (SMP), Serviço Telefônico Fixo Comutado (STFC) e Serviço de Comunicação Multimídia (SCM) ou por uma rede dedicada.

1.1 - PADRÕES DE TELEVISÃO DIGITAL TERRESTRE

Em virtude de condicionantes político-econômicos e de diferentes requisitos técnicos, vários padrões de televisão digital terrestre foram e continuam sendo desenvolvidos no

mundo. Os três principais são o *Advanced Television System Committee* (ATSC) [5], o *Digital Video Broadcasting - Terrestrial* (DVB-T) [6] e o *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial* (ISDB-T) [7].

O DVB-T e o ISDB-T são baseados na tecnologia de modulação multiportadora *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), que permite tanto a multiplexação de fluxos de dados paralelos em subportadoras ortogonais com elevada eficiência espectral, como a operação em redes de frequência única, *Single Frequency Network* (SFN). O DVB-T vem sendo usado na Europa e em países como Austrália e África do Sul, enquanto o ISDB-T vem sendo usado no Japão, Brasil e Filipinas.

O ATSC foi desenvolvido com ênfase na melhoria da qualidade da imagem e do som recebidos, de modo a torná-los compatíveis com aqueles oferecidos pela televisão de alta definição, *High Definition Television* (HDTV). Esse padrão utiliza modulação *Vestigial Side Band* (VSB). Este padrão foi adotado na América do Norte e em países como a Coreia do Sul e México.

O DVB-T permite a interatividade e a multiprogramação com canais de televisão em definição padrão, *Standard Definition Television* (SDTV). Posteriormente, foi criada uma versão modificada desse padrão, denominada *Digital Video Broadcasting - Handheld* (DVB-H) [8], voltada para receptores móveis portáteis tais como assistentes digitais pessoais e telefones celulares. Para permitir a interatividade nas aplicações de radiodifusão, foi criado um padrão complementar denominado *Digital Video Broadcasting - Return Channel Terrestrial* (DVB-RCT) [9] prevendo o retorno por intermédio de um canal dentro da banda de radiodifusão (intrabanda). Uma das principais características do DVB-RCT é a utilização de um esquema de acesso múltiplo ao meio baseado na modulação OFDM, conhecida como *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA).

O ISDB-T foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar a diferentes serviços de radiodifusão uma recepção eficiente, tanto para terminais fixos como móveis portáteis, tudo isso dentro de um mesmo canal. Para atender este requisito, foi utilizada a modulação OFDM em uma banda de 6 MHz dividida em 13 segmentos, denominada *Band Segmented Transmission OFDM* (BST-OFDM) e utilizado o entrelaçamento temporal

para descorrelacionar salvas de erros no caso de recepção móvel. Dessa forma, cada tipo de serviço pode ser modulado com diferentes parâmetros otimizados para cada tipo de recepção e de cobertura desejadas.

1.2 - SISTEMA BRASILEIRO DE TELEVISÃO DIGITAL

Atualmente, no Brasil, o serviço de radiodifusão terrestre de sons e imagens é oferecido por meio da transmissão sem fio nas faixas VHF e UHF de sinais analógicos. A qualidade do sinal recebido pelos usuários pode ser baixa em virtude do ambiente de propagação existente entre o transmissor e o receptor ou, ainda, da interferência sofrida de outras fontes tais como linhas de transmissão de energia elétrica e motores em geral.

Acompanhando a evolução tecnológica da radiodifusão verificada em outros países, o Governo Brasileiro instituiu pelo Decreto Presidencial 4.901, de 26 de novembro de 2003, o Projeto do Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD) tendo como principal objetivo a democratização do acesso à informação por meio da tecnologia digital.

Nesse sentido, o Governo Brasileiro almejava que o SBTVD pudesse se estabelecer como porta de entrada para o mundo da informação e do conhecimento de uma parte significativa da população brasileira, ainda sem acesso às facilidades da informática e da Internet, tornando-se um agente potencializador da inclusão social e digital.

Entre as melhorias possibilitadas pela digitalização da transmissão terrestre de televisão estão a sensível melhoria na qualidade dos sinais de áudio e vídeo recebidos, a utilização eficiente do espectro em virtude do aumento da quantidade de informação transmitida e a possibilidade de criação de um canal de interatividade entre o telespectador e o provedor de conteúdo. Essa última melhoria possibilitará a implantação de novos serviços de valor adicionado e aplicações ao ambiente de radiodifusão.

Dos novos serviços e aplicações, potencialmente interessantes, destacam-se aqueles que poderiam contribuir para otimização e melhoria dos programas de governo e prestação de serviços públicos, além de outros desenvolvidos para atender a fortes expectativas

da sociedade tais como, por exemplo, o ensino à distância e o acesso à Internet.

Todavia, o sucesso desses serviços está sujeito a alguns fatores tais como a limitação gráfica dos televisores, o custo do terminal de acesso, a tarifação do serviço, a abrangência geográfica da cobertura, tanto do canal de radiodifusão como do canal de interatividade, a qualidade de serviço (QoS) e a qualidade de experiência (QoE).

A televisão digital oferecerá não apenas diversas oportunidades de convergência dos serviços de radiodifusão e telecomunicações mas também criará novos problemas relacionados à interferência dentro de cada sistema e entre sistemas distintos; à necessidade de revisão da regulamentação de serviços; a protocolos e métodos de acesso ao meio; à segurança da informação, ao dimensionamento de sistemas celulares de radiodifusão. Todos esses problemas deverão ser analisados e resolvidos durante a especificação, projeto e implantação do SBTVD.

1.2.1 - Implantação do SBTVD Terrestre

O Decreto Presidencial 5.820, de 29 de junho de 2006, dispõe sobre a implantação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T) e estabelece diretrizes para a transição do sistema de transmissão analógica para o digital do serviço de radiodifusão de sons e imagens. Entre outras providências, este decreto adota o padrão ISDB-T como base para ser utilizado no SBTVD-T, especificamente, nas camadas física e de controle de acesso ao meio.

Fruto dos estudos e pesquisas realizados durante a avaliação dos padrões passíveis de adoção para o SBTVD-T, o governo brasileiro resolveu implementar algumas modificações no ISDB-T visando melhor adaptá-lo à realidade nacional, tais como a possibilidade de utilização da codificação H.264 (MPEG-4) no sinal de vídeo, incorporação de novas soluções de *middleware*, além da realização de melhorias na modulação.

Efetuada a escolha do padrão de transmissão digital terrestre, é necessária a continuidade de projetos de pesquisa e desenvolvimento para a incorporação de novas funcionalidades ao SBTVD-T. Considerando o objetivo de inclusão social, o projeto

mais importante para complementar o SBTVD-T é justamente o subsistema do canal de interatividade.

1.2.2 - Relatórios e Estudos Realizados

Para subsidiar o processo de escolha do padrão de televisão digital terrestre, foram elaborados diversos relatórios pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), baseados em estudos realizados em universidades e outros centros de pesquisa brasileiros. Entre os relatórios do SBTVD encontram-se uma arquitetura de referência [10], uma especificação técnica de referência [11] e um modelo de referência [12].

Durante a realização dos estudos, foram avaliados diversos padrões tecnológicos e cenários de implantação do canal de interatividade [11]. O padrão escolhido para prover o canal de interatividade intrabanda foi o IEEE 802.16-2004 [13], também conhecido como *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) fixo, com camada física OFDMA e perfil de frequências modificado para utilizar as faixas VHF e UHF [14]. Esse novo perfil do WiMAX certamente permitirá aumentar a área de cobertura, em virtude da perda de propagação ser inversamente proporcional à frequência de transmissão utilizada. Uma revisão sobre os diversos trabalhos realizados para escolha do padrão brasileiro de televisão digital e subsistemas pode ser encontrada em [15].

1.3 - MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A adoção de um padrão como o WiMAX, desenvolvido para aplicações *Broadband Wireless Access* (BWA), em cenários constituídos por um número relativamente pequeno de usuários, altas taxas de transmissão e tamanho de célula pequeno, suscita dúvidas e questionamentos quanto ao seu desempenho como canal de retorno para radiodifusão, onde o cenário é completamente diferente. Apesar das qualidades do WiMAX para aplicações em redes metropolitanas [16] [17] [2], algumas características de sua camada física são inadequadas para redes regionais *Wireless Regional Area Network* (WRAN) tais como, por exemplo, a curta duração do símbolo OFDM [18], quando comparado ao

do DVB-RCT, o que implica em tamanhos de células menores e custos mais elevados de implementação.

O DVB-RCT funciona de forma integrada ao DVB-T, tanto na camada física (sincronismo, máscara de interferência e banda de guarda) como de enlace (escalonamento, acesso múltiplo com detecção virtual de colisão). Diferentemente desse sistema, o WiMAX constitui uma rede de telecomunicações independente da rede de televisão. Dessa forma, o desempenho do WiMAX servindo aplicações interativas de televisão com perfis de tráfego específicos deve ser avaliado, mormente num contexto de otimização entre sistemas, o mesmo acontecendo com o DVB-RCT, respeitadas as diferenças.

Além do WiMAX, e no contexto de soluções sem fio para o canal de interatividade, o padrão IEEE 802.11 para redes locais sem fio auto-estruturadas, conhecido como *Wireless Fidelity* (WiFi), também foi avaliado como solução alternativa de baixo custo para o canal de retorno [19], especialmente na configuração não-estruturada (*ad hoc*).

Por fim, tecnologias sem fio baseadas nas redes de comunicações móveis de 3^a e 4^a Geração também têm sido consideradas, dentro de um possível cenário de convergência de redes de comunicações e de televisão.

Outro aspecto importante, relacionado à proposta de canal de retorno intrabanda, é o compartilhamento de espectro com os serviços existentes nas faixas VHF e UHF. Existem estudos que indicam a necessidade de uma banda de guarda com, no mínimo, três canais de cada lado do canal utilizado, tanto para o WiMAX [11] como para o DVB-RCT [20]. Portanto, serão seis canais de TV reservados para cada canal de retorno intrabanda utilizado. Dessa forma, devido à reduzida disponibilidade de canais para radiodifusão terrestre, é necessário que sejam empregadas tecnologias de acesso sem fio de alta eficiência espectral e capacidade para implantação do canal de interatividade. Recentemente, o ITU-R recomendou a utilização de, no mínimo, seis canais de RF com 8 MHz de banda cada para a prestação de um serviço interativo econômico e completo [20].

Com base nas observações anteriores, verifica-se a necessidade, oportunidade e importância de se realizar uma pesquisa mais detalhada sobre os desafios tecnológicos para

implantação do canal de interatividade intrabanda no SBTVD-T que aponte possíveis soluções com base na tecnologia OFDMA, em virtude dos seguintes aspectos:

- tanto no padrão DVB-RCT como no WiMAX, a implementação de algumas funcionalidades não foram definidas tais como algoritmos de escalonamento, de adaptação de esquemas de modulação e codificação de canal, de alocação de potência, de troca de célula, de inicialização, de controle de potência e sincronização e de requisição de banda;
- a tecnologia OFDMA tem sido proposta para utilização em quase todos os padrões de 4^a Geração de sistemas celulares e redes de acesso sem fio metropolitanas;
- não foram encontrados na literatura trabalhos relativos ao desempenho do canal de interatividade intrabanda DVB-RCT utilizando tanto modelos de fonte de tráfego interativo (exponencial), como modelos com dependência temporal de larga escala e auto-similaridade. Este último, comum em redes de acesso contendo tráfego agregado de aplicações da Internet;
- o compartilhamento do espectro eletromagnético entre sistemas baseados na tecnologia OFDMA e outros sistemas legados ainda precisa ser melhor estudado visando, por exemplo, estabelecer critérios para definição de bandas de guarda.
- não foram encontrados na literatura modelos analíticos para cálculo da interferência co-canal, do ganho de concentração e do ganho de processamento que possam ser utilizados no dimensionamento e na determinação da capacidade de sistemas de comunicações baseados na tecnologia OFDMA.

1.4 - PROPOSTA DE TRABALHO

De forma geral, este trabalho procura avaliar o desempenho da tecnologia OFDMA em sistemas de comunicações sem fio, com ênfase em sua aplicação no canal de interatividade de sistemas de televisão digital. Em especial, dada a inexistência de soluções padronizadas para implementação de algumas funcionalidades em sistemas de comunicações sem fio baseados nessa tecnologia, problemas ligados à interferência co-canal

em sistemas celulares e ao desempenho da camada de aplicação foram abordados buscando comprovar a adequabilidade ou não de padrões baseados nessa tecnologia tais como WiMAX e DVB-RCT.

Com base nas supracitadas motivações relacionadas à utilização da tecnologia OFDMA, foram realizadas as seguintes contribuições:

- Modelo analítico para cálculo da distribuição de probabilidades de colisão de subportadoras e do ganho de processamento em sistemas baseados na tecnologia OFDMA;
- Modelo analítico para cálculo da interferência em sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA;
- Avaliação do desempenho do padrão DVB-RCT incluindo a determinação de sua capacidade tanto em cenários rurais como urbanos;e
- Comparação dos desempenhos dos padrões DVB-RCT e WiMAX.

1.5 - ORGANIZAÇÃO

O trabalho está dividido em sete capítulos.

O Capítulo 2 apresenta o modelo do sistema de televisão digital interativa.

O Capítulo 3 apresenta o canal de interatividade intrabanda baseado na tecnologia OFDMA.

O Capítulo 4 discute os tipos de interferência presentes em sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA e propõe modelos analíticos de colisão de subportadoras e de interferência.

O Capítulo 5 avalia o desempenho do padrão DVB-RCT com tráfego interativo exponencial.

O Capítulo 6 compara o desempenho do padrão DVB-RCT com o do padrão WiMAX.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

No Apêndice A são apresentadas as principais características do padrão DVB-RCT.

2 - TELEVISÃO DIGITAL INTERATIVA

A televisão digital interativa, diferentemente da televisão analógica tradicional, possibilita a interação do telespectador com o equipamento receptor que exibe a informação, transformando-o em usuário ativo e permitindo-lhe personalizar o conteúdo apresentado. Tal possibilidade torna a televisão digital interativa não apenas uma revolução tecnológica, mas também um possível instrumento para uma revolução social, à medida em que o usuário pode expressar sua opinião.

2.1 - INTERATIVIDADE

A interatividade pode ser classificada, por exemplo, quanto ao tipo de relacionamento do usuário com o conteúdo, quanto à disponibilidade ou não de meio de comunicação para o canal de retorno e quanto à duração da interação.

A interatividade é mútua ou conversacional quando a interação é bidirecional. Quando a interação ocorre num só sentido, normalmente do usuário para o provedor de conteúdo, é dita reativa.

A interatividade é classificada como local quando o usuário interage apenas com as informações armazenadas localmente ou presentes no carrossel de dados. Por outro lado, é plena quando o usuário interage com as informações armazenadas no provedor de conteúdo utilizando o canal de retorno.

A interatividade pode ser permanente ou intermitente. É permanente quando ocorre durante toda duração da sessão de televisão ou quando pode ocorrer em qualquer instante da sessão. É intermitente quando ocorre apenas em determinados instantes da sessão.

2.2 - MODELO DE REFERÊNCIA DO SISTEMA DE TELEVISÃO DIGITAL INTERATIVA

Baseando-se nos novos atributos da televisão digital interativa, a *International Telecommunications Union* (ITU) elaborou o modelo de referência contido na Recomendação J.110 [3].

O modelo da ITU, ilustrado na Figura 2.1, apresenta um provedor de serviço de radiodifusão e um provedor de serviços interativos. O provedor de serviço de radiodifusão é o fornecedor de programas de televisão, normalmente representado pelas emissoras de televisão. O provedor de serviço interativo é responsável pelo desenvolvimento e operação dos serviços interativos, podendo ser a própria emissora ou um provedor à parte.



Figura 2.1 - Modelo de referência do canal de interatividade [3].

As informações provenientes do provedor de serviço de radiodifusão são transmitidas através do canal de radiodifusão. As informações provenientes do provedor de serviço interativo podem ser transmitidas através do canal ou circuito de interatividade. Esse último é suportado por uma infraestrutura de rede de telecomunicações.

As informações provenientes do usuário são transmitidas por intermédio de terminal de acesso, equipado com interface para o canal de interatividade. O terminal de acesso deve ser capaz de receber os sinais de televisão digital provenientes do meio físico utilizado (ar, cabo ou outro), sintonizar e decodificar os sinais e possibilitar sua reprodução num televisor comum (analógico).

2.3 - SERVIÇOS DA TELEVISÃO DIGITAL INTERATIVA

No cenário de televisão digital interativa, os usuários poderão vir a ter uma diversidade de serviços e aplicações. Dependendo do modo como a informação associada ao serviço é transportada pela rede, há quatro categorias de serviço: distribuição, recuperação/interação, mensagem e conversação [3]. Dentro de cada categoria foram listadas diferentes aplicações possíveis de serem implementadas que, em sua maioria, levam em consideração as limitações da plataforma, dos terminais de acesso e da demanda de utilização dos usuários.

2.3.1 - Serviço de Distribuição

Os serviços de distribuição são caracterizados pela difusão da informação de uma fonte para múltiplos usuários. O fluxo da informação é unidirecional, ponto-multiponto, e quase sempre em tempo real. Os usuários não têm influência sobre a fonte. Cada usuário seleciona o conteúdo localmente, a partir dos canais disponíveis. Exemplos: radiodifusão, difusão de dados, etc.

2.3.2 - Serviço de Recuperação/Interação

Este serviço é caracterizado pela entrega individualizada da informação, em resposta à requisição de um único usuário. O fluxo da informação é bidirecional, ponto a ponto e, na maioria das vezes, assimétrico e em tempo oportuno. Exemplos: acesso à Internet para navegação, descarga de arquivos, interação com provedor de conteúdo, vídeo sob demanda, compras /reservas *on-line*, votações e jogos.

2.3.3 - Serviço de Mensagem

Neste serviço a informação é uma mensagem armazenada num servidor de rede ou provedor de acesso. Este servidor indica ao usuário a existência da mensagem e este solicita a entrega da mesma. O fluxo da informação é bidirecional, em tempo oportuno,

ponto a ponto e com armazenamento em ambas as extremidades. Exemplos: correio eletrônico, sala de bate-papo, etc.

2.3.4 - Serviço de Conversação

É um serviço bidirecional entre usuários e/ou terminais. Tipicamente é ponto a ponto, simétrico e possui requisitos de QoS para tráfego de tempo real. Exemplos: telefonia de voz, vídeo conferência, etc.

2.4 - CANAL DE INTERATIVIDADE

O canal de interatividade é um subsistema do sistema de televisão digital que possibilita a cada usuário, individualmente, interagir enviando/recebendo informações e solicitações ao/do provedor de serviço interativo. No caso da ausência temporária ou definitiva de um canal de interatividade, o armazenamento local de informações pode ser usado para simular, de modo restrito, a interatividade. Nesse caso, o armazenamento local permitiria a interação do usuário apenas com o conteúdo armazenado.

O canal de interatividade é comumente constituído com base em infraestrutura de comunicações formada pela interconexão das redes de televisão e telecomunicações. Essa infraestrutura possui um canal de descida e um canal de retorno (circuito), conforme ilustrado na Figura 2.2.

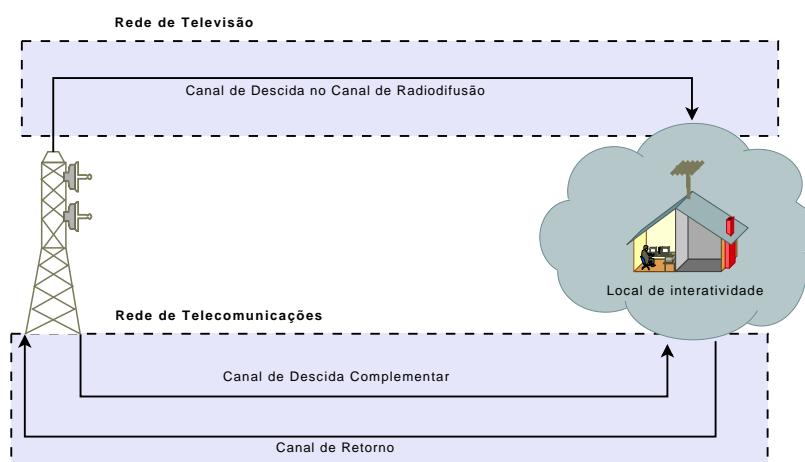


Figura 2.2 - Diagrama simplificado do canal de interatividade.

O canal de descida estabelece a comunicação no sentido dos provedores de conteúdo para usuários. É implementado utilizando o canal de radiodifusão e, caso a demanda de tráfego seja maior que a capacidade de transporte de dados, complementado pelo canal de descida das redes de telecomunicações. Quanto ao endereçamento, a comunicação com os usuários pode ser realizada por difusão (aberta e disponível a todos os usuários), multidifusão (grupo fechado de usuários) e unidifusão (individualizada).

O canal de retorno é estabelecido usando uma ou mais tecnologias de redes de acesso de telecomunicações que permitam a comunicação no sentido dos usuários para provedores de conteúdo.

3 - O CANAL DE INTERATIVIDADE INTRABANDA BASEADO NA TECNOLOGIA OFDMA

Atualmente, existem diversas soluções tecnológicas aplicáveis ao subsistema canal de interatividade. Todavia, não existe uma solução universal para prover o canal de interatividade em virtude da existência de uma grande diversidade de cenários de implantação. A solução depende dos requisitos estabelecidos que, normalmente, estão relacionados a custos de utilização e de aquisição de equipamentos, tanto para o provedor de conteúdo como para os usuários, a existência de infraestrutura de transmissão, a mobilidade, a portabilidade, a área de cobertura, a disponibilidade de faixas de frequência e a distribuição geográfica da população.

Normalmente, os serviços e aplicações interativos não necessitam de uma grande largura de banda, pelo menos em situações móveis [21] e são bastante assimétricos, ou seja, não exigem uma grande quantidade de informações no sentido de subida (do usuário para provedor) mas sim no sentido de descida (do provedor para usuário). Portanto, a tecnologia a ser escolhida deve possibilitar contemplar essa característica.

Considerando os cenários encontrados no Brasil, as tecnologias mais relevantes e atualmente disponíveis foram elencadas no relatório [22], para servir de subsídio para o SBTVD-T. Conforme mencionado no Capítulo 1, a solução tecnológica escolhida para prover o canal de interatividade intrabanda do SBTVD-T é baseada no padrão IEEE 802.16-2004 [13] com camada física OFDMA e perfil modificado para utilizar as faixas de frequências VHF e UHF [14].

Além de ser utilizada nos padrões WiMAX e DVB-RCT, a tecnologia OFDMA também foi proposta como solução para os SMP de 4ª Geração, tais como por exemplo no padrão 3GPP *Long Term Evolution* (LTE).

Neste capítulo é realizada uma descrição sucinta da tecnologia OFDMA, são apresentadas as principais características dos sistemas de comunicações nela baseados e introduzidos alguns padrões que a utilizam.

3.1 - ACESSO MÚLTIPLO AO MEIO BASEADO NA MODULAÇÃO OFDM

A modulação OFDM possui diversas vantagens que facilitam seu emprego em sistemas de comunicações sem fio tais como elevada eficiência espectral, robustez ao desvanecimento multipercurso e reduzida interferência entre símbolos. Aproveitando essas vantagens, foi desenvolvido um esquema de acesso múltiplo ao meio baseado na modulação OFDM denominado OFDMA. No OFDMA, o símbolo OFDM é dividido no domínio da frequência em N_{sch} subconjuntos de subportadoras, denominados de subcanais, que podem ser individualmente alocados a diferentes usuários pelo seu intervalo de duração. A menor unidade de alocação é denominada *slot* e possui dimensões expressas em termos do número de símbolos OFDM pelo número de subcanais.

Em um sistema OFDMA, a condição de ortogonalidade requer que o espaçamento entre subportadoras C_s seja o inverso do tempo de símbolo útil T_u e que a banda efetiva do canal seja dada por $B = C_s \cdot N_{used}$, onde N_{used} é o número de subportadoras utilizadas. A duração do símbolo OFDM é $T_s = T_u + T_g$, onde T_g é o tempo de guarda necessário para reduzir a interferência entre símbolos resultante do espalhamento de retardos do canal. O tamanho do intervalo de guarda representa uma solução de compromisso entre a robustez do sistema ao espalhamento de retardos e a sua capacidade/ eficiência espectral.

Nessa seção serão apresentadas algumas características do esquema de acesso múltiplo OFDMA tais como alocação de recursos, modos de permutação de subportadoras, ganho de concentração, ganho de processamento e capacidade.

3.1.1 - Alocação Flexível de Recursos de Transmissão

Dependendo da frequência, do instante de tempo, da potência de transmissão e do usuário utilizador, cada subportadora sofre um desvanecimento que depende das condições do canal. Desse modo, existe a possibilidade de que subportadoras com alto desvanecimento para um usuário estejam em boas condições se forem utilizadas por outro. Essa

característica do OFDMA permite obter grande flexibilidade na alocação dinâmica de recursos de transmissão e propiciar ao sistema um ganho de diversidade multiusuário. Dessa forma, o OFDMA permite que a transmissão da informação por intermédio de cada subportadora possa ser otimizada individualmente, adequando-se a taxa de codificação de canal, a modulação e a potência de transmissão para maximizar a vazão e/ou aumentar a confiabilidade.

Para realizar o aproveitamento desta flexibilidade na alocação de recursos, vários algoritmos têm sido propostos [23] [24]. Todavia, estes algoritmos possuem uma alta complexidade computacional e comumente necessitam tanto do conhecimento das condições do canal existente entre o transmissor e o receptor como da quantidade de informação a ser transmitida e dos requisitos de QoS/QoE dos usuários do sistema. A obtenção desse conhecimento pelo transmissor requer que uma grande quantidade de informação seja enviada oportunamente pelo receptor. Essa informação de controle pode sobrecarregar o canal de retorno, reduzindo a quantidade de recursos disponíveis para transmissão dos dados do usuário.

A alocação de potência por subportadoras pode ser ajustada de acordo com os usuários aos quais elas sejam atribuídas bem como seus correspondentes ganhos de canal. Estudos recentes [25] indicaram que a solução de alocação uniforme de potência entre as subportadoras é preferível em relação às soluções conjuntas mais complexas de alocação de potência e atribuição de subportadoras em virtude das melhorias de desempenho serem marginais em sistemas OFDMA reais. Ao longo deste trabalho, a potência é distribuída de forma uniforme por todas as subportadoras de um subcanal. Desse modo, dados a potência máxima e o número máximo de subcanais alocáveis simultaneamente por usuário, determina-se a potência de cada subportadora.

3.1.2 - Modos de Permutação de Subportadoras

Para reduzir a complexidade da alocação de recursos em sistemas OFDMA, vários padrões modernos de redes sem fio, tais como DVB-RCT, WiMAX e LTE, adotaram subcanais compostos por múltiplas subportadoras. Dependendo da aplicação, essas subportadoras podem ser adjacentes ou distribuídas ao longo de toda faixa de

frequência do canal. Sistemas constituídos por subcanais contendo subportadoras distribuídas, modo *Distributed Subcarrier Permutation* (DSP), são mais adequados para aplicações móveis onde a estimação de canais é complexa. Devido à diversidade de frequência, esses subcanais são igualmente adequados a qualquer usuário. Todavia, o grau de diversidade depende da quantidade de subportadoras independentes por subcanal, N_G . Os sistemas com subcanais compostos de subportadoras adjacentes, modo *Adjacent Subcarrier Permutation* (ASP), são mais adequados para aplicações fixas, portáteis, nômades ou de reduzida mobilidade. Tais subcanais permitem a obtenção de ganho multiusuário por intermédio de modulação e codificação adaptativas baseada na estimação da resposta do canal e em políticas de coordenação de interferência entre células adjacentes.

3.1.3 - Ganho de Concentração

Usualmente, não é uma tarefa trivial definir tamanhos de símbolos, subcanais e *slots* ótimos que explorem completamente a diversidade de tempo e frequência do canal [26]. Dependendo das diretrizes e objetivos utilizados durante a fase de definição, podem ser obtidas uma cobertura e uma taxa de transmissão média adequadas para diferentes tipos de aplicação e cenários de propagação.

Assumindo que a potência de transmissão seja distribuída uniformemente por todas subportadoras de um subcanal, o ganho de concentração depende apenas do número de subcanais que podem ser simultaneamente alocados a um usuário. O ganho de concentração é definido por $10 \log_{10}(\frac{N_{sch}}{N_{sch}^{max}})$ [27], onde N_{sch}^{max} é o número de subcanais simultaneamente alocáveis. Num sistema celular OFDMA, esse número é muito importante para o dimensionamento de suas células pois a potência total de transmissão do usuário de subida ou alocada para o usuário de descida deve ser dividido por ele. O efeito dessa operação é um ganho de subcanalização/concentração que reduz a interferência e aumenta a densidade espectral de potência e, por conseguinte, a cobertura.

Durante a determinação do número máximo de subcanais, deve-se considerar também os requisitos de QoS/QoE das aplicações pois esse número tem influência no algoritmo de escalonamento e mapeamento de requisições de banda e na taxa máxima para

transmissão de dados disponível para as aplicações.

3.1.4 - Ganho de Processamento

De modo análogo a um sistema *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), o ganho de processamento num sistema OFDMA representa a razão entre o número de subportadoras de um subcanal e o valor médio do número de subportadoras interferidas, ou seja, que estão sendo utilizadas por células co-canais interferentes [28].

3.1.5 - Capacidade

Para garantir um acesso justo e equitativo aos recursos de transmissão, o algoritmo de escalonamento da *base station* (BS) deve ser capaz de alocar uma quantidade de *slots* a uma *subscriber station* (SS) inversamente proporcional à capacidade de carga do *slot*. Essa capacidade de carga está diretamente relacionada ao *modulation and coding scheme* (MCS) utilizado pela BS com a SS e definido de acordo com o valor médio estimado de SINR *signal to interference plus noise ratio* (SINR) no canal. Dessa forma, a tendência é que uma maior quantidade de *slots* seja alocada a SS localizados na borda da célula.

Como o MCS depende da posição relativa entre a SS e sua BS, a capacidade de uma célula irá depender da distribuição geográfica de usuários. Existem vários modelos de distribuição geográfica de usuários [29] [30] [31] [32]. Normalmente, é assumida uma distribuição uniforme de usuários para pequenas células que cobrem ruas, parques e pequenos bairros. Para células grandes que cobrem regiões metropolitanas, distribuições exponenciais podem ser utilizadas. Dada a distribuição de MCS por quadro de transmissão, a capacidade pode ser calculada pela média ponderada da taxa de transmissão de dados de cada MCS. Nesse caso, o peso corresponde ao número de *slots* com determinado MCS. Um exemplo de cálculo de capacidade será mostrado na Seção 4.9.1.

3.2 - PADRÕES BASEADOS EM OFDMA

Para facilitar a implementação da tecnologia OFDMA em sistemas de comunicações sem fio, os padrões citados neste Capítulo organizam em camadas as diferentes tarefas a serem executadas para controle e transmissão de informação. A camada física executa tarefas necessárias à codificação da informação para adequada transmissão pelo meio físico. Algumas tarefas típicas dessa camada são o entrelaçamento, codificação para controle de erros e a modulação. A camada de enlace descreve a organização lógica da informação a ser transmitida pela camada física. Dentro dessa camada está a subcamada MAC que executa tarefas de controle de acesso ao meio, escalonamento e mapeamento das unidades de informação a serem transmitidas. Essas tarefas podem ser otimizadas de acordo com as características da informação a ser transmitida, o tipo de canal de comunicação existente entre os pontos de origem e destino, e com os requisitos de QoS/QoE do usuário.

Dos padrões que utilizam o OFDMA, três podem ser destacados: DVB-RCT, WiMAX e LTE. O Apêndice A descreve as principais características do padrão DVB-RCT. O WiMAX utiliza OFDMA tanto na descida como na subida [13] [1]. O LTE utiliza OFDMA apenas na descida [33].

3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente Capítulo foram apresentadas algumas características inerentes a sistemas de comunicações baseados na tecnologia OFDMA juntamente com alguns conceitos e definições que serão úteis nos capítulos seguintes.

4 - INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS CELULARES OFDMA

Em sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA cujas células possuem vários setores, não é esperada nenhuma interferência dentro dos setores entre os usuários em virtude das subportadoras serem ortogonais. Todavia, as interferências entre células e setores co-canais ainda estão presentes e devem ser consideradas.

Neste capítulo é estudado o problema da interferência em sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA. Primeiramente, é proposto um modelo analítico para a probabilidade de colisão de subportadoras quando o modo distribuído de atribuição de subportadoras por subcanal for utilizado. Com base nesse modelo é possível calcular o número médio de subportadoras interferidas por subcanal e o ganho de processamento. Posteriormente, é proposto um modelo de interferência para cálculo da razão portadora/ interferência e ruído. Esta razão é fundamental para o dimensionamento e cálculo da capacidade de sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA. Por fim, um exemplo de utilização é apresentado para uma rede celular WiMAX.

4.1 - INTERFERÊNCIA

Em um sistema celular, uma extensa área geográfica é dividida em pequenas áreas contíguas denominadas células que são servidas por suas próprias estações rádio base. Cada estação base disponibiliza recursos de transmissão que permitem oferecer serviços de comunicações a muitos terminais de usuários móveis. A separação entre células pode ocorrer nas dimensões do tempo, espaço e/ou frequência, permitindo o reuso de recursos de transmissão sem produzir interferência.

A interferência é definida como sendo o efeito da energia de um sinal não desejado, devido a combinação de uma ou mais emissões, sobre a recepção do sinal desejável, manifestado por qualquer degradação de desempenho que poderia ser evitada pela ausência de tal combinação. A interferência é usualmente causada pelo reuso intensivo de recursos de transmissão nas supracitadas dimensões dentro de um sistema celular.

4.1.1 - Classificação da Interferência

A interferência pode ser gerada a partir de sinais provenientes do mesmo sistema (*intra-system interference*) ou de outros sistemas (*inter-system interference*). Dentro de um sistema celular, a interferência entre células que utilizam o mesmo canal ou canais adjacentes é denominada interferência co-canal ou interferência de canal adjacente, respectivamente. Tal interferência pode ser originada em transmissões efetuadas dentro da mesma célula (*intracell interference*) ou em células vizinhas (*intercell interference*). A Figura 4.1 sintetiza essa classificação.

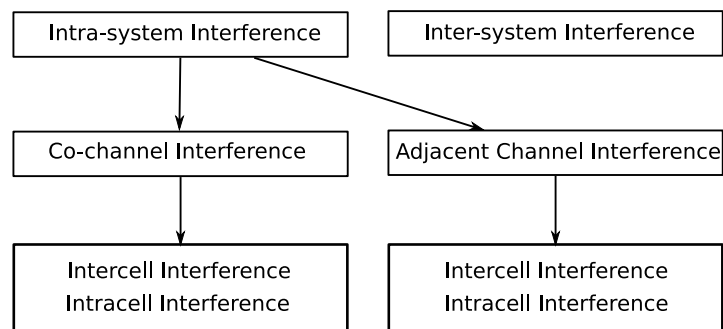


Figura 4.1 - Classificação da interferência dentro de um sistema celular.

Usualmente, a interferência entre células é dominada pela interferência co-canal. Assumindo uma apropriada separação na dimensão do tempo (duplexação por divisão de tempo) e/ou na dimensão da frequência (duplexação por divisão de frequência), a interferência dentro da célula entre transmissões efetuadas nos enlaces de subida e descida podem ser desprezadas.

4.1.2 - Interferência Co-canal

Em sistemas celulares sem fio, a interferência co-canal é um dos principais fatores limitantes da capacidade do sistema. Essa capacidade pode ser expressa como o número de usuários que o sistema pode servir com QoS/QoE aceitável e está diretamente relacionada com a eficiência espectral do sistema medida em Mbps/Hz/setor celular. A abordagem usual para aumentar a capacidade do sistema é mitigar a interferência co-canal usando o planejamento de frequência, diversidade de transmissão e/ou métodos de acesso ao meio sofisticados tais como *code division multiple access* (CDMA) e OFDMA.

Dependendo da carga na célula, controle de potência e velocidade de usuário, a interferência co-canal dentro da célula é quase cancelada pelas últimas duas técnicas.

Considerando um conjunto de SS servidas por uma BS, as interferências co-canais entre células nos enlaces de subida e descida podem ser calculadas pelas Equações 4.1 e 4.2, respectivamente. Tais equações mostram que as propriedades estatísticas da SINR nos canais dos enlaces de subida e descida devem ser consideradas nos estudos de interferência [34].

$$SINR_{UL}(i) = \frac{P_T^{SS(i)} \cdot G_A^{SS(i) \rightarrow BS(SS(i))} \cdot G_A^{BS(SS(i)) \rightarrow SS(i)} \cdot G_C^{SS(i)}}{\sum_{BS(SS(j)) \neq BS(SS(i))} I_j + N} \quad (4.1)$$

$$SINR_{DL}(i) = \frac{P_T^{BS(SS(i))} \cdot G_A^{BS(SS(i)) \rightarrow SS(i)} \cdot G_A^{SS(i) \rightarrow BS(SS(i))} \cdot G_C^{SS(i)}}{\sum_{BS(j) \neq BS(SS(i))} I_j + N} \quad (4.2)$$

$$P_T^{SS(i)} = \frac{P_{T_{max}}^{SS(i)}}{N_{sch}^{max}} \div N_G \quad (4.3)$$

$$P_T^{BS(SS(i))} = \frac{P_{T_{max}}^{BS(SS(i))}}{N_{sch}^{max}(i)} \div N_G \quad (4.4)$$

onde:

- $P_T^{SS(i)}$ – potência de transmissão por subportadora da $SS(i)$ [mW]
- $P_{T_{max}}^{SS(i)}$ – potência de transmissão total máxima da $SS(i)$ [mW]
- N_{sch}^{max} – número máximo de subcanais alocados simultaneamente da $BS(SS(i))$
- $P_T^{BS(SS(i))}$ – potência de transmissão por subportadora da $BS(SS(i))$ para $SS(i)$ [mW]
- $P_{T_{max}}^{BS(SS(i))}$ – potência de transmissão máxima da $BS(SS(i))$ alocada para $SS(i)$ [mW]
- $N_{sch}^{max}(i)$ – número máximo de subcanais alocados simultaneamente para $SS(i)$
- $G_A^{SS(i) \rightarrow BS(SS(i))}$ – ganho de antena de $SS(i)$ na direção de sua BS servidora
- $G_A^{BS(SS(i)) \rightarrow SS(i)}$ – ganho de antena da BS servidora de $SS(i)$ na direção de $SS(i)$
- $G_C^{SS(i)}$ – ganho de canal entre $SS(i)$ e sua BS servidora
- N – potência de ruído Gaussiano branco aditivo relativo a banda do sinal [mW]
- I_j – potência do sinal interferente recebido da $SS(j)$ (UL) ou $BS(j)$ (DL) [mW]
- N_G – número de subportadoras por subcanal

Assumindo que tanto a estação de assinante como a estação rádio base transmitem com igual potência usando antenas omnidirecionais de ganho unitário e que o ganho

de canal inclui apenas a perda de percurso com perfil exponencialmente decrescente referente a um assinante localizado na borda da célula, as Equações 4.1 e 4.2 podem ser simplificadas para Equação 4.5 e 4.6, respectivamente.

$$SINR_{UL}(i) = \frac{P \cdot \beta R^{-\gamma}}{\sum_{BS(SS(j)) \neq BS(SS(i))} P \cdot \beta D_j^{-\gamma} + N} \quad (4.5)$$

$$SINR_{DL}(i) = \frac{P \cdot \beta R^{-\gamma}}{\sum_{BS(j) \neq BS(SS(i))} P \cdot \beta (D_j - R)^{-\gamma} + N} \quad (4.6)$$

onde:

- P – potência transmitida por subportadora de $SS(i)$ (UL) ou $BS(SS(i))$ (DL) [mW]
- D_j – distância de $SS(j)$ para a BS servidora de $SS(i)$ (UL) ou de $BS(j)$ para $SS(i)$ (DL) [m]
- R – raio de célula [m]
- γ – expoente de perda de percurso
- β – coeficiente de perda de percurso

Baseado-se nas Equações 4.5 e 4.6, um critério pode ser definido para classificar a capacidade e cobertura de um sistema celular como limitado pelo ruído/distância ou limitado pela interferência baseando-se na razão $\frac{N}{P}$:

- $\frac{N}{P} \rightarrow 0$, o sistema é limitado pela interferência.
- $\frac{N}{P} \gg \sum_{BS(SS(j)) \neq BS(SS(i))} \beta D_j^{-\gamma}$ e $\frac{N}{P} \gg \sum_{BS(SS(j)) \neq BS(SS(i))} \beta (D_j - R)^{-\gamma}$, o sistema é limitado pelo ruído.

4.1.2.1 - Correção da Interferência no Enlace de Subida

Para facilitar a obtenção da SINR no enlace de subida, coloca-se a SS no centro da célula co-canal interferente e calcula-se o fator de correção no enlace de subida considerando o comportamento não linear da perda de percurso. Esse comportamento faz com que a contribuição de uma SS posicionada perto da célula vítima para aumentar a interferência seja maior que a de uma SS distante para diminuí-la. As Tabelas 4.1

e 4.2 sintetizam para os cenários *line-of-sight*(LOS) e *non-line-of-sight*(NLOS), respectivamente, tais fatores de correção são expressos em termos da porcentagem da interferência obtida considerando-se uma única SS no centro da célula. Esses valores foram obtidos com a metodologia proposta em [35] usando a setorização descrita nas Tabelas 4.2 e 4.3.

A metodologia descrita em [35] é baseada na Equação 4.7 e numa versão modificada do modelo de perda de propagação IST-WINNER [36], expressa com auxílio da Equação 4.8.

$$1 + ulcor = \frac{\overline{P_{R_x}}}{P_{R_x}} = \frac{1}{pl(0,0)} \int_x \int_y \frac{pl(x,y)}{area} dydx \quad (4.7)$$

$$pl(x,y) = \beta \sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2}^{-\gamma} \quad (4.8)$$

$$LOS : \beta = 10^{-2.77} \quad \gamma = 4.2 \quad (4.9)$$

$$NLOS : \beta = 10^{-4.19} \quad \gamma = 2.38 \quad (4.10)$$

$$area = \frac{3}{2} \sqrt{3} R^2 \quad (4.11)$$

onde:

- $\overline{P_{R_x}}$ – potência recebida considerando a potência do transmissor igualmente distribuída por toda a área de superfície da célula [mW]
- P_{R_x} – potência recebida considerando a potência transmitida por um única SS localizada no centro da célula [mW]
- R – raio da célula [m]
- x_0, y_0 – coordenadas do centro da célula vítima [m]
- x, y – coordenadas da SS transmissora [m]
- $ulcor$ – fator de correção do enlace de subida
- γ – expoente de perda de percurso
- β – coeficiente de perda de percurso

4.1.3 - Interferência do Canal Adjacente

A interferência proveniente do canal adjacente resulta de sinais transmitidos nos canais adjacentes ao canal utilizado pelo sinal desejado. Tal interferência é devida principalmente às imperfeições dos filtros de transmissão e recepção (mascara de interferência)

Tabela 4.1 - Correção de interferência no enlace de subida em [%] no cenário LOS de acordo com o tamanho do *cluster* (k) e número de setores por célula (s)

Setores por célula (s)	Tamanho do <i>cluster</i> (k)					
	1	3	4	7	9	12
1	24.87	7.10	5.20	2.90	2.24	1.67
2	-21.50	-7.16	-13.58	-10.12	-9.84	-5.06
3	-41.05	-21.42	-24.30	-18.19	-17.25	-11.80
6	-48.19	-30.58	-30.15	-23.25	-21.88	-17.31

Tabela 4.2 - Correção de interferência no enlace de subida em [%] no cenário LOS de acordo com o tamanho do *cluster* (k) e número de setores por célula (s)

Setores por célula (s)	Tamanho do <i>cluster</i> (k)					
	1	3	4	7	9	12
1	89.64	21.80	15.63	8.53	6.54	4.85
2	-21.99	-4.87	-18.73	-14.46	-14.59	-6.80
3	-57.47	-31.55	-36.74	-28.07	-26.93	-18.46
6	-65.99	-45.38	-44.93	-35.68	-33.81	-27.22

que permitem aos sinais nas frequências próximas entrar na banda passante do receptor. Dado o valor do parâmetro *adjacent channel leakage ratio* (ACLR), as Equações 4.12 e 4.13 permitem o cálculo da interferência do canal adjacente nos enlaces de subida e descida, respectivamente.

$$SINR_{UL}(i) = \frac{P \cdot \beta R^{-\gamma}}{\sum P_j \cdot ACLR(j) \cdot \beta D_j^{-\gamma} + N} \quad (4.12)$$

$$SINR_{DL}(i) = \frac{P \cdot \beta R^{-\gamma}}{\sum P_j \cdot ACLR(j) \cdot \beta (D_j - R)^{-\gamma} + N} \quad (4.13)$$

onde:

$ACLR(j)$ – ACLR do canal usado por $SS(j)$ ou pela $BS(SS(j))$

P – potência de transmissão por subportadora de $SS(i)$ (UL) ou $BS(SS(i))$ (DL) [mW]

P_j – potência de transmissão por subportadora no canal adjacente de $SS(j)$ (UL) ou $BS(SS(j))$ (DL) [mW]

Uplink	Downlink	Cell	x_0	y_0
<p style="text-align: center;">k=1 (i=1, j=0)</p>		1	0	$\sqrt{3}R$
		2	$\frac{3}{2}R$	$\frac{\sqrt{3}}{2}R$
		3	$\frac{3}{2}R$	$\frac{\sqrt{3}}{2}R$
		4	0	$-\sqrt{3}R$
		5	$-\frac{3}{2}R$	$\frac{\sqrt{3}}{2}R$
		6	$-\frac{3}{2}R$	$\frac{\sqrt{3}}{2}R$
<p style="text-align: center;">k=3 (i=1, j=1)</p>		1	$-\frac{3}{2}R$	$\frac{3\sqrt{3}}{2}R$
		2	$\frac{3}{2}R$	$\frac{3\sqrt{3}}{2}R$
		3	$3R$	0
		4	$\frac{3}{2}R$	$-\frac{3\sqrt{3}}{2}R$
		5	$-\frac{3}{2}R$	$\frac{3\sqrt{3}}{2}R$
		6	$-3R$	0
<p style="text-align: center;">k=4 (i=2, j=0)</p>		1	0	$2\sqrt{3}R$
		2	$3R$	$\sqrt{3}R$
		3	$3R$	$-\sqrt{3}R$
		4	0	$-2\sqrt{3}R$
		5	$-3R$	$-\sqrt{3}R$
		6	$-3R$	$\sqrt{3}R$
<p style="text-align: center;">k=7 (i=2, j=1)</p>		1	$-\frac{3}{2}R$	$\frac{5\sqrt{3}}{2}R$
		2	$3R$	$2\sqrt{3}R$
		3	$\frac{9}{2}R$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}R$
		4	$\frac{3}{2}R$	$-\frac{5\sqrt{3}}{2}R$
		5	$-3R$	$-2\sqrt{3}R$
		6	$-\frac{9}{2}R$	$\frac{\sqrt{3}}{2}R$
<p style="text-align: center;">k=9 (i=3, j=0)</p>		1	0	$3\sqrt{3}R$
		2	$\frac{9}{2}R$	$\frac{3\sqrt{3}}{2}R$
		3	$\frac{9}{2}R$	$-\frac{3\sqrt{3}}{2}R$
		4	0	$-3\sqrt{3}R$
		5	$-\frac{9}{2}R$	$\frac{3\sqrt{3}}{2}R$
		6	$-\frac{9}{2}R$	$\frac{3\sqrt{3}}{2}R$
<p style="text-align: center;">k=12 (i=2, j=2)</p>		1	$-3R$	$3\sqrt{3}R$
		2	$3R$	$3\sqrt{3}R$
		3	$6R$	0
		4	$3R$	$-3\sqrt{3}R$
		5	$-3R$	$-3\sqrt{3}R$
		6	$-6R$	0

Figura 4.2 - Disposição das células co-canais interferentes no enlace de subida com um setor por célula de acordo com o tamanho do *cluster* (k).

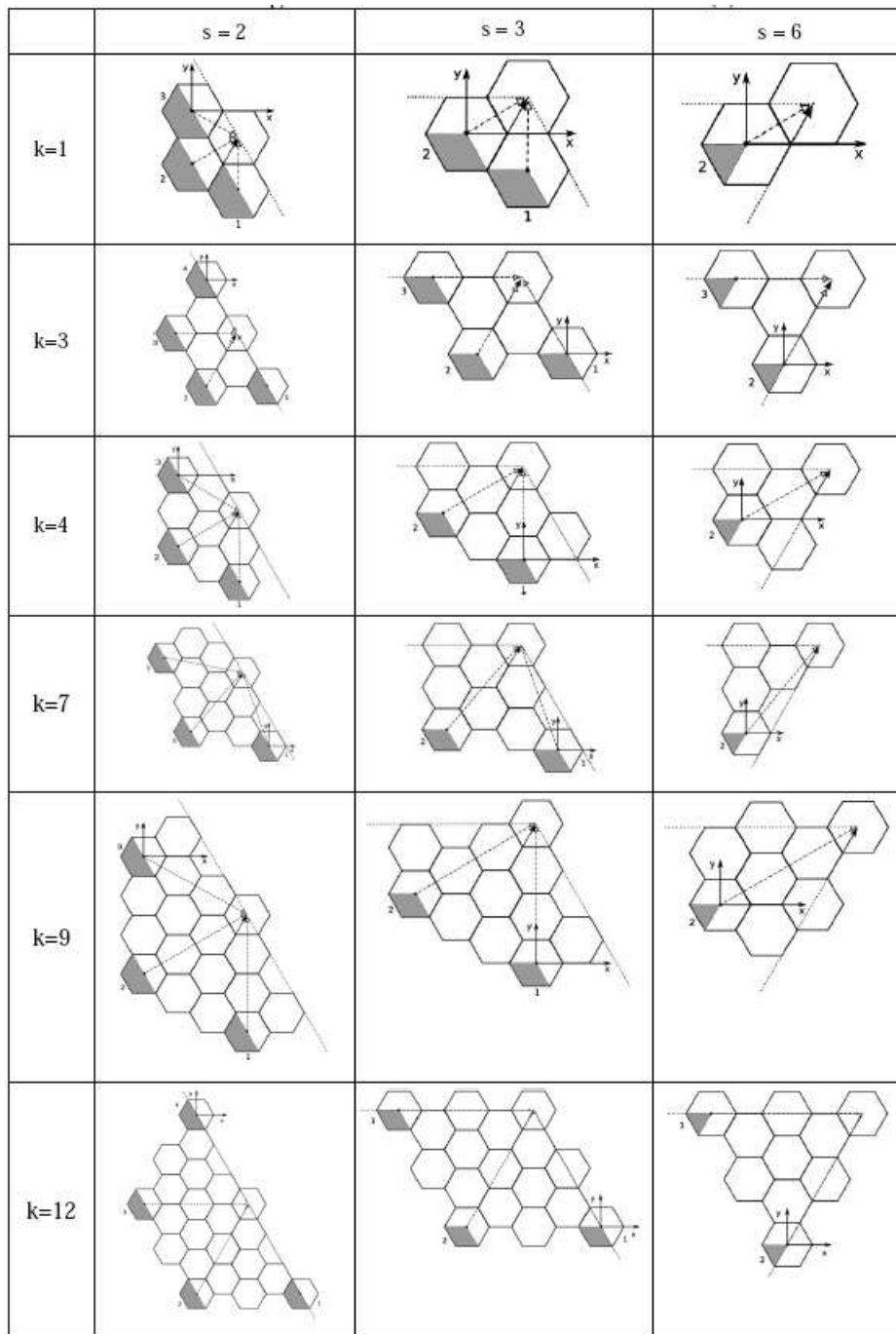


Figura 4.3 - Disposição das células co-canais interferentes no enlace de subida de acordo com o número de setores por célula (s) e o tamanho do *cluster*

4.2 - TÉCNICA DE MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS CELULARES

A interferência é o principal fator limitante da capacidade de um sistema celular. Portanto, várias técnicas de mitigação tem sido desenvolvidas para expansão da capacidade

tais como planejamento de frequência e utilização de antenas múltiplas.

4.2.1 - Planejamento de Frequências

As técnicas para planejamento de frequências consistem de abordagens para mudança da arquitetura celular tais como reuso de frequências e setorização de células usando antenas direcionais. Outras abordagens para planejamento de frequência relevantes são o particionamento de células e a técnica de zoneamento por micro células de Lee [37].

4.2.1.1 - Reuso de Frequência

Reconhecendo a necessidade de aumento da capacidade dos sistemas de acesso sem fio e considerando a escassez de recursos do espectro eletromagnético de radiofrequências, o reuso de espectro de modo que vários usuários adequadamente separados por uma distância possam utilizar a mesma banda de frequências é o principal meio de garantir sua utilização de modo eficiente. Nessa abordagem, os canais rádio são alocados por célula e as bandas de frequências são divididas em grupos e distribuídas pelas células de um *cluster*, que utiliza todo o espectro rádio disponível. A razão para formação de *clusters* é que as células adjacentes não podem utilizar o mesmo espectro de frequência por causa da interferência co-canal.

Considerando que os efeitos da interferência variam com a distância, células que utilizam as mesmas bandas de frequência (células co-canais) devem ser posicionadas tão distantes quanto possível dentro de um *cluster* de determinado tamanho. Essa distância é denominada distância de reuso (D). Considerando um sistema celular constituído por células hexagonais com a estação rádio base central, existe uma relação entre o tamanho do *cluster* (k), a distância de reuso (D) e o raio da célula (R): $D = R\sqrt{3k}$. Os valores de k são da seguinte forma $i^2 + j^2 + ij$, onde i e j são inteiros [35].

Outras técnicas baseadas no reuso tem sido propostas de modo a melhorar a capacidade do sistema celular, tais como particionamento do reuso [38] e reuso fracionário [39].

4.2.1.2 - Setorização de Células usando Antenas Direcionais

Cada célula é coberta por um, dois, três ou seis setores. Todavia, o cálculo de interferência para fins de planejamento deve normalmente considerar apenas a primeira camada de seis, três, duas e uma célula co-canal interferente [35], respectivamente. Num sistema celular limitado pela interferência, a estratégia de reuso deve permitir o aumento da SINR na célula vítima.

4.2.2 - Antenas Múltiplas

A utilização da técnica de antenas múltiplas pode melhorar ainda mais o desempenho de um sistema de comunicações sem fio devido a(o):

- aumento da confiabilidade ou diminuição da potência de transmissão necessária devida ao ganho de diversidade espacial (criação de múltiplos canais paralelos para envio de fluxos de dados codificados dependentes);
- diminuição da interferência entre seus nós (beamforming);
- aumento da taxa de transmissão de dados devido a multiplexação espacial (criação de múltiplos canais paralelos para envio de fluxos de dados independentes).

4.3 - MODELOS DE CANAL

Quando a onda eletromagnética portando a informação propaga-se entre as antenas transmissora e receptora, várias características e obstáculos do meio de propagação expõem-na a efeitos de reflexão, espalhamento e difração. Dessa forma, a onda recebida corresponde à composição de várias cópias da onda original chegando de diferentes direções (multipercurso) e/ou com sua energia reduzida devido a distância entre o transmissor e receptor (perda de percurso) bem como a localização relativa do receptor (sombreamento). Portanto, o modelo de canal possui três componentes: perda de percurso, multipercurso e sombreamento. Geralmente, esses componentes são aleatórios

e caracterizados por estatísticas de primeira e segunda ordem, média e variância, respectivamente.

4.4 - MODELOS DE PERDA DE PERCURSO

Vários modelos de perda de percurso podem ser utilizados para calcular o nível de sinal recebido [40] [36] [41]. O modelo ITU-R P.1546 especificado em [41] é válido apenas para distâncias variando de 1km a 1000 km e, portanto, útil apenas para grandes células. Dependendo do modelo adotado e da arquitetura celular, uma distribuição diferente de modos de codificação e modulação (MCS) pode ser obtida.

4.5 - MODELO DE SOMBREAMENTO

No caso de haver quaisquer objetos, tais como construções e árvores, ao longo do percurso do sinal, parte de sua energia é perdida por absorção, reflexão, espalhamento e difração. Esse efeito é chamado sombreamento. Como resultado do sombreamento, as potências recebidas em pontos que estão a mesma distância do transmissor podem ser diferentes. Os valores dessas potências podem ser modelados por uma distribuição lognormal e, por isso, esse fenômeno é referenciado com sombreamento lognormal.

4.6 - MODELO DE MULTIPERCURSO

Há dois modelos de multipercurso que dependem da existência ou não de percurso direto: Rice e Rayleigh. O modelo de Rice é utilizado para recepção fixa LOS e o de Rayleigh para recepção móvel e portátil NLOS [42] [43] [26].

4.7 - MODELO DE SISTEMA

O modelo de sistema utilizado considera uma arquitetura de rede celular baseada numa camada física OFDMA. Dessa forma, o sistema consiste de um reticulado de células hexagonais com a estação base localizada no centro da célula. Cada célula é coberta

por um, dois, três ou seis setores onde apenas o primeiro nível (*tier*), geralmente formado por seis, três, duas ou uma célula(s) co-canal interferente(s), respectivamente, é considerado no cálculo da interferência co-canal [35].

Para aplicações móveis, ambos os padrões WiMAX e DVB-RCT definiram o modo DSP para atribuir subportadoras a subcanais. Nesse modo, cada subcanal é igualmente adequado a todo e qualquer assinante pois é composto de subportadoras aleatoriamente distribuídas por toda banda do canal (diversidade em frequência) [44].

Para aplicações fixas, nomádicas e de pequena mobilidade, o padrão WiMAX definiu o modo ASP onde os subcanais são constituídos de subportadoras contíguas (adjacentes entre si). Tais subcanais permitem obter ganhos de diversidade multi-usuários por intermédio da *Adaptive Modulation and Coding* (AMC) baseada na estimação da resposta do canal [26].

Uma rede celular baseada no OFDMA usando alternadamente os modos DSP e ASP é ilustrada na Figura 4.4. No caso do modo DSP, a interferência foi igualmente distribuída entre os subcanais de subida para BS_1 devido a uma atribuição específica de subportadoras que gerou duas colisões de subportadoras por subcanal. Deste modo, o subcanal 1 alocado ao assinante SS_1 de BS_1 possui duas subportadoras interferidas. No caso do modo ASP, provavelmente usando alguma política de coordenação de interferência entre células [45], o subcanal 1 não possui nenhuma subportadora interferida. Apenas o modo DSP é considerado neste trabalho.

4.8 - MODELO DE COLISÃO ENTRE SUBPORTADORAS

O número de subportadoras interferidas por subcanal da célula vítima é igual ao número de subportadoras com ao menos uma colisão com subportadora usada em células co-canais. Tal interferência é distribuída dentro de cada *slot* porque os dados provenientes das subportadoras com pequena relação SINR são corrigidos devido ao entrelaçamento e codificação para correção de erros. O impacto dessa interferência na capacidade do *slot* dependerá de seu perfil físico (modulação e taxa de código) e da SINR por subportadora interferida [34].

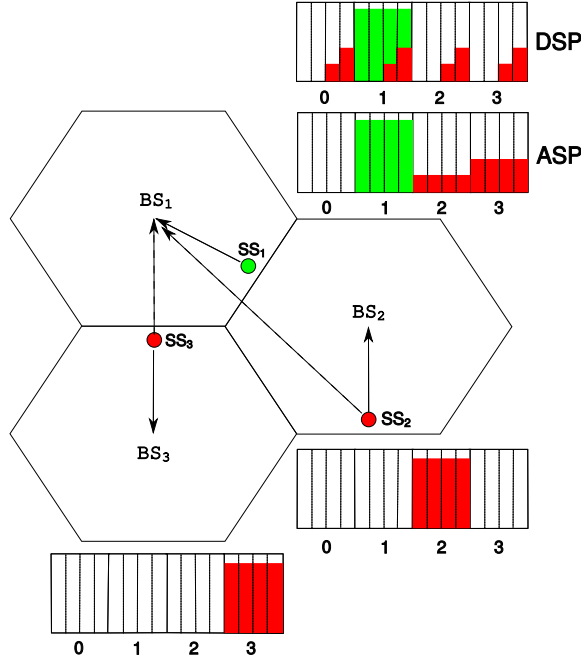


Figura 4.4 - Modos de atribuição de subportadoras numa rede celular baseada na tecnologia OFDMA

A atribuição de subportadoras a subcanais é realizada utilizando o seguinte algoritmo. Primeiramente, as N_{used} subportadoras disponíveis são divididas em N_G grupos com $N_{subchan}$ subportadoras cada. Então, uma subportadora de cada grupo é aleatoriamente selecionada para compor um subcanal. O último passo é repetido até que todos subcanais $N_{subchan}$ sejam obtidos, conforme mostrado na Figura 4.5. Outra célula co-canal irá executar o mesmo algoritmo mas de modo estatisticamente independente, baseada em parâmetros de permutação de subida específicos.

Seja K uma variável aleatória descrevendo o número em estado estacionário de subportadoras interferidas por subcanal na célula vítima de uma rede celular OFDMA e L a carga, expressa como o número esperado em estado estacionário de subcanais usados na(s) célula(s) co-canal(is) interferentes. O Lema 1 expressa a função massa de probabilidade de K para uma rede de uma célula co-canal enquanto que o Lema 2 generalisa o resultado para rede de várias células co-canal interferentes.

Lema 1. *Seja $p_1^l(k|c)$ a probabilidade de ocorrência de k colisões por subcanal, dado a ocorrência de c colisões nos l subcanais previamente escolhidos, $A^L(k)$ seja o conjunto de partições aditivas de k com L termos inteiros não negativos cuja cardinalidade é dada pela permutação com repetição $P_{L+k-1}^{(L-1),k}$ e $u[n]$ a função degrau unitária discreta*

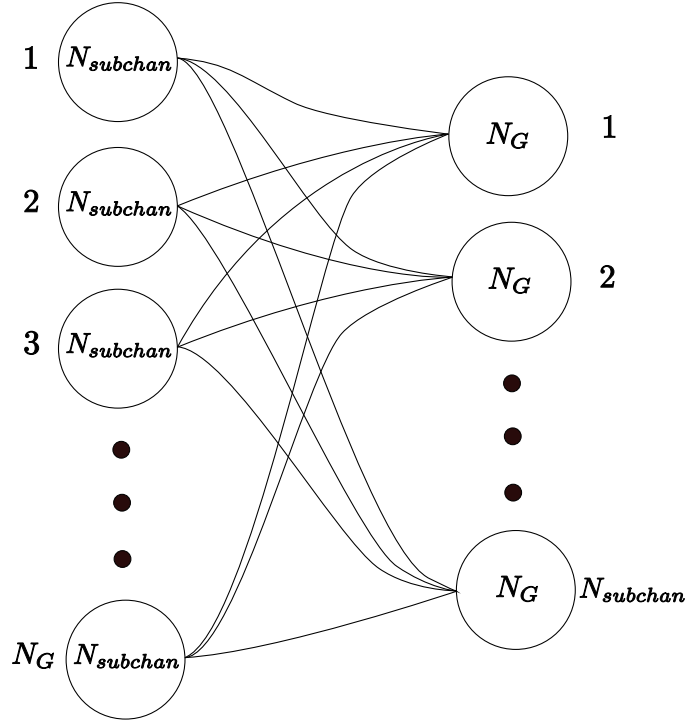


Figura 4.5 - Atribuição de subportadoras a subcanais por intermédio de processo aleatório baseado em permutações.

com $u[n] = 1$ para $n \geq 0$, e zero para outros valores de n . Portanto, a probabilidade de colisão em k de N_G subportadoras por subcanal é dada por:

$$P_1^L(k) = \sum_{\substack{A^L(k) \\ 0 < L < N_{sch}}} \left\{ \prod_{l=0}^{L-1} p_1^l \left[k_l \mid \left(\sum_{i=0}^{l-1} k_i \right) u[l-1] \right] \right\} \quad (4.14)$$

onde:

$$p_1^l(k|c) = \binom{N_G - c}{k} \left(\frac{1}{N_{sch} - l} \right)^k \left(1 - \frac{1}{N_{sch} - l} \right)^{N_G - c - k} \quad (4.15)$$

Prova: Primeiramente, assuma que a célula co-canal interferente possui carga $L = 1$. Portanto, $c = 0$ e $|A^1(k)| = 1$. Então, tanto a célula vítima com a interferente executam o algoritmo de atribuição de subportadora. A probabilidade de que a célula interferente escolha a mesma subportadora por grupo é $(1/N_{subchan})$. Em virtude das escolhas serem mutuamente independentes, a probabilidade de escolher k subportadoras idênticas por subcanal é $\left(\frac{1}{N_{subchan}} \right)^k \left(1 - \frac{1}{N_{subchan}} \right)^{N_G - k}$ vezes o número de diferentes maneiras que cada escolha pode ser feita, $\binom{N_G}{k}$. Como as partições aditivas para k colisões são unitárias, o somatório não é necessário e o Lema segue.

Um raciocínio semelhante se aplica quando $L \geq 2$ exceto que, nesse caso, as colisões em k subportadoras são geradas por qualquer combinação de L subcanais utilizados na célula co-canal. Essas combinações são enumeradas pelas partições aditivas de k com L termos. Em virtude das partições aditivas não possuírem nenhuma saída em comum, pois cada uma corresponde a um número de colisões diferente, elas são mutuamente exclusivas e o somatório é necessário. Adicionalmente, observando que cada subportadora pode ser escolhida apenas uma vez por célula, cada colisão elimina um grupo do conjunto de grupos que podem originar novas colisões. Portanto, o número de diferentes maneiras em que cada escolha pode ser feita será $\binom{N_G - c}{k}$ e o Lema 1 segue. \square

Lema 2. *Seja $M \geq 2$ o número de células co-canal e $k' = k - i$ o número de novas colisões geradas pela M -ésima célula co-canal adicionada ao sistema. A probabilidade de colisões em k subportadoras por subcanal é recursivamente dada por:*

$$P_M^L(k) = \sum_{i=0}^k P_{M-1}^L(i) \times \Lambda_1^L(k'|i) \quad (4.16)$$

onde:

$$\Lambda_1^L(k'|i) = \sum_{\substack{A^L(k') \\ 0 < L < N_{sch}}} \left\{ \prod_{l=0}^{L-1} \lambda_1^l \left[k'_l \mid \left(\sum_{i=0}^{l-1} k'_i \right) u[l-1], i \right] \right\} \quad (4.17)$$

$$\lambda_1^l(k'|c, i) = \binom{N_G - i - c}{k'} \left(\frac{1}{N_{sch} - l} \right)^{k'} \left(1 - \frac{1}{N_{sch} - l} \right)^{N_G - i - c - k'} \quad (4.18)$$

Proof. Sempre que a M -ésima célula co-canal for adicionada à rede celular, colisões adicionais podem ser geradas. Essas colisões podem complementar ou não aquelas já geradas pelas $M - 1$ células co-canais. Portanto, a probabilidade de k colisões por subcanal da célula vítima é dada pelo somatório dos produtos da probabilidade de colisão relativos às partições aditivas de k com 2 termos. Para $i = 0$, $k' = k$ e $\Lambda_1^L(k', i) = P_1^L(k)$ é dado pelo Lema 1. Para $i = k$, $k' = 0$ e $\Lambda_1^L(k', i) = 1$ pois nenhuma nova colisão pode ser produzida pela M -ésima célula co-canal. Entre esse dois valores extremos, cada colisão elimina um grupo do conjunto de grupos que podem originar novas colisões. Portanto, o número de diferentes maneiras que cada escolha pode ser feita torna-se $\binom{N_G - i - c}{k'}$ e o Lema segue. \square

Utilizando os dois Lemas apresentados, o valor esperado do número de subportadoras interferidas por subcanal é dado por $E[K] = \sum_{k=0}^{N_G} k P_M^L(k)$. A razão $N_G/E[K]$ é equivalente ao ganho de processamento de um sistema *frequency hopping spread spectrum* (FHSS) usando uma seqüência de conjunto de salto de tamanho N_G das quais $E[K]$ frequências foram bloqueadas [28] [46].

4.8.1 - Exemplo Numérico

Esta seção apresenta um exemplo numérico simples mostrando a aplicação dos Lemas 1 e 2. O sistema celular analisado nesse exemplo é constituído por duas células co-canais, denominadas de vítima e interferente. Cada célula possui três subcanais com duas subportadoras por subcanal, ou seja, $N_{sch} = 3$ e $N_G = 2$.

As árvores contendo as possíveis combinações de atribuições de subportadoras por subcanal em cada uma das células foram ilustradas na Figura 4.6. Cada subcanal corresponde a um percurso começando na raiz da árvore e terminando numa folha. Em cada um dos N_G níveis da árvore, apenas uma subportadora pode ser escolhida até que N_{sch} percursos tenham sido selecionados.

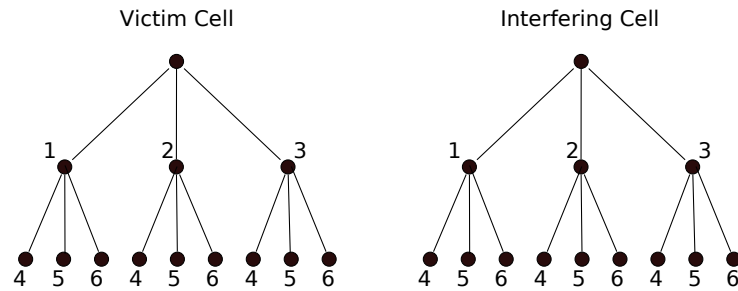


Figura 4.6 - Árvores das atribuições de subportadoras por subcanal nas células vítima e interferente

Para $L = 1$ e $L = 2$:

$$\begin{aligned} P_1^1(0) &= p_1^0(0|0) = \binom{2}{0} \left(\frac{1}{3}\right)^0 \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{4}{9} \\ P_1^1(1) &= p_1^0(1|0) = \binom{2}{1} \left(\frac{1}{3}\right)^1 \left(\frac{2}{3}\right)^1 = \frac{4}{9} \\ P_1^1(2) &= p_1^0(2|0) = \binom{2}{2} \left(\frac{1}{3}\right)^2 \left(\frac{2}{3}\right)^0 = \frac{1}{9} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_1^2(0) &= p_1^0(0|0)p_1^1(0|0) = \frac{1}{9} \\ P_1^2(1) &= p_1^0(0|0)p_1^1(1|0) + p_1^0(1|0)p_1^1(0|1) = \frac{4}{9} \\ P_1^2(2) &= p_1^0(0|0)p_1^1(2|0) + p_1^0(1|0)p_1^1(1|1) + p_1^0(2|0)p_1^1(0|2) = \frac{4}{9} \end{aligned}$$

Pode-se observar que para $k = 1$, as colisões podem ocorrer de $\binom{2}{1}$ maneiras correspondendo às diferentes combinações de níveis da árvore.

Caso uma nova célula interferente fosse incorporada ao sistema, colisões adicionais seriam geradas com uma probabilidade que iria depender do número de colisões que já tivessem ocorrido no sistema anterior. Para $L = 1$:

$$\begin{aligned} P_2^1(0) &= P_1^1(0)\Lambda_1^1(0|0) = \frac{16}{81} \\ P_2^1(1) &= P_1^1(0)\Lambda_1^1(1|0) + P_1^1(1)\Lambda_1^1(0|1) = \frac{40}{81} \\ P_2^1(2) &= P_1^1(0)\Lambda_1^1(2|0) + P_1^1(1)\Lambda_1^1(1|1) + P_1^1(2)\Lambda_1^1(0|2) = \frac{25}{81} \end{aligned}$$

Para $L = 2$:

$$\begin{aligned} P_2^2(0) &= P_1^2(0)\Lambda_1^2(0|0) = \frac{1}{81} \\ P_2^2(1) &= P_1^2(0)\Lambda_1^2(1|0) + P_1^2(1)\Lambda_1^2(0|1) = \frac{16}{81} \\ P_2^2(2) &= P_1^2(0)\Lambda_1^2(2|0) + P_1^2(1)\Lambda_1^2(1|1) + P_1^2(2)\Lambda_1^2(0|2) = \frac{64}{81} \end{aligned}$$

4.8.2 - Ganho de Processamento

Nesta seção, o ganho de processamento de um sistema celular baseado na tecnologia OFDMA e utilizando o modo DSP de permutação de subportadora é calculado. Da Figura 4.7, pode-se observar que tal ganho depende do número de setores e da carga nas células co-canal interferentes. Independentemente do número de setores por célula, todas as curvas convergem para ganho de processamento zero quando a carga

se aproxima de um. De modo a validar os resultados obtidos, é possível observar na Figura 4.7 que um sistema com seis setores por célula e metade dos subcanais utilizados teria um ganho de processamento de 3 dB. Esse resultado corresponde ao que seria esperado numa análise suscinta pois metade das subportadoras de um subcanal na célula vítima estariam em uso na célula co-canal interferente. Os demais pontos obtidos com utilização do modelo proposto foram validados por simulação (não apresentada).

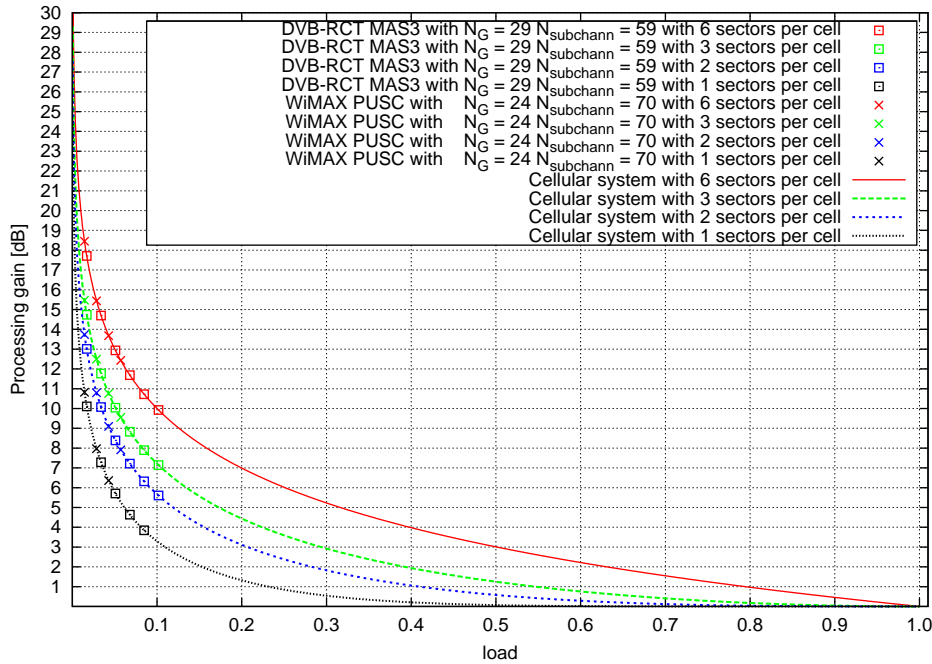


Figura 4.7 - Ganho de processamento de um sistema celular baseado na tecnologia OFDMA.

Valores de ganho de processamento específicos para o número (N_{sch}) e tamanho (N_G) de subcanais definidos nos padrões DVB-RCT e WiMAX móvel, sintetizados na Tabela 4.3, também foram obtidos e incluídos na Figura 4.7. Pode-se observar que a camada física OFDMA do padrão DVB-RCT provê um ganho de concentração maior que a do padrão WiMAX e, portanto, necessita de uma potência de transmissão menor para operação NLOS dentro de casa.

4.9 - MODELO DE INTERFERÊNCIA ANALÍTICO

A SINR média por subcanal pode ser calculada usando as Equações 4.19 e 4.20.

Tabela 4.3 - Valores de N_{FFT} , N_G e N_{sch} , de acordo com o padrão

Padrão DVB-RCT						
N_{FFT}	MAS1		MAS2		MAS3	
	N_G	N_{sch}	N_G	N_{sch}	N_G	N_{sch}
1024	1	840	4	210	29	29
2048		1708		427		59
Padrão WiMAX						
N_{FFT}	N_G	N_{sch}	N_G	N_{sch}		
128	18	6	24	24	4	
512		24			17	
1024		48			35	
2048		96			70	
N_{FFT} = tamanho da transformada de Fourier						
N_G = número de subportadoras por subcanal						
N_{sch} = número de subcanais						

$$SINR_M^L = \sum_{k=0}^{N_G} SINR_M^{sch}(k) \cdot P_M^L(k) \quad (4.19)$$

$$SINR_M^{sch}(k) = \frac{(N_G - k) \cdot SNR^{sca} + k \cdot SINR_M^{sca}(k)}{N_G} \quad (4.20)$$

onde:

$SINR_M^{sch}(k)$ – SINR média por subcanal para M células co-canais e k colisões

SNR^{sca} – SNR de uma subportadora não interferida (sem colisão)

$SINR_M^{sca}(k)$ – SINR média por subportadora para M células co-canais e k colisões

A formula para calcular a SINR média depende do número de colisões (k) e do número de células co-canais interferentes (M). Para $k = 0$, $SINR_M^{sca}(k) = SNR^{sca}$ e $SNR^{sca} = S/N$. Para $k = 1$, a $SINR$ pode ser expressa usando a expansão binomial na qual cada fator produto representa um célula que aleatoriamente escolhe uma subportadora de um conjunto com cardinalidade N_{sch} [47]. A probabilidade de escolher exatamente a mesma subportadora é $\frac{1}{N_{sch}}$.

$$(x + 1)^M = \binom{M}{0} + \binom{M}{1}x + \binom{M}{2}x^2 + \dots + \binom{M}{i}x^i + \dots + \binom{M}{M}x^M \quad (4.21)$$

A probabilidade condicional de ocorrer i colisões ($i \geq 1$) é dada pela Equação 4.22 que corresponde à razão entre a probabilidade binomial e a probabilidade total da

ocorrência de ao menos uma colisão. O valor esperado de $SINR_M^{sca}(1)$ é dado pela Equação 4.23.

$$Q_i(M) = \frac{\binom{M}{i} p^i (1-p)^{M-i}}{\sum_{i=1}^M \binom{M}{i} p^i (1-p)^{M-i}} = \frac{\binom{M}{i} p^i (1-p)^{M-i}}{1 - (1-p)^M} \quad (4.22)$$

$$SINR_M^{sca}(1) = \sum_{i=1}^M Q_i(M) \cdot \frac{S}{i \cdot I + N} \quad (4.23)$$

Para $k \geq 1$, a expansão binomial tem a forma da Equação 4.24 onde os termos produto são independentes.

$$[(x+1)^M]^k = \underbrace{(x+1)^M \cdot (x+1)^M \cdots (x+1)^M}_{k \text{ factors}} \quad (4.24)$$

O valor esperado de $SINR_M^{sca}(k)$ é dado pela Equação 4.25. A dupla soma é realizada para todas as partições aditivas $A^{M \cdot k - i - k}(k) | \forall k_i < M$, que representam os termos aditivos obtidos após a multiplicação de k fatores com ao menos uma colisão por fator. Em virtude das escolhas de subportadoras serem independentes entre células co-canais interferentes, o produto da probabilidade $Q_{k_j+1}(M)$ segue. Tal probabilidade deve ser multiplicada pelo valor médio de $SINR$ sobre k subportadoras.

$$SINR_M^{sca}(k) = \sum_{i=0}^{M \cdot k - k} \sum_{A^{M \cdot k - i - k}(k) | \forall k_i < M} \left(\prod_{j=0}^{k-1} Q_{k_j+1}(M) \cdot \sum_{j=0}^{k-1} \frac{S}{((k_j + 1) \cdot I + N) \cdot k} \right) \quad (4.25)$$

4.9.1 - Exemplo Numérico

Nesta seção, um exemplo numérico será apresentado de modo a ilustrar a utilização dos modelos previamente propostos para cálculo da capacidade e dimensionamento de um sistema celular baseado na tecnologia OFDMA. Durante a apresentação do exemplo, outros conceitos e formulações serão apresentados quando necessários.

Para esse exemplo, uma importante característica da camada física OFDMA do padrão IEEE 802.16e [1], WiMAX móvel, é que o espaçamento entre subportadoras foi fixado em 10,94 kHz. Tal escolha de projeto provê um bom balanço entre alcance e mobilidade considerando os valores típicos de espalhamento de retardos e espalhamento Doppler encontrados em ambientes fixos e móveis. O emprego de espaçamento entre subportadoras fixo implica a escalabilidade do tamanho da FFT de 128 até 2048 sempre que a banda do canal disponível aumentar de 1,25MHz até 20 MHz, respectivamente. Adicionalmente, o espaçamento fixo entre subportadoras mantém a duração do símbolo OFDM constante, minimizando, por conseguinte, o impacto da granularidade temporal da alocação de recursos na camada de aplicação. O padrão WiMAX móvel também oferece uma grande variedade de intervalos de guarda permitindo ao projetistas do sistema realizar uma escolha apropriada entre eficiência espectral e robustez ao espalhamento de retardo.

Os parâmetros do balanço de enlace do WiMAX móvel serão discutidos a seguir. A maior parte dos valores de parâmetros foram obtidos de [48] considerando as tecnologias atualmente disponíveis. Os demais valores de parâmetros foram obtidos do padrão WiMAX.

4.9.1.1 - Especificações da Estação Base e Estação de Assinante

Várias características da estação rádio base e do terminal relacionadas ao dimensionamento de sistemas celulares são discutidas nessa seção. Há três perfis de BS e dois de SS que foram resumidos nas Tabelas 4.4 e 4.5. Alguns parâmetros não foram levados em consideração tais como alimentador, duplexador e perdas em cabos. Apenas o perfil de BS padrão e o perfil de SS móvel foram considerados nas simulações.

4.9.1.2 - Sensibilidade de Receptor

A Equação 4.26 é usada para definir a mínimo nível de sensibilidade de receptor $P_{R_{min}}$ considerando apenas a potência nas subportadoras de dados. Se a repetição de dados for usada, a banda do canal deve ser dividida pelo número de repetições R .

Tabela 4.4 - Valores dos parâmetros nos enlaces de subida e descida da estação rádio base de acordo com seu perfil

Especificação	Perfil da Estação Radio Base		
	Padrão	MIMO 2x2	MIMO 2x2 AAS
Potência de tx no enlace de descida [dBm]	35	35	35
Ganho de antena de tx no enlace de descida [dBi]	16	16	16
Ganho de diversidade de tx no enlace de descida [dB]	0	9	9
Ganho de antena adaptativa de tx no enlace de descida [dB]	0	0	6
Ganho de antena de rx no enlace de subida [dBi]	16	16	16
Ganho de diversidade de rx no enlace de subida [dB]	0	3	3
Ganho de antena adaptativa de rx no enlace de subida [dB]	0	0	3
Figura de ruído de rx no enlace de subida [dB]	5	5	5

Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros dos enlaces de subida e descida da estação de assinante de acordo com seu perfil

Especificação	Perfil da estação de assinante	
	Portátil/Nômade	Móvel
Potência de tx no enlace de subida [dBm]	27	27
Ganho de antena de tx no enlace de subida [dBi]	6	0
Ganho de antena de rx no enlace de descida [dBi]	6	0
figura de ruído de rx no enlace de descida [dB]	7	7

$$P_{R_{min}} = \underbrace{NF + 10\log_{10}(kT_0B) + 30}_{P_N} + L_{impl} + SINR \quad (4.26)$$

onde:

- P_N – potência de ruído na saída do receptor [dBm]
- NF – figura de ruído do receptor [dB]
- k – constante de Boltzmann ($1.3806504 \times 10^{-23} \text{ W s/K}$)
- T_0 – temperatura absoluta (290K)
- B – banda [Hz]
- L_{impl} – perda de implementação [dB] (2dB)

Para dimensionamento de um sistema celular, os valores mínimos de SINR recebidos, tanto a partir de uma SS como numa SS localizada na borda da célula, devem ser conhecidos. A Tabela 4.6 sintetiza os valores de SINR obtidos por simulação num canal Gaussiano com ruído branco aditivo (AWGN) com taxa de erro de bit (BER) de 10^{-6} utilizando dois códigos corretores de erro avante (FEC) diferentes. A simulação adotou os valores referentes ao código convolucional.

Tabela 4.6 - Valores de SINR em dB de acordo com o código FEC e o MCS utilizado [1]

Esquema de modulação e codificação (MCS)	Código FEC	
	Código convolucional	Código turbo
QPSK 1/2	5	2.5
QPSK 3/4	8	6.3
16QAM 1/2	10.5	8.6
16QAM 3/4	14	12.7
64QAM 1/2	16	13.8
64QAM 2/3	18	16.9
64QAM 3/4	20	18

O MCS usado por cada SS irá depender de sua posição relativa a sua BS e às BS/SS interferentes. Como a SINR decresce com a distância entre a SS e a BS, o MCS mais robusto será usado na borda da célula.

A perda de implementação inclui os efeitos de um receptor não ideal tais como erros de estimação de canal, vazamento de canal adjacente, ruído de fase, etc. O valor adotado no padrão WiMAX móvel é 5 dB. Dentro do padrão WiMAX móvel, quatro parâmetros primitivos são usados para definir um símbolo OFDMA: a banda de canal nominal B_{nom} , o número de subportadoras utilizadas N_{used} , o fator de amostragem n e a razão G entre o tempo de guarda T_g e o tempo útil de símbolo T_u .

O fator de amostragem depende da banda de canal nominal. Seu valor é 28/25 para bandas de canal múltiplas de 1,25/1,5/2 ou 2,75 MHz e 8/7 para bandas de canal que são múltiplas de 1,75 MHz ou outras não especificadas. Os resultados de simulação são referentes a uma banda de 1,25 MHz tanto no enlace de subida como de descida. O tempo de guarda de 1/8 e um quadro com duração de 5 ms foram utilizados. O espaçamento entre subportadoras é dado por $\frac{F_s}{N_{FFT}}$ onde N_{FFT} é o tamanho da Transformada de Fourier e F_s é a frequência de amostragem em MHz dada pela Equação 4.27.

$$F_s = \frac{\lfloor \frac{n \times B_{nom}}{8000} \rfloor}{10^6} \quad (4.27)$$

onde:

$$\begin{aligned} n & \quad - \text{fator de amostragem} \\ B_{nom} & \quad - \text{banda nominal [MHz]} \end{aligned}$$

4.9.1.3 - Margens

Para calcular o balanço de enlace várias margens podem ser consideradas tais como margem de desvanecimento, margem de interferência e margem do fator de correção de localização. A margem de interferência para sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA é dependente da carga [49]. As simulações não consideraram nenhuma margem.

4.9.1.4 - Máximo Raio de Célula

Em virtude da BS sempre dispor de maiores recursos de transmissão no enlace de descida para alcançar as SS dentro de sua área de cobertura, apenas a direção do enlace de subida foi considerada para dimensionamento do sistema celular. O mesmo modelo de interferência usado no enlace de subida pode ser aplicado ao enlace de descida. A correção de interferência no enlace de subida foi considerada nas simulações.

O raio máximo de célula foi obtido para a SS mais distante localizada na borda da célula usando o balanço de enlace expresso pela Equação 4.28. O modelo de perda de percurso utilizado foi o IST-WINNER [36].

$$SINR = P_t + G_c - (P_N + L) \quad (4.28)$$

onde:

$$\begin{aligned} P_t & \quad - \text{potência de transmissão [dBm]} \\ G_c & \quad - \text{ganho de concentração [dB]} \\ L & \quad - \text{perda de percurso [dB]} \end{aligned}$$

Segundo a Equação 4.19, a SINR depende da carga e do número de células co-canais interferentes. Os valores dos parâmetros P_t , G_c e P_N devem considerar a potência por

subportadora obtida após dividir-se a potência máxima de transmissão pelo número máximo de subcanais simultaneamente alocáveis por assinante.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram a SINR no enlace de subida relativa a uma SS localizada na borda da célula de um sistema celular com um setor por célula, de acordo com o cenário de propagação, a carga na célula co-canal, a ordem do *cluster* e o raio da célula sem e com ganho de concentração, respectivamente. Pode-se observar que sempre que a carga aumenta, o raio máximo de célula diminui devido ao aumento da interferência co-canal na célula vítima. Adicionalmente, estudando a influência do ganho de concentração no raio máximo da célula, observa-se que o aumento do ganho de concentração causa um aumento no raio máximo de célula também. No primeiro caso, a distribuição dos MCS permanece a mesma; no segundo caso, há um aumento percentual do modo mais robusto, QPSK 1/2 (não mostrado).

As Figuras 4.8(b), 4.8(c), 4.9(b) e 4.9(c) mostram que o *cluster* de ordem um não permite obter uma SINR suficiente quando a carga de célula co-canal é 50% ou 75%. Observar-se também que em ambos cenários, LOS e NLOS, a diferença entre a potência da interferência e do ruído é tão pequena que há pouca variação no raio máximo de célula para *cluster* de ordem maior que um. Portanto, o sistema é limitado por ruído para *cluster* de ordem maior que três e limitado por interferência para *cluster* de ordem um e três. Foi observado também que não há diferença significativa na variação da SINR com o raio de célula e tamanho do *cluster* entre sistemas celulares cujas células co-canais interferentes estejam carregadas com 75% e 100% da capacidade (não mostrada). Observe-se uma carga de 100% corresponde a um sistema OFDM totalmente utilizado.

4.9.1.5 - Capacidade da Célula

Depois de calcular o raio de célula máximo, a distribuição dos SINR dentro da área de cobertura da célula pode ser obtida variando a posição da SS. As Figuras 4.10 e 4.11 ilustram a distribuição de SINR dentro da célula vítima com carga de 25% nas células co-canais interferentes. Tal distribuição permanece quase a mesma independentemente da carga nas células co-canais.

Com base na distribuição de SINR, obtem-se a porcentagem de *slots* por quadro de transmissão que usam determinado MCS. A capacidade média por célula é calculada pela média ponderada da taxa de transmissão de dados de cada MCS. Os pesos correspondem aos número de *slots* utilizando determinado MCS apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valores dos parâmetros para cálculo da capacidade de um quadro de 5 ms com 72 subportadoras de dados agrupadas em quatro subcanais e duração de 48 símbolos OFDM

Especificação do parâmetro	Perfil MCS						
	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 1/2	64QAM 2/3	64QAM 3/4
Porcentagem LOS	29.70	25.25	21.75	7.47	5.08	3.44	7.30
Porcentagem NLOS	7.20	21.19	22.04	9.49	7.89	6.59	25.56
Bits por subportadora	1	1.5	2	3	3	4	4.5
Taxa de bits de dados [kbps]	691,2	1036,8	1382,4	2073,6	2073,6	2764,8	3110,4
Número de <i>slots</i> LOS	58	49	42	15	10	7	11
Número de <i>slots</i> NLOS	14	41	43	19	16	13	46

Por intermédio da média ponderada, foram obtidas as taxas de transmissão de dados médias por setor celular de 1.350.155,52 bps e 1.911.755,52 bps para os cenários LOS e NLOS, respectivamente. Dividindo-se esses valores pela banda nominal da célula, obtiveram-se as eficiências espectrais de 1,08 bit/s/Hz e 1,53 bit/s/Hz para os cenários LOS e NLO, respectivamente. Esses resultados são similares aos obtidos em [50] na direção do enlace de subida.

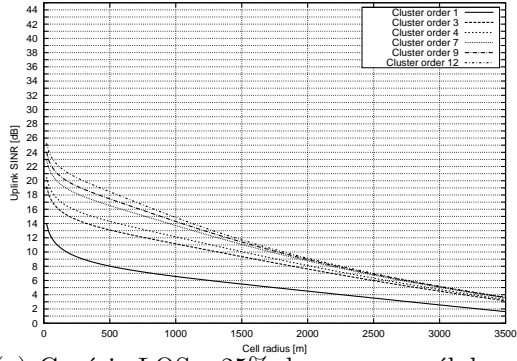
4.10 - CONCLUSÃO

Esse Capítulo apresentou conceitos básicos relacionados a sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA. Utilizando esses conceitos, foi proposto um modelo de interferência analítico para o modo DSP de atribuição de subportadoras a subcanais. Esse modelo foi usado para calcular a SINR no enlace de subida, mas também pode ser utilizado para o cálculo da SINR no enlace de descida.

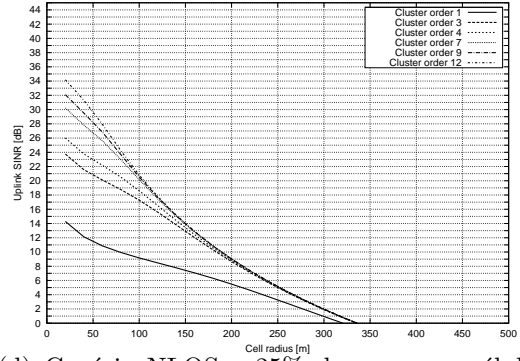
Um exemplo de utilização do modelo de interferência para o dimensionamento e determinação da capacidade de um sistema de acesso baseado no padrão WiMAX móvel foi apresentado. A arquitetura celular utilizada era constituída por *clusters* de vários tamanhos e a influência do ganho de concentração na capacidade foi avaliada. Os re-

sultados obtidos indicam que, dependendo dos parâmetros da arquitetura celular, há situações nas quais a capacidade e cobertura do sistema são limitadas pelo ruído ou interferência.

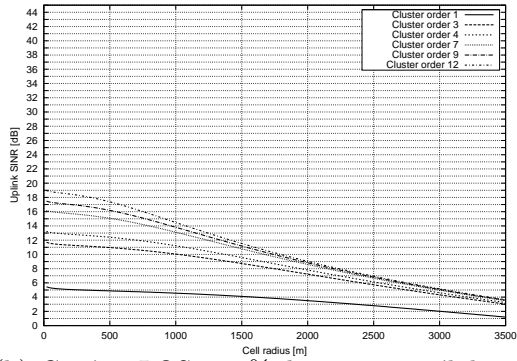
Além da aplicação apresentada, o modelo de interferência pode ser utilizado tanto para calcular a probabilidade de que a interferência média por subportadora seja igual a zero [34] como para determinar a razão entre as cardinalidades do conjunto de subportadoras utilizadas nas células co-canais interferentes e do conjunto das subportadoras utilizadas na célula vítima [49]. É necessário realizar uma pesquisa adicional para estender esse trabalho para o modo ASP.



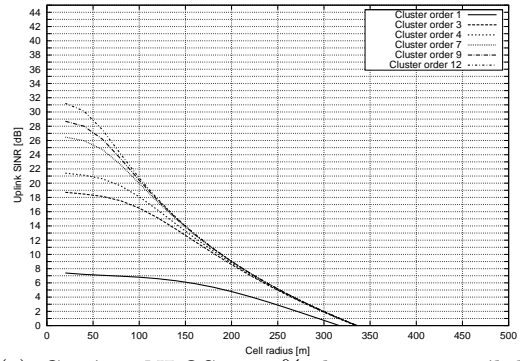
(a) Cenário LOS e 25% de carga na célula co-canal interferente.



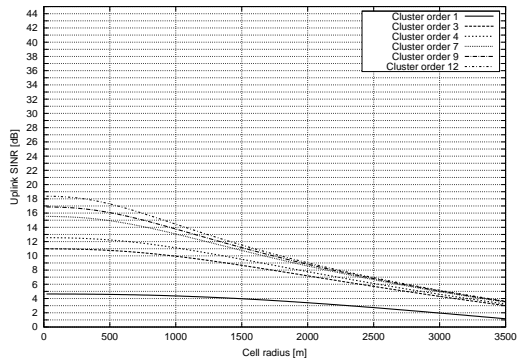
(d) Cenário NLOS e 25% de carga na célula co-canal interferente.



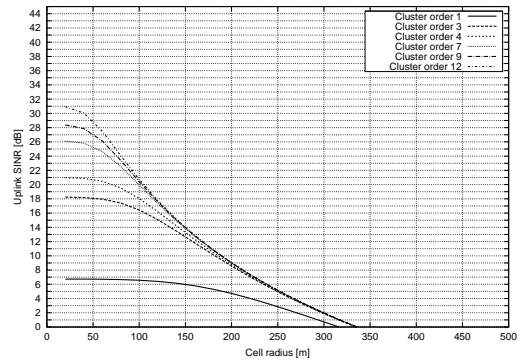
(b) Cenário LOS e 50% de carga na célula co-canal interferente.



(e) Cenário NLOS e 50% de carga na célula co-canal interferente.

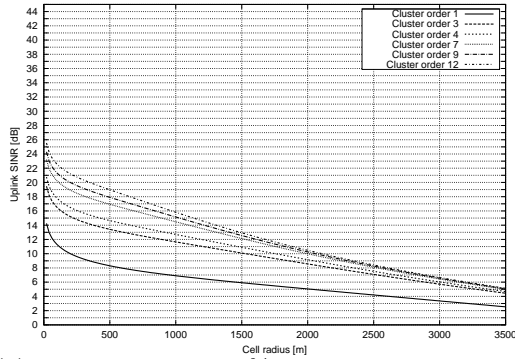


(c) Cenário LOS e 75% de carga na célula co-canal interferente.

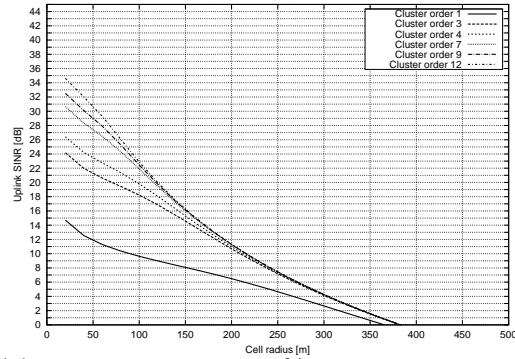


(f) Cenário NLOS e 75% de carga na célula co-canal interferente.

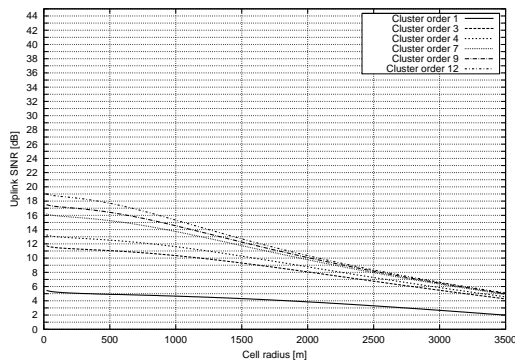
Figura 4.8 - SINR no enlace de subida relativo a uma SS localizada na borda da célula dentro de um sistema celular de setor único sem ganho de concentração de acordo com o cenário de propagação, carga da célula co-canal, ordem do *cluster* e raio da célula.



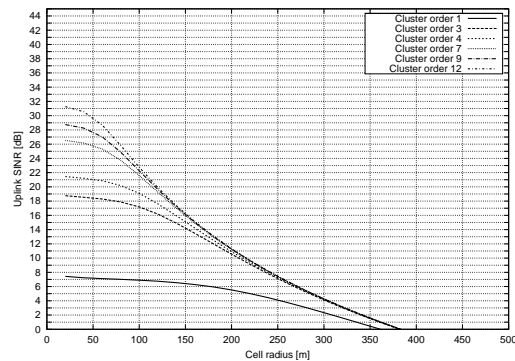
(a) Cenário LOS e 25% de carga na célula co-canal interferente.



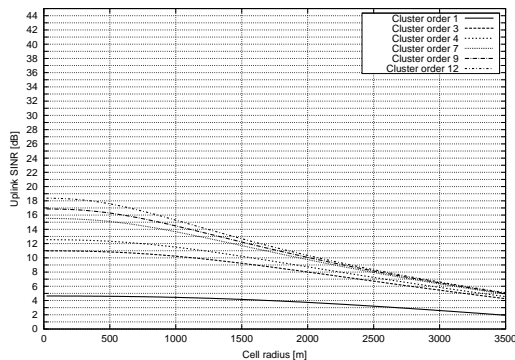
(d) Cenário NLOS e 25% de carga na célula co-canal interferente.



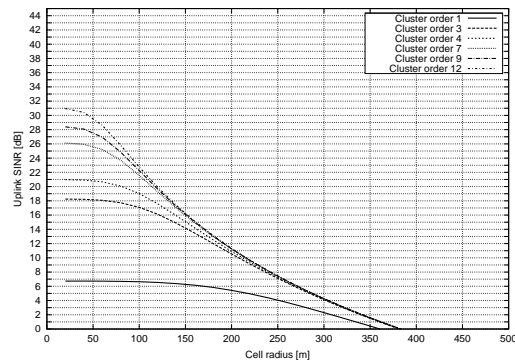
(b) Cenário LOS e 50% de carga na célula co-canal interferente.



(e) Cenário NLOS e 50% de carga na célula co-canal interferente.



(c) Cenário LOS e 75% de carga na célula co-canal interferente.



(f) Cenário NLOS e 75% de carga na célula co-canal interferente.

Figura 4.9 - SINR no enlace de subida relativo a uma SS localizada na borda da célula dentro de um sistema celular de setor único com ganho de concentração de 6 dB, de acordo com o cenário de propagação, carga da célula co-canal, ordem do *cluster* e raio da célula.

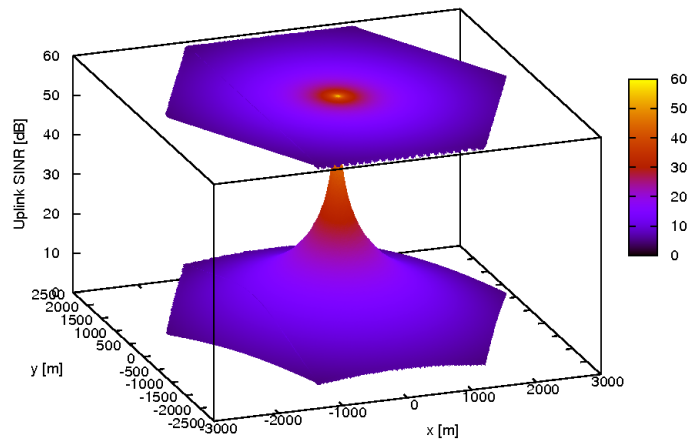


Figura 4.10 - Distribuição de SINR no enlace de subida dentro da célula vítima pertencente a um sistema celular com setor único, *cluster* de ordem três, raio de 2280m e carga nas células co-canais de 25% num cenário LOS.

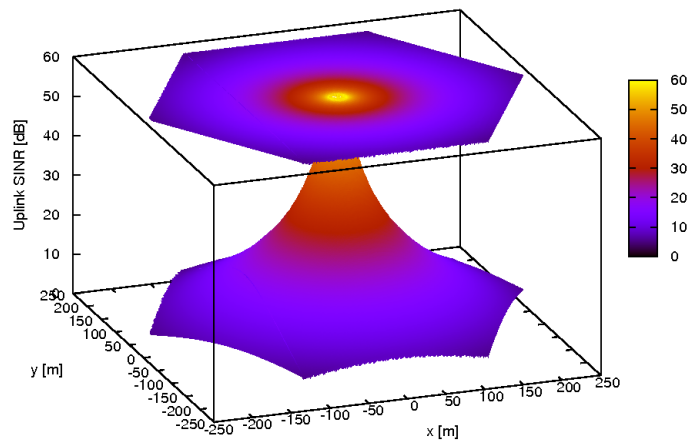


Figura 4.11 - Distribuição de SINR no enlace de subida dentro da célula vítima pertencente a um sistema celular com setor único, *cluster* de ordem três, raio de 240m e carga nas células co-canais de 25% num cenário LOS.

5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PADRÃO DVB-RCT

Correntemente, considerando os padrões de televisão digital terrestres adotados ou em desenvolvimento, apenas o padrão DVB-T possui um padrão complementar especificando uma rede dedicada a prover o canal de retorno, conhecido como DVB-RCT.

O DVB-RCT é um padrão de canal de retorno sem fio intrabanda, ou seja, que utiliza radiofrequências pertencentes às bandas VHF e UHF, ratificado em março de 2002 pelo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) e publicado como EN 301 958 v1.1.1 (2002-03). O *International Telecommunications Union - Radiocommunications Sector* (ITU-R) recomendou o padrão DVB-RCT como caminho de retorno sem fio preferido para os sistemas de radiodifusão terrestre, baseados no padrão DVB-T [51]. O objetivo do DVB-RCT é prover um canal de retorno que possa ser implantado reutilizando, para redução de custos, a infraestrutura de transmissão e recepção da rede DVB-T com melhor desempenho que outras tecnologias concorrentes [52] [53]. As principais características da camada física e da subcamada MAC do padrão DVB-RCT podem ser encontradas no Apêndice A.

Nesse capítulo, será avaliado o desempenho do padrão DVB-RCT quando utilizado como canal de retorno de um sistema de televisão digital DVB-T. Partindo de um modelo de distribuição de usuários na área de cobertura do sistema, de um modelo de fonte de tráfego interativo e de um conjunto de valores de parâmetros dos padrões DVB-T e DVB-RCT, será verificada a adequabilidade ou não de utilização do DVB-RCT como solução tecnológica para o canal de interatividade.

Para executar essa verificação foi necessário implementar um simulador de eventos discretos seguindo estritamente os padrões DVB-T e DVB-RCT e contemplando todos os aspectos necessários à operação dos protocolos tais como algoritmos de escalonamento, mapeamento, controle de disciplina de filas, encapsulamento, pedido de carona entre outros. Esse simulador foi desenvolvido usando a linguagem C++ e a biblioteca de simulação OMNeT++ [54] para estudar o desempenho e capacidade de uma célula DVB-T/RCT pertencente a um sistema de transmissão digital de sinais de televisão

terrestre, quando submetida a diferentes tipos e cargas de tráfego. De modo a limitar a complexidade da simulação, alguns parâmetros operacionais foram fixados.

O restante deste capítulo é organizado como se segue. A seção 5.1 apresenta os trabalhos relacionados e a seção 5.2 descreve um sistema DVB-T/RCT de televisão digital interativo típico. Os modelos e parâmetros do sistema DVB-T/RCT usados nas simulações são apresentados na seção 5.3 e a descrição da fonte de tráfego na seção 5.4. Os resultados da avaliação de desempenho do DVB-T/RCT para tráfego exponencial e a discussão estão na seção 5.5.

5.1 - TRABALHOS RELACIONADOS

Apesar da falta de uma avaliação completa das potencialidades, benefícios e limitações da utilização do padrão DVB-RCT como solução para prover o canal de interatividade, alguns trabalhos publicados envolvendo questões ligadas ao seu desempenho podem ser citados. A maior parte dos trabalhos está relacionada à avaliação de desempenho na camada física em termos de taxa de erro de bit [55] [56] [57] [58] e de cobertura [59] [43]. Todavia, há também trabalhos abordando o desempenho em camadas superiores quando submetidas a tráfego interativo [43], tráfego IP [60] e tráfego auto-similar [61].

Para verificar as possíveis vantagens do retorno intrabanda na disponibilização de serviços interativos em redes de televisão baseadas no padrão DVB-T [52] [62] [63], vários experimentos envolvendo testes de campo foram realizados em países que adotaram este padrão [59] [64] [65] [66] [67] [27]. Desses, o mais abrangente tratando do padrão DVB-RCT foi o projeto denominado *Wireless Interactive Terrestrial Network Systems and Services* WITNESS [59].

A finalidade do projeto WITNESS foi verificar se, com o terminal utilizando uma potência limitada de 30 dBm, a recepção poderia ser realizada em boas condições pela estação base do DVB-RCT, localizada na mesma posição da estação base do DVB-T. Para recepção fixa com antena externa, foram obtidos resultados bastante satisfatórios na borda da célula (80 km de distância do transmissor DVB-T) utilizando de 15 a 20 dBm de potência apenas. Para recepção interna, foram obtidos também bons resultados

para potências inferiores a 20 dBm. Dependendo do local, a atenuação de fora para dentro das residências variou de 9 a 12 dB.

Para determinação da área de cobertura do canal de interatividade, é necessário conhecer os valores mínimos da razão portadora/ruído, SNR, para cada tipo de cenário, modulação e taxa de código empregados. Esses valores foram obtidos em [43] especificamente para o DVB-RCT por intermédio de simulações efetuadas utilizando-se um modelo específico de camada física, ou seja, de modem e canal. Adicionalmente, foi avaliado o desempenho de uma implementação simplificada da subcamada MAC, utilizando fontes de tráfego interativo. Para determinar a capacidade do DVB-RCT para prover serviços interativos, foram usados modelos estatísticos para calcular a área de cobertura de uma célula para diferentes classes de serviço interativo, diferenciadas de acordo com as quantidades de dados a serem enviados por interação. Nesse modelo, as interações dos usuários eram constituídas por mensagens de quatro tamanhos fixos (48, 250, 3750 e 37500 *bytes*) e tempo entre chegadas com distribuição exponencial. Os resultados obtidos indicaram a possibilidade de atender a mais de 240.000 interações de 48 *bytes* por segundo num canal de 8 MHz.

Em [60], foi realizada uma comparação sucinta entre as características técnicas dos padrões DVB-RCT e WiMAX bem como uma avaliação de desempenho em termos de vazão, taxa de perda de pacotes e variação de retardo de uma implementação parcial do DVB-T/RCT [68], em laboratório. Nesta simulação foi utilizado apenas um terminal e uma estação base e, portanto, não foi possível avaliar o desempenho do acesso múltiplo ao meio. O gerador de tráfego IP utilizado foi o D-ITG, gerando tanto tráfego UDP como TCP. Usando a modulação QPSK com taxa de código 1/2, num canal com 8 MHz de largura de banda, foram obtidas vazões de aproximadamente 3 Mbps para tráfego TCP e 3,5 Mbps para tráfego UDP.

Devido aos robustos modos de transmissão, que permitem a implantação em células grandes, e aos esquemas de acesso ao meio baseado no OFDMA, que possibilitam grandes ganhos de processamento e concentração utilizando um transmissor no terminal de usuário de baixa potência (1W), o padrão DVB-RCT também foi proposto como canal de retorno para o sistema ATSC em áreas rurais e remotas desprovidas de outros

serviços de telecomunicações [27]. Também em [69], está disponível um estudo sobre o desempenho de tráfego de dados no canal de descida do padrão ATSC, no qual foi avaliado o desempenho dos protocolos da camada de transporte, TCP e UDP, quando submetidos a diferentes condições de ruído do canal, tamanho de pacote IP, carga de tráfego e capacidade do canal de retorno.

Em virtude da similaridade dos métodos de acesso ao meio utilizados nas redes de radiodifusão terrestres e de televisão a cabo, os diversos trabalhos publicados sobre avaliação de desempenho do padrão DOCSIS [70] foram considerados como fonte de resultados e orientações. Em um desses trabalhos, foi realizada uma análise detalhada da influência de algumas funcionalidades do DOCSIS, tais como fragmentação, concatenação, *piggybacking* e retardo de disputa, no desempenho em termos do retardo de acesso do canal de interatividade [71]. Recentemente, foi desenvolvido um modelo analítico para estudar o algoritmo de acesso ao meio do padrão DOCSIS [72]. Usando esse modelo, foram identificados os tamanhos de janelas ótimos, em termos de retardo e vazão da rede em condições de alta carga de tráfego.

Apesar de ter sido mencionado nos relatórios produzidos pelo CPqD [12] que o DVB-RCT não possuía implementações comerciais, foi constatada a existência de pelo menos uma [68] anterior àquele relatório, bem como outra [73], da mesma época do relatório, baseada em *software* livre.

5.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DVB-T/RCT

Um sistema TVD interativo DVB-T/RCT possui duas estruturas celulares sobrepostas: uma para o canal de descida baseado no padrão DVB-T e outra para o canal de subida baseado no padrão DVB-RCT, conforme ilustrado na Figura 5.1. O canal de descida DVB-T compreende o canal de radiodifusão e o percurso de interação avante (do provedor de serviço para o usuário) e são usados, respectivamente, para transportar conteúdo de radiodifusão e dados de interação de descida. O canal de subida DVB-RCT contém o percurso de interação de retorno (do usuário para o provedor de serviço) e é usado para realizar requisições para o *Interactive Service Provider* (ISP) e mandar dados de interação de subida.

O modelo de um sistema de televisão digital interativo constituído por uma única célula DVB-T/RCT é ilustrado na Figura 5.2. Este modelo possui uma estação rádio base DVB-RCT localizada no centro da célula DVB-T reaproveitando a infraestrutura anteriormente disponível e cobrindo toda a área de serviço. Opcionalmente, o ISP pode ser conectado à Internet para oferecer serviços *Web* a um número variável de RCTT espalhados pela área de cobertura. Cada RCTT prover interface, tanto para o canal de interatividade como para o de radiodifusão. Vários dispositivos tais como televisões, computadores e equipamentos de rede podem ser conectados ao RCTT.

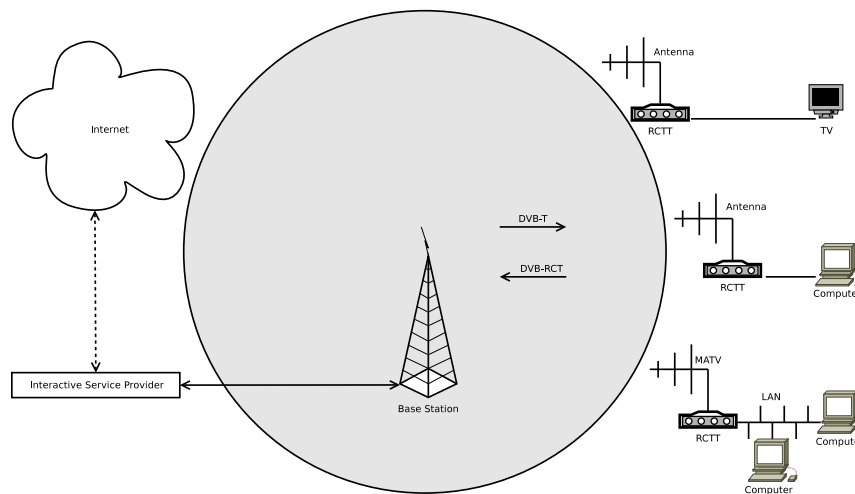


Figura 5.2 - Modelo do sistema DVB-T/RCT com canal de subida DVB-RCT cobrindo toda a célula DVB-T.

O canal de descida DVB-T é também denominado de canal de provimento. Nesse canal são difundidas as informações de configuração de todos os canais de subida suportados dentro da célula DVB-T/RCT, além de ser utilizado para estabelecer e manter a sincronização dos RCTT. Ao menos um dos canais de subida é utilizado pelo RCTT do usuário como canal de serviço para entrar na rede realizando procedimentos de inicialização e afiliação [9]. No modelo de sistema simulado, o canal de serviço é também utilizado para transportar tráfego de interação.

5.3.1 - Arquitetura de camadas

A arquitetura de camadas do modelo de sistema DVB-T/RCT é mostrada na Figura 5.3. A célula DVB-T/RCT trabalha como uma ponte MAC *Ethernet* conectando usuários (clientes) ao servidor ISP. Tal ponte transparente transporta SDU(s) de interação en-

capitulados em quadros *Ethernet* que são então passados para as camadas mais baixas. Tanto o RCTT(NIU) como a BS(INA) recebem quadros *Ethernet* a serem transmitidos depois do encapsulamento em células ATM e pacotes MPEG-TS, respectivamente. Antes do acesso ao meio baseado no OFDM, as células ATM de subida são mapeadas em salvas físicas.

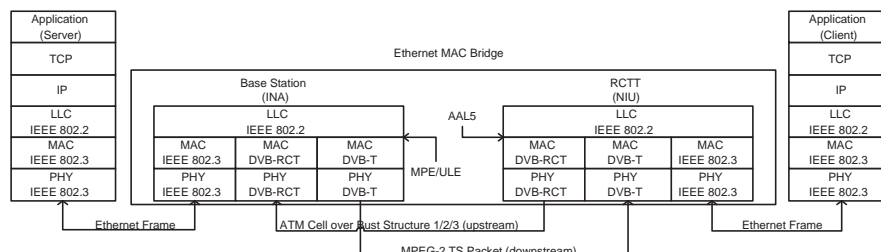


Figura 5.3 - Camadas e protocolos da arquitetura cliente-servidor de uma célula DVB-T/RCT.

5.3.2 - Camada Física

Os parâmetros da camada física DVB-T foram sintetizados na Tabela 5.1. O modo de transmissão 8K possibilita a melhor relação de compromisso entre tamanho de célula e tolerância Doppler no caso de sistemas com terminais fixos [6]. O menor intervalo de guarda foi selecionado por ser normalmente suficiente para proteger o sinal de descida de ecos naturais causados por obstáculos geográficos tais como montanhas [18].

Tabela 5.1 - Valores dos parâmetros da camada física do padrão DVB-T

Parâmetros	Valores
Número de subportadoras OFDM (N)	8192 (8K)
Número de subportadoras OFDM utilizadas (N_u)	6817
Período elementar (T)	$7/64 \mu s$ (8MHz) e $1/8 \mu s$ (7MHz)
Duração útil de símbolo ($T_u = NT$)	$896 \mu s$ e $1024 \mu s$
Espaçamento entre subportadoras OFDM ($C_s = \frac{1}{T_u}$)	1,116 kHz e 0,976563 kHz
Intervalo de guarda ($T_g = GT_u$)	1/32
Modulação	64-QAM
Taxa de Código (R_c)	7/8
Banda do canal ($B_u = C_s N_u$)	7,61 MHz e 6,66 MHz
Taxa de bit útil (R_b)	31,67 Mbps e 27,71 Mbps

A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros da camada física DVB-RCT. O maior espaçamento entre subportadoras (CS3) foi escolhido para que a largura de canal de subida DVB-RCT seja similar àquela do canal de descida DVB-T. Os parâmetros relativos a um

canal de 7 MHz, listados nas Tabelas 5.1 e 5.2 serão utilizados para comparação de desempenho entre o DVB-RCT e o WiMAX que será apresentada no Capítulo 6.

Tabela 5.2 - Valores dos parâmetros da camada física do padrão DVB-RCT

Parâmetros	Valores
Número de subportadoras OFDM (N)	2048 (2K)
Número de subportadoras OFDM utilizadas (N_u)	1712
Período elementar (T)	7/64 μs (8MHz) e 1/8 μs (7MHz)
Duração útil de símbolo ($T_u = NT$)	224 μs e 256 μs
Espaçamento entre subportadoras OFDM ($C_s = \frac{1}{T_u}$)	4,464 kHz e 3,906 kHz (CS3)
Intervalo de guarda ($T_g = GT_u$)	1/4
Taxa de campo de sincronização	256 Hz
Formatação de subportadora	Retangular
Esquemas de acesso ao meio	MAS1(TF1-BS1), MAS2(TF1-BS2) e MAS3(TF2-BS3)
Banda útil do canal ($B_u = C_s N_u$)	7,643 MHz and 6,688 MHz
Tamanho do intervalo de <i>ranging</i>	1(MAS1/MAS2)
Mapeamento do <i>ranging</i> curto	2047(MAS1/MAS2) e 11(MAS3)

Baseando-se nos parâmetros da camada física DVB-RCT apresentados na Tabela 5.2 e no número máximo de subcanais simultaneamente alocados por terminal [9], os ganhos de concentração mínimos podem ser calculados para diferentes modulações e esquemas de acesso ao meio. A Tabela 5.3 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 5.3 - Mínimo ganho de concentração [dB], de acordo com a modulação e o esquema de acesso ao meio

Modulação	Esquema de Acesso ao Meio		
	MAS1	MAS2	MAS3
QPSK	6,4816	0,4610	0,3049
16-QAM	9,4919	3,4713	0,3049
64-QAM	11,253	5,2322	0,3049

O tamanho do intervalo de *ranging* dos esquemas MAS1/MAS2 foi fixado em um e o mapeamento do *short ranging* como 2047 (11 *slots* de *ranging* para *short ranging* e um para *long ranging*). Isto resulta numa capacidade de *ranging* por *transmission frame* (TF) de $11 \times 6 = 66$ símbolos de *ranging* que podem vir a ser suficientes para serviços interativos. O mapeamento do *short ranging* do esquema MAS3 foi definido como 11, ou seja, há 55 subcanais de dados, usados para transmissão de SDU(s) e PDU(s) MAC, e quatro subcanais são agrupados para constituir um subcanal de *ranging* (subcanal número 11) para acesso por *ranging*.

O número máximo de códigos de *ranging* que podem ser detectados por símbolo foi limitado em oito. De acordo com a Equação A.1, a probabilidade da estação base come-

ter um erro de decodificação durante o acesso por *ranging* será de $4,9593 \times 10^{-9}$ para 116 subportadoras (quatro subcanais) e $6,1129 \times 10^{-11}$ para 145 subportadoras (cinco subcanais). Como ambos valores de probabilidade são pequenos, é possível concluir que os eventos são bastante raros e, portanto, não serão levados em consideração na simulação. Adicionalmente, o efeito de captura foi considerado durante as simulações, ou seja, sempre que dois ou mais terminais escolherem o mesmo código, o mesmo *slot* será alocado e uma colisão irá ocorrer durante o modo de acesso reservado.

Com relação aos retardos das camadas físicas dos padrões DVB-T e DVB-RCT, tais como aqueles introduzidos pelo entrelaçamento, codificação, modulação e propagação, nenhum valor foi considerado. Apenas os retardos de enfileiramento e transmissão da subcamada MAC foram considerados na avaliação do retardo fim-a-fim da camada de aplicação.

5.3.3 - Cenários e coberturas

Dois cenários foram considerados para o cálculo das áreas de cobertura: um cenário rural com recepção LOS e propagação multipercurso com um percurso direto e vários secundários; e um cenário urbano com recepção NLOS e propagação multipercurso sem percurso direto. As cópias de sinal destes percursos possuem amplitudes que podem ser modeladas pelas distribuições de probabilidade de Rice e Rayleigh, respectivamente. O cenário rural foi caracterizado no lado do terminal, pela transmissão/recepção efetuada por meio de antena diretiva localizada no topo do telhado, e no lado da estação base DVB-RCT, pelo compartilhamento da infraestrutura de transmissão DVB-T. No cenário urbano foi considerada uma antena interna no lado do terminal e uma estação base de baixa potência DVB-T/RCT implantada de modo similar às redes de telefonia celular.

As áreas de cobertura foram calculadas baseando-se apenas na sensibilidade do receptor e na perda máxima de propagação, usando os mesmos procedimentos e parâmetros descritos em [43]. O cálculo da perda de propagação foi feito pelo método descrito na Recomendação ITU-R P.1546 [41] para predição ponto-área de intensidade de campo, por ter sido considerado adequado para planejamento de sistemas de televisão digital

terrestres [42].

Primeiramente, a Equação 5.1 foi utilizada para calcular a intensidade de campo referente a uma determinada perda de percurso, supondo a utilização de um transmissor de 1 kW, acoplado a uma antena dipolo de meia onda, e um receptor ideal utilizando uma antena com diretividade de 1 dBi [41].

$$E = 139,0 - L + 20 \log_{10}(f) \quad (5.1)$$

onde:

- E – intensidade de campo no receptor [dB(μ V/m)];
- L – perda de percurso [dB];
- f – frequência (500 MHz).

Então, a Equação 5.2 é usada para calcular a potência de ruído na entrada do receptor da estação base que, após substituição na Equação 5.3, é adicionada à mínima SNR requisitada por cada modo de transmissão, resultando na sensibilidade do receptor DVB-RCT (P_{Rmin}^{BS}).

$$P_N = P_{NF}^{BS} + 10 \log_{10}[kT_0B_u] + 30.0 \quad (5.2)$$

$$P_{Rmin}^{BS} = P_N + SNR \quad (5.3)$$

onde:

- P_N – potência de ruído na entrada do receptor [dBm];
- P_{NF}^{BS} – figura de ruído do receptor da estação base (0 dB);
- k – constante de Boltzmann($1.3806504 \times 10^{-23} W_s/K$);
- T_0 – temperatura absoluta (290 K);
- B_u – largura de banda do canal($7.643 \times 10^6 Hz$);
- SNR – *signal to noise ratio* para o canal de Rice (ver [43]).

As perdas de percurso DVB-RCT são calculadas para áreas rurais e urbanas usando, respectivamente, as Equações 5.4 e 5.5. Os parâmetros para cálculo de enlace estão listados em [43] e no Anexo B do padrão DVB-RCT [9].

$$L_{rural} = (P_T^{RCTT} + G_A^{RCTT} + G_C^{RCTT} + G_A^{BS} + G_D^{BS}) - (P_{R_{min}}^{BS} + L_F^{RCTT} + L_D^{RCTT} + C_l) \quad (5.4)$$

onde:

- h^{BS} – altura da antena da BS (300 m);
- h^{RCTT} – altura da antena do RCTT (10 m);
- P_T^{RCTT} – potência de transmissão do RCTT (30 dBm);
- G_A^{RCTT} – ganho de antena do RCTT (10 dBd);
- G_C^{RCTT} – ganho de concentração [dB](ver 5.3);
- G_A^{BS} – ganho de antena da BS (15 dBd);
- G_D^{BS} – ganho de diversidade (0 dB);
- L_F^{RCTT} – perda do alimentador do RCTT (3 dB);
- L_D^{RCTT} – perda do duplexador do RCTT (4 dB);
- C_l – fator de correção de localização [dB] (ver 5.4).

$$L_{urban} = (P_T^{RCTT} + G_A^{RCTT} + G_C^{RCTT} + G_A^{BS} + G_D^{BS}) - (P_{R_{min}}^{BS} + L_F^{RCTT} + L_D^{RCTT} + L_B^{RCTT} + L_H^{RCTT} + C_l) \quad (5.5)$$

onde:

- h^{BS} – altura da antena da BS (37,5 m);
- h^{RCTT} – altura da antena do RCTT (1,5 m);
- P_T^{RCTT} – potência de transmissão do RCTT (30 dBm);
- G_A^{RCTT} – ganho de antena do RCTT (0 dBd);
- G_C^{RCTT} – ganho de concentração [dB](veja Tabela 5.3);
- G_A^{BS} – ganho de antena da BS (15 dBd);
- G_D^{BS} – ganho de diversidade (6 dB);
- L_F^{RCTT} – perda do alimentador do RCTT (0 dB);
- L_D^{RCTT} – perda do duplexador do RCTT (0 dB);
- L_B^{RCTT} – perda de penetração em edificação do RCTT (7 dB);
- L_H^{RCTT} – fator de correção de perda de altura do RCTT (20 dB);
- C_l – fator de correção de localização [dB] (ver Tabela 5.4).

Como a recomendação P.1546 do ITU-R calcula valores médios de intensidade de campo para 50% do tempo e 50% das localidades e o planejamento da cobertura de televisão digital normalmente requer 90% do tempo e 70% (aceitável) ou 95% (bom) das localizações [42], uma margem adicional deve ser adicionada para considerar uma maior probabilidade de tempo e localização. Tal margem é necessária para sobrepor variações de intensidade de campo causadas por sombreamento e reflexões multipercurso em objetos distantes. Para distâncias menores que 60 km, a diferença de intensidade de campo entre 50% e 90% do tempo é desprezível e não foi considerada nesse estudo. Assumindo uma distribuição log-normal do sinal DVB-RCT recebido, o fator de correção de localização para 70% e 95% das localidades foi calculado usando a Equação: $C_l = \mu\sigma$, onde μ é o fator de distribuição e σ o desvio padrão [9].

Tabela 5.4 - Fator de correção de localização [dB], de acordo com a porcentagem de locais e o cenário de propagação.

Porcentagem (%)	Cenário			
	LOS		NLOS	
	MAS1	MAS2/MAS3	MAS1	MAS2/MAS3
95	16,4	8,2	19,1	12,8
70	7,2	3,6	8,4	5,6

O padrão DVB-RCT utiliza a modulação e a codificação adaptativa para ajustar a transmissão de dados à capacidade do canal [75] que varia segundo a SINR. Embora essa relação dependa de diversos fatores tais como perda de propagação, sombreamento, desvanecimento e interferência de células adjacentes, seu valor médio tende a diminuir com o aumento da distância entre transmissor e receptor. Portanto, ao longo do percurso entre o centro da célula e a sua borda, diversos pontos de mudança entre modos de transmissão (modulação e codificação) devem existir para permitir otimizar a utilização do canal e, conseqüentemente, a eficiência espectral.

Os pontos de mudança entre modos de transmissão e a fração de área da célula coberta por cada modo de transmissão são listados nas Tabelas 5.5 e 5.6. Esses pontos foram determinados usando a mínima SNR necessária para transmissão quase livre de erros, *quasi error free* (QEF), em canais de Rice e Rayleigh, conforme publicado em [43]. No caso de cenários rurais (LOS), os pontos de mudança foram calculados usando os ganhos de concentração mínimos para os esquemas MAS1, MAS2 e MAS3 listados na

Tabela 5.3. No caso de áreas urbanas (NLOS), maiores ganhos de concentração são necessários para transmissão QEF devido a maior atenuação por perda de percurso. Como a recomendação P.1546 é válida apenas para distâncias entre 1 km e 1000 km, os ganhos de concentração no cenário urbano devem permitir que o ponto de mudança mais interno seja posicionado a uma distância da BS maior que 1 km. Considerando o parâmetro de contorno anterior, o número de subcanais simultaneamente alocados por RCTT foi limitado a 1(MAS3), 8(MAS2) e 16(MAS1).

O ponto de mudança associado ao modo de transmissão QPSK 1/2 determina a borda da célula e, no caso de uma arquitetura celular ideal, possui a forma hexagonal. No caso de cenários rurais (LOS), a utilização de esquemas de acesso ao meio MAS1 e MAS2 resulta em uma borda hexagonal de célula QPSK 1/2 que intercepta o círculo de raio igual ao ponto de mudança QPSK 3/4. Nestes casos, foi assumido que os terminais QPSK 1/2 poderiam ser servidos pelo modo de transmissão QPSK 3/4, com uma pequena redução no desempenho da camada física.

No caso do cenário urbano, o menor valor da SNR necessário para transmissão QEF obtido em [43] para transmissão usando o modo 64-QAM 1/2 quando comparado ao 16-QAM 3/4 está de acordo com as orientações providas em [18], isto é, em um canal altamente seletivo, tais como um canal Rayleigh, o modo 64-QAM 1/2 ao contrário de 16-QAM 3/4 deverá ser a escolha preferida, conforme pode ser observado nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5 - Pontos de mudança de modo de transmissão [km] / porcentagem da área de superfície da célula servida por modo de transmissão[%], de acordo com esquema de acesso ao meio e modo de transmissão no cenário LOS

Modo de Transmissão	SNR [43]	MAS1	MAS2	MAS3
QPSK 1/2	6,2	58,045/0,0000	50,084/0,0	35,119/3,9720
QPSK 3/4	9,0	53,423/17,142	45,673/20,142	31,296/24,534
16-QAM 1/2	12,2	48,049/17,057	40,701/18,169	27,004/20,664
16-QAM 3/4	15,6	42,819/9,0245	35,773/9,4330	22,770/10,464
64-QAM 1/2	17,7	39,774/14,506	32,924/15,103	20,291/15,142
64-QAM 3/4	21,5	34,319/42,271	27,762/37,152	16,040/25,224

Diferentemente dos resultados obtidos em [16], utilizando o cálculo com perda de percurso em espaço livre, foi observado que a distribuição dos modos de transmissão em

Tabela 5.6 - Pontos de mudança de modo de transmissão [km] / porcentagem da área de superfície da célula servida por modo de transmissão[%], de acordo com esquema de acesso ao meio e modo de transmissão no cenário NLOS

Modo de Transmissão	SNR [43]	MAS1	MAS2	MAS3
QPSK 1/2	12,1	3,3000/42,167	3,2100/42,167	3,4083/42,167
QPSK 3/4	17,6	2,2822/1,0566	2,2200/1,0566	2,3571/1,0566
16-QAM 1/2	17,7	2,2613/28,602	2,1996/28,860	2,3354/28,602
16-QAM 3/4	23,5	1,5930/0,0000	1,5424/0,0000	1,6452/0,0000
64-QAM 1/2	22,8	1,5142/16,331	1,4729/16,073	1,5638/16,331
64-QAM 3/4	28,9	1,0328/11,844	1,0046/11,844	1,0667/11,844

uma célula hexagonal, usando a Recomendação ITU-R P.1546, depende da banda de frequência em uso e da potência de transmissão.

5.3.4 - Subcamada MAC

Os parâmetros da subcamada MAC usados para a avaliação de desempenho do DVB-RCT foram reportados na Tabela 5.7. Baseando-se em resultados iniciais de simulação (não apresentados) e em trabalhos relacionados anteriores [43], os modos de acesso por reserva e *ranging* foram considerados os mais recomendáveis para o tráfego de serviço interativo. Portanto, esses modos foram os únicos utilizados para avaliação de desempenho.

O acesso por contenção foi desabilitado, zerando o parâmetro *Maximum Contention Access Message Length* e deixando indefinidos os expoentes máximos e mínimos de recuo. Ao parâmetro *Maximum Reservation Access Message Length* foi atribuído o máximo valor de modo a reduzir o número de <MAC> *Reservation Request Message* geradas por SDU (veja Algoritmo 2) e transmissão de <MAC> *Idle Message* durante os períodos de inatividade da conexão foi desabilitado. O campo *generic flow control* (GFC) representa o número de células para requisição de carona.

Conforme mencionado na Seção A.1.1, nenhum algoritmo para resolução de colisão foi definido no padrão DVB-RCT para acesso por *ranging*. Portanto, foi adotado um algoritmo com detecção de portadora *p*-persistente com probabilidade de transmissão variando de acordo com o esquema de acesso ao meio: $p = 0,02(\text{MAS1}/\text{MAS2})$ e

Tabela 5.7 - Valores dos parâmetros da subcamada MAC DVB-RCT

Parâmetros	Valores
Campo GFC	255(GFC11) 16(GFC10) 1 (GFC01) 1 (MAS1)
Deslocamento de reserva	4 (MAS2) 2 (MAS3)
Intervalo de inatividade para mensagens nulas	0 s
Máximo número de <i>slots</i> de tempo	32
Máximo tamanho de mensagem para acesso por contenção	0
Máximo tamanho de mensagem para acesso por reserva	255

$p = 0,3(\text{MAS3})$. Os valores para esgotamento de temporizadores usados pelo acesso por *ranging*, bem como outros usados pelo protocolo da subcamada MAC, foram definidos usando os valores padrões listados nas Tabelas 43 e 44 do padrão DVB-RCT [9]. A precisão do tempo de sincronização foi definida para ser melhor que $\pm 4 \mu\text{s}$ para uma precisão de frequência de 0,01 ppm.

Entre as capacidades da BS(INA) estão o encapsulamento para estabelecimento de pontes subcamadas MAC *Ethernet*, requisição de recursos/carona e requisição de banda por *ranging*. Na implementação utilizada neste trabalho, a BS(INA) processa e difunde informações sobre requisições de banda por *ranging* e efetua a alocação de agrupamentos de *slots* sob demanda no final de cada *slot* de *ranging*. As alocações por *ranging* possuem prioridade sobre as realizadas por requisição de reserva. Os agrupamentos de *slots* são alocados no início de cada TF usando um algoritmo de escalonamento e mapeamento conjuntos. Como na subcamada MAC de cada RCTT existe um relação bi-unívoca entre conexões e usuários, não é necessário implementar nenhum algoritmo para escalonamento de recursos entre as conexões existentes em cada RCTT.

Antes de enviar uma mensagem $\langle \text{MAC} \rangle$ *Reservation Request Message*, cada RCTT(NIU) atualiza o contador de requisição de reserva de *slots* de modo a prover a situação mais atual à BS(INA). A Figura 5.4 ilustra o ciclo de requisição de reserva onde é possível visualizar várias oportunidades de acesso por reserva seguindo seguindo um acesso por *ranging* para reserva de banda realizado com sucesso.

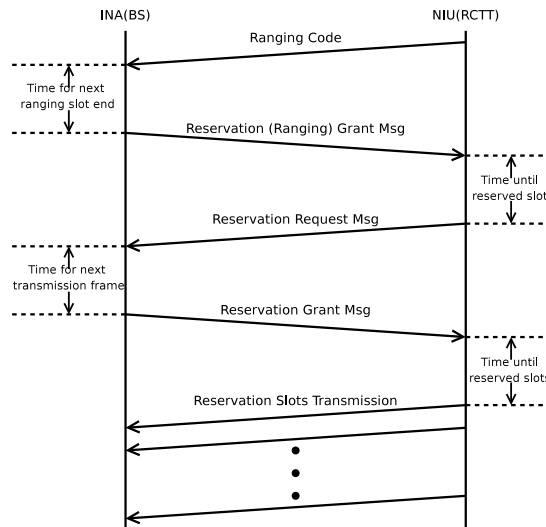


Figura 5.4 - O ciclo de requisição de reserva.

Na implementação realizada, não havia limite para o tamanho das filas da subcamada MAC de subida e de descida e, portanto, não havia descarte de SDU(s) e PDU(s) durante os períodos de congestionamento da rede. O mesmo comportamento foi adotado nas outras camadas de rede, quando aplicável, resultando num sistema sem perdas.

Uma versão simplificada da máquina de estados finitos do acesso por reserva foi ilustrada na Figura 5.5. Essa máquina gerência a transmissão de dados no modo de reserva entre o RCTT e a BS, descrevendo tanto a negociação de parâmetros de conexão como o escalonamento de novas mensagens PDU MAC, retransmitir de antigas e realização de transições de estado após o esgotamento de temporizadores.

Apesar da supracitada máquina não ter sido especificada no padrão DVB-RCT, havendo apenas uma menção sobre ela na página 161 do anexo E desse padrão. As transições na Figura 5.5 são rotuladas como se segue: o evento causando a transição é identificado acima da linha e o(s) tipo(s) de PDU(s) enviado(s) como resultado é listado abaixo da linha. Cada transição é associada com a direção da seta. Portanto, a descrição da transição é posicionada próxima ao final da seta relacionada. Por exemplo, a máquina vai do estado *SendReservationMACDataMsg* para o estado *WaitReservation-Status* depois que a mensagem <MAC> *Reservation Status Request Message* causada pelo evento *grantTimeout* foi enviada para cima (*upstream*).

A máxima vazão de dados da subcamada MAC oferecida aos serviços das camadas

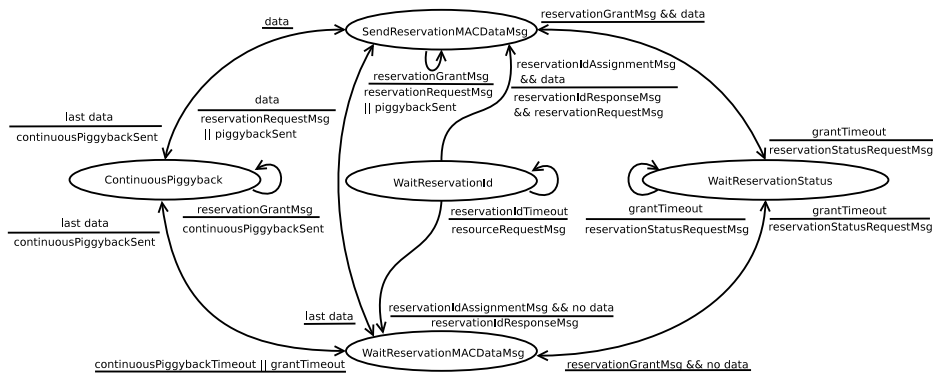


Figura 5.5 - Máquina de estados finitos simplificada do acesso por reserva.

superiores para diferentes modos de transmissão e esquemas de acesso ao meio foi calculada, estando os resultados consolidados na Tabela 5.8. Para realização desse cálculo foi assumido que todos MAC PDU e SDU são encapsulados em células ATM, antes de serem transmitidos pela subcamada MAC. Contudo, essa hipótese não é sempre verdadeira, pois o Algoritmo 1 não encapsula PDU(s) menores que o tamanho da salva. Felizmente, o erro cometido é desprezível porque a probabilidade de existir um PDU MAC com essas características é pequena.

Tabela 5.8 - Máxima vazão da subcamada MAC [Mbps] do DVB-RCT, de acordo com o modo de transmissão e o esquema de acesso ao meio

Modo de transmissão	Esquema de Acesso ao Meio	
	MAS1/MAS2	MAS3
QPSK 1/2	4,2542	4,2695
QPSK 3/4	6,3813	6,4043
16-QAM 1/2	8,5084	8,5391
16-QAM 3/4	12,763	12,809
64-QAM 1/2	12,763	12,809
64-QAM 3/4	19,144	19,213

5.4 - MODELO DA FONTE DE TRÁFEGO

Num sistema de televisão digital interativo DVB-T/RCT que oferece serviços de recuperação/interação, cada RCTT funciona como uma fonte de tráfego, agregando tanto o tráfego interativo de televisão como aquele gerado por aplicações de Internet tais como navegadores, correio eletrônico ou transferência de arquivos, originado no próprio RCTT ou numa rede a ele conectado, *Master Antenna Television* (MATV) ou *Local Area Network* (LAN). Vários parâmetros relacionados às aplicações dos usuários

ando as redes de TV interativas possuem grande influência na sua capacidade expressa em termos do número simulatâneo de usuários suportados, tais como fatores de pico (*burstness*) e assimetria, duração de sessão, retardo máximo, taxa média de transmissão suportada, etc.

Para avaliação de desempenho, o comportamento do usuário foi modelado como uma fonte ON/OFF com tempo de permanência em ambos estados possuindo tanto uma distribuição exponencial como uma de cauda pesada Pareto [76]. No último caso, o tráfego agregado produzido possui características tanto de dependência de larga escala como de auto-similaridade. O tráfego gerado pela fonte é enviado para o RCTT encapsulado em quadros *Ethernet*. De modo a melhorar o modelo, foi adotada a mesma distribuição de tamanhos de quadro obtida a partir de medições realizadas numa rede de TV a cabo [77] residencial, utilizada para aplicações *http*, *ftp* e vídeo com taxa de bit variável (VBR).

A Tabela 5.9 apresenta as características do modelo de fonte de tráfego. O valor de taxa média de transmissão de dados por usuário ativo do serviço de TV interativo adotado foi de 10 kbps, conforme publicado em [21] como estimativa para uma rede UMTS usada como canal de interatividade num cenário de convergência dos serviços de radiodifusão e telecomunicações. À taxa de transmissão da rede local que conectava o usuário ao seu RCTT foi atribuído o valor de 10 Mbps. Os parâmetros de tempo da fonte foram expressos em unidades do tempo de transmissão de um *byte* (*bytestamp*). Dentro das salvas (Estado ON), os quadros *Ethernet* são espaçados de 20 *bytestamps*, onde a separação entre quadros padrão é de 12 *bytes* e o preâmbulo de 8 *bytes* [78].

Tabela 5.9 - Especificação das distribuições, parâmetros e taxa da fonte de tráfego interativo do tipo ON/OFF

Especificação	Tempo entre chegadas (ON)	Período ON/OFF
Distribuição	Determinístico	Exponencial
Parâmetros	20 Bytes	$\lambda_{ON} = 0,001$ $E[ON] = 4000 \text{ bytes}$
Taxa média da fonte	10 kbps	

5.5 - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados de avaliação de desempenho do sistema de televisão digital interativo DVB-T/RCT, quando submetido a tráfego exponencial, são apresentados e discutidos. Foram utilizados quatro diferentes mecanismos de requisição de banda para acesso ao meio por reserva: *piggyback*, *piggyback* contínuo com temporização de oito tempos de *slot*, *piggyback* contínuo sem temporização e requisição de reserva via mensagem PDU MAC específica. Utilizando esses mecanismos, o retardo e a vazão para diferentes valores de utilização do canal de interatividade foram obtidos, comparados e, finalmente, utilizados para calcular a capacidade de uma célula DVB-T/RCT.

5.5.1 - Metodologia para execução das simulações e coleta de estatísticas

As estatísticas de desempenho foram obtidas através do método das replicações independentes [79]. Desse modo, cada ponto da curva representa a média das amostras de variáveis aleatórias relacionadas à qualidade de serviço coletadas ao final da corrida de simulação (experimento). As variáveis analisadas foram o retardo médio fim-a-fim e a vazão de SDU(s), ambos medidos na camada de aplicação, e a utilização do canal por PDU(s), medida na subcamada MAC do canal de retorno, baseado no padrão DVB-RCT. Esta última variável representa não apenas a utilização do canal para acessos por reserva mas também por *ranging* e contenção.

A duração de cada corrida da simulação foi de 1560s, incluindo um período de aquecimento de 360s [2]. A coleta de dados para cálculo dos parâmetros estatísticos inicia-se somente após transcorrido o período de aquecimento, já que a finalidade da pesquisa é estudar o sistema no estado estacionário. Em cada corrida, foi utilizada uma semente aleatória diferente para inicializar o gerador de números aleatórios. Esse gerador é usado tanto pelas fontes de tráfego como pelos mecanismos de controle de acesso ao meio.

A coleta das estatísticas de qualidade de serviço do sistema DVB-T/RCT foi realizada aumentando-se, progressivamente, o número de terminais presentes na área de cobertura do sistema e, conseqüentemente, a carga de tráfego de subida e observando-se os comportamentos do retardo, vazão e utilização do canal.

5.5.2 - Apresentação dos resultados

As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam os resultados do desempenho do DVB-RCT em termos de retardo, vazão e utilização de canal no cenário NLOS. As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostram o desempenho do DVB-RCT no cenário LOS.

5.5.3 - Discussão dos resultados

O comportamento típico de aumento do retardo, vazão e utilização no canal com a carga oferecida pôde ser observado em todas as seis figuras apresentadas na subseção anterior.

Comparando os mecanismos de requisição de banda, observou-se que os mecanismos com *piggyback* possuem um desempenho relativo melhor, em termos de retardo médio, que o sem *piggyback* no cenário NLOS, quando o sistema não está sendo intensamente utilizado. Essa vantagem é particularmente significativa no caso do esquema de acesso ao meio MAS1 no cenário NLOS pois o tempo entre chegadas de pacotes na camada de aplicação é geralmente menor que o tempo de transmissão dos pacotes enfileirados na subcamada MAC. Todavia, essa vantagem passa a ser do mecanismo sem *piggyback* quando a utilização do canal aproxima-se ou ultrapassa 95%. Nesse caso, como a maior parte dos terminais utilizam modos de transmissão que não permitem o envio de células ATM inteiras numa única salva, há um maior retardo no envio de requisições incrementais de banda por *piggyback* e, conseqüentemente, na alocação de recursos para transmissão de SDU(s).

Para todos os esquemas de acesso no cenário LOS e MAS2 e MAS3 no cenário NLOS, o desempenho dos mecanismos de reserva de banda é semelhante em virtude do tempo entre chegadas ser normalmente maior que o tempo de transmissão. Nesse caso, a transmissão é realizada rapidamente pois a maioria dos terminais utiliza modos de transmissão cujas salvas permitem transportar células ATM inteiras contendo SDU(s).

Os gráficos de vazão na camada de aplicação, Figura 5.6 a 5.11 letra b), mostram o aumento linear com número de terminais, pelo menos até 95% de utilização do canal.

Adicionalmente, observando a coincidência das curvas de vazão, é possível concluir que os mecanismos de requisição de banda não influenciam na vazão sempre que a utilização do canal não ultrapasse 95%. Comportamento idêntico foi obtido em [2].

Os gráficos de utilização do canal mostram um aumento mais rápido dessa em sistemas que utilizam mecanismos de requisição de banda com *piggyback* contínuo. De fato, a utilização do canal num sistema que utiliza esse mecanismo inclui o tráfego de células ATM nulas e, tão logo a carga aumente, o número de conexões no estado *ContinuousPiggyback* irá começar a diminuir devido ao aumento da probabilidade de eventos *grantTimeout*. Dessa modo, células nulas serão gradualmente substituídas por células com carga de dados pertencentes a conexões ativas.

Finalmente, foi observado (não mostrado) que o tráfego de controle de descida representa, aproximadamente, apenas 4% da capacidade de transmissão da subcamada MAC de descida.

5.5.4 - Análise dos intervalos de confiança

Os intervalos de confiança dos resultados foram obtidos utilizando a Equação 5.6 que apresenta a probabilidade do valor da média da população estar contido no intervalo de confiança, em torno da média das amostras.

$$P\left[\bar{X} - z_{1-\alpha/2} \times \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} \leq E[\mathbf{X}] \leq \bar{X} + z_{1-\alpha/2} \times \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}}\right] = 1 - \alpha \quad (5.6)$$

onde:

\bar{X}	– média das amostras;
σ_X	– desvio padrão das amostras;
$E[\mathbf{X}]$	– média da população;
n	– número de amostras;
$z_{1-\alpha/2}$	– $(1 - \alpha/2)$ -quartil da variável aleatória normal $\mathbf{N}(0, 1)$;
$1 - \alpha$	– coeficiente de confiança de $E[\mathbf{X}]$;
$2 \times z_{1-\alpha/2} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	– intervalo de confiança.

A Equação 5.7 calcula o número mínimo de amostras necessárias para se obter uma precisão média de r na estimativa da média da população, dado um nível de confiança de $100(1 - \alpha)$.

$$n = \left\lceil \left(\frac{z_{1-\alpha/2} \times \sigma_X}{r \times \bar{X}} \right)^2 \right\rceil \quad (5.7)$$

Todos os resultados apresentados na seção 5.5.2 correspondem a valores médios de 5 (cinco) amostras, cada qual obtido após o término de uma corrida da simulação. Os intervalos de confiança do retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação foram calculados utilizando a Equação 5.6, que relaciona a média da população com a média e o desvio padrão das amostras. As Figuras 5.12 e 5.13 mostram os intervalos de confiança dos retardos médios fim-a-fim dos esquemas de acesso ao meio MAS1, MAS2 e MAS3 com tráfego exponencial nos cenários NLOS e LOS, respectivamente.

O cálculo do intervalo de confiança de cada ponto permitiu concluir que o intervalo de valores que a variável aleatória considerada pode assumir com 95% de chance é pequeno, sempre que a carga do sistema for inferior a 90%.

5.5.5 - Validação dos resultados

Para validar os resultados obtidos foi utilizado o modelo de filas $M/M/c$ onde c corresponde ao número de servidores e M à distribuição de probabilidade exponencial referente aos tempos entre chegadas e os tempos de atendimento do sistema [80]. A Figura 5.14 mostra a comparação dos resultados de retardo obtidos com aqueles teóricos previstos para sistemas $M/M/c$, possuidores de idênticos fatores de carga e tempo médio de serviço. O número de servidores considerado corresponde ao número máximo de conexões que podem ser atendidas por uma mensagem *<MAC> Reservation Grant Message*, ou seja, 255. Esse número pode ser considerado um limite superior pois eventualmente alguns recursos (*slots*) podem ser reservados para a transmissão de mensagens de controle.

Como o modelo $M/M/c$ não considera a sobrecarga e o retardo das mensagens de

controle, o retardo médio fim-a-fim do sistema real deve ser sempre superior ao obtido com esse modelo.

5.5.6 - Cálculo da capacidade do sistema

A capacidade do sistema é expressa pelo número máximo de usuários que o sistema é capaz de servir satisfazendo todos os seus requisitos de QoS e QoE. Para realizar o cálculo da capacidade, foi assumido que o gargalo do sistema é o canal de retorno. Portanto, apenas o tráfego de subida de cada usuário foi considerado. Dessa forma, utilizando os resultados de retardo anteriormente apresentados, o número máximo de usuários ativos por célula pode ser obtido limitando-se o valor máximo do retardo médio por usuário em 500 ms [81], no caso de cenário LOS, e em 1 s, no caso NLOS. Finalmente, baseando-se na porcentagem da população que é assinante do sistema [21], na porcentagem de assinantes que estão ativos por célula para diferentes áreas (rural, metropolitana e urbana) [21] e no raio das células (veja Tabelas 5.5 e 5.6), a capacidade do sistema DVB-T/RCT de servir seus usuários espalhados por sua área cobertura em termos da máxima densidade de população por km^2 é calculada. A análise desses resultados permite determinar em que condições e configurações é adequada ou não a utilização do canal de interatividade intrabanda baseado no padrão DVB-RCT em cada um dos supracitados cenários como solução tecnológica para prover o canal de interatividade.

Primeiramente, calculou-se a densidade de usuários ativos por célula que deve ser alcançada, para garantir que o serviço seja oferecido a todos os assinantes do sistema. De acordo com um estudo realizado [21], geralmente 10% da população de uma área é assinante. Dentro desse universo, o percentual de assinantes, simultaneamente ativos, é função da localização da área, sendo igual à 2% para áreas rurais, 5% para áreas metropolitanas e 8% para áreas urbanas. A densidade populacional nas áreas rurais, metropolitanas e urbanas é igual a 100, 1000 e 5000 habitantes por km^2 , respectivamente. Efetuando-se os cálculos, obtêm-se uma densidade mínima de 0,2 (rural), 5 (metropolitana) e 40 (urbana) usuários ativos por km^2 na área de cobertura do sistema.

A Tabela 5.10 apresenta a densidade de usuários ativos na área de cobertura do sistema.

Esses usuários podem ser atendidos pelo sistema com a qualidade de serviço/experiência requerida pelos usuários e especificada em termos do retardo máximo. Além da densidade de usuários, a Tabela 5.10 contém o raio máximo da célula considerando o modo de transmissão mais robusto (QPSK 1/2) e o número máximo de usuários que o sistema permite atender com qualidade de serviço nos cenários LOS e NLOS.

No caso de propagação em linha de visada, é possível observar que o raio máximo de célula é proporcional ao ganho de concentração dos esquemas de acesso ao meio. Dessa forma, há uma solução de compromisso entre o número de *slots* simultaneamente alocados a um dado RCTT e a área de cobertura do canal de interatividade DVB-RCT. Durante as simulações, foi observado que o número médio de *slots* simultaneamente alocados por RCTT diminui quando a carga do sistema aumenta. No caso sem linha de visada, o raio máximo é praticamente o mesmo devido ao modelo de propagação adotado.

Tabela 5.10 - Densidade de usuários de uma célula DVB-T/RCT, de acordo com o cenário de propagação, raio da célula e número máximo de usuários

Especificação	Esquema de Acesso ao Meio					
	MAS1		MAS2		MAS3	
Visada	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS
Raio máximo da célula	3,300	58,045	3,210	50,084	3,408	35,119
Número de usuários	-	1060	610	1020	630	920
Densidade de usuários ¹	-	0,121	22,786	0,156	20,874	0,287

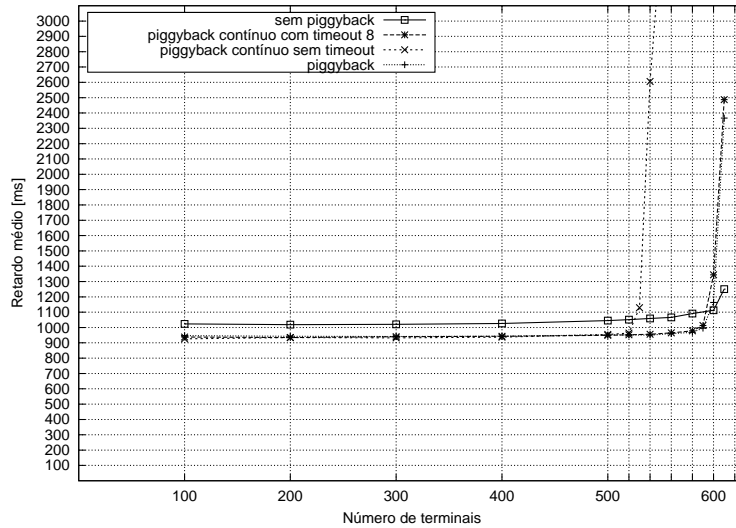
¹ Cada valor foi obtido dividindo o número de usuários pela área da célula hexagonal

5.6 - CONCLUSÃO

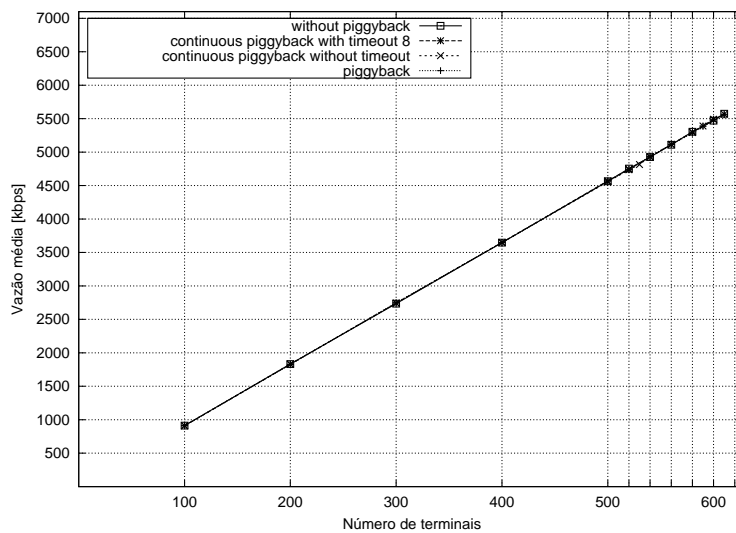
Este Capítulo apresentou os resultados da avaliação de desempenho do DVB-T/RCT para tráfego exponencial em cenários com e sem linha de visada. Para concluir sobre a adequabilidade da capacidade do DVB-RCT, foram utilizadas as densidade populacionais encontradas em áreas rurais, metropolitanas e urbanas, conforme consta em relatório [21]. Também foram fixados os valores máximos do retardo e a distribuição de modos de transmissão de acordo com o cenário considerado.

Considerando a distribuição de modos de transmissão, os requisitos de retardo máximo

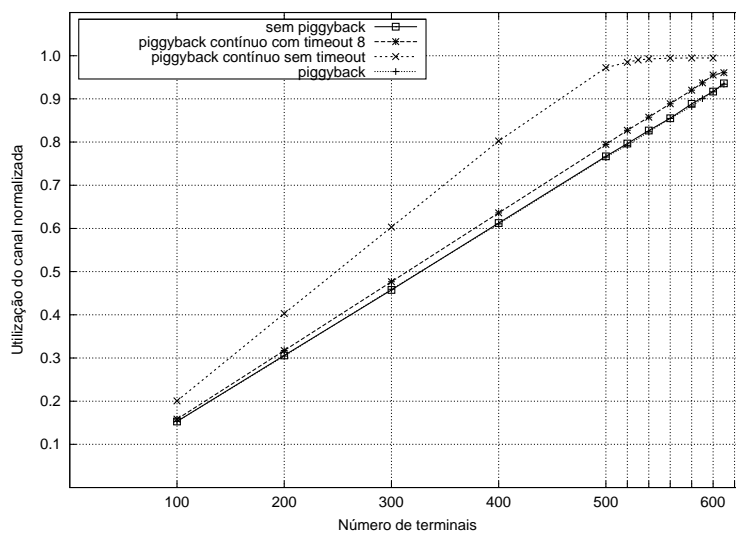
estabelecidos e as densidades mínimas calculados nas seções anteriores, é possível concluir que sistemas celulares constituídos por células DVB-T/RCT compostas por um ou, no máximo, dois setores são adequados para implantação do canal de interatividade intrabanda em áreas rurais, metropolitanas e urbanas.



(a) Retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação.

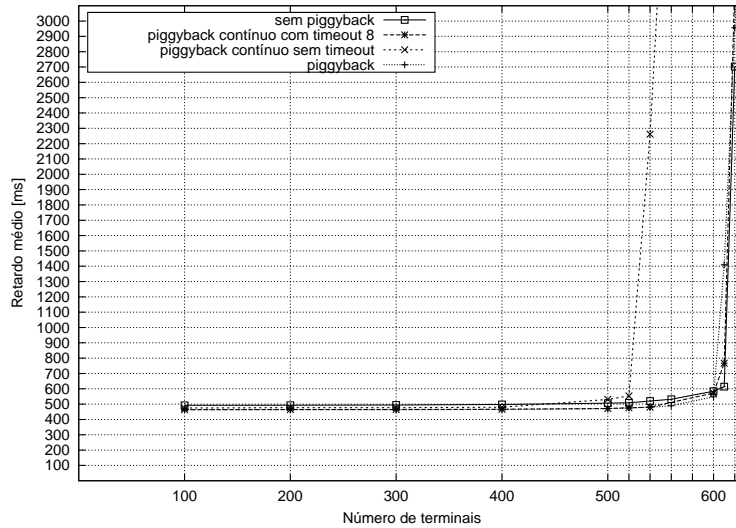


(b) Vazão média na camada de aplicação.

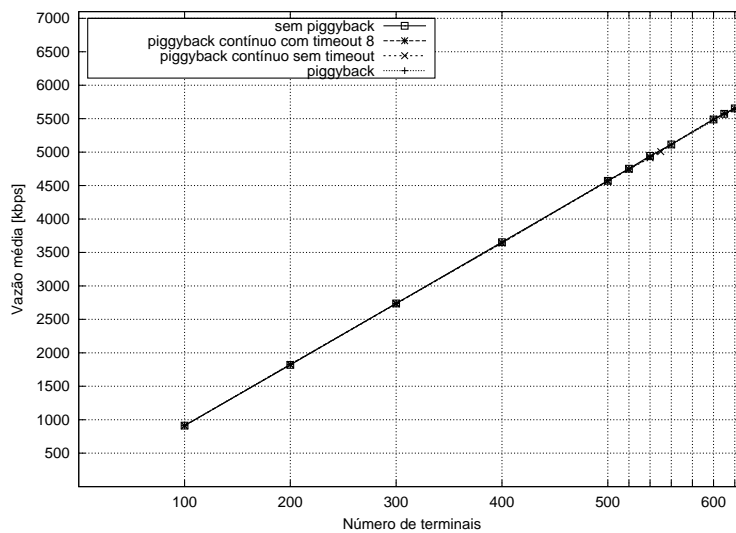


(c) Utilização média do canal na subcamada MAC.

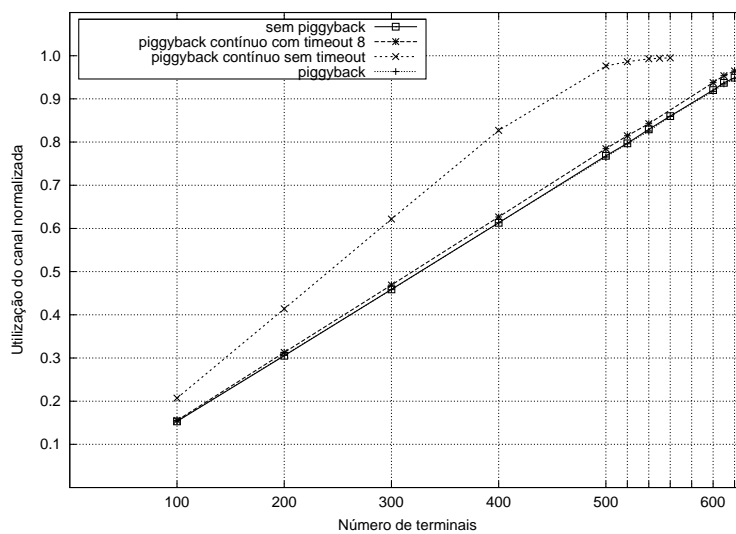
Figura 5.6 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS1 no cenário NLOS com tráfego exponencial.



(a) Retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação.

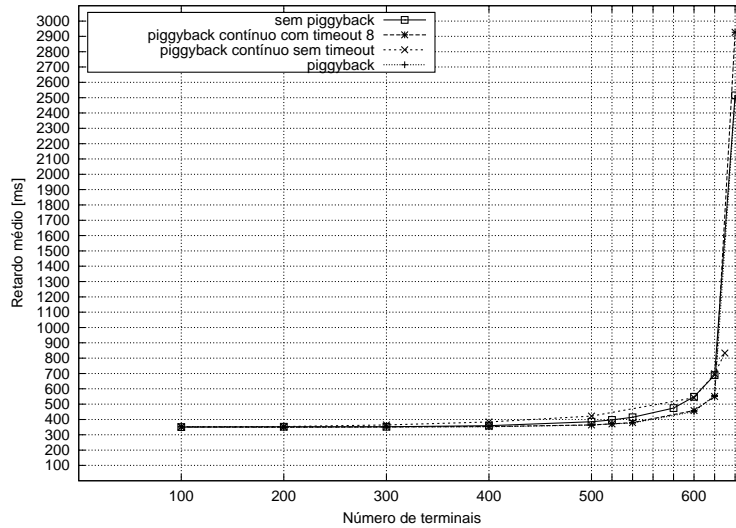


(b) Vazão média na camada de aplicação.

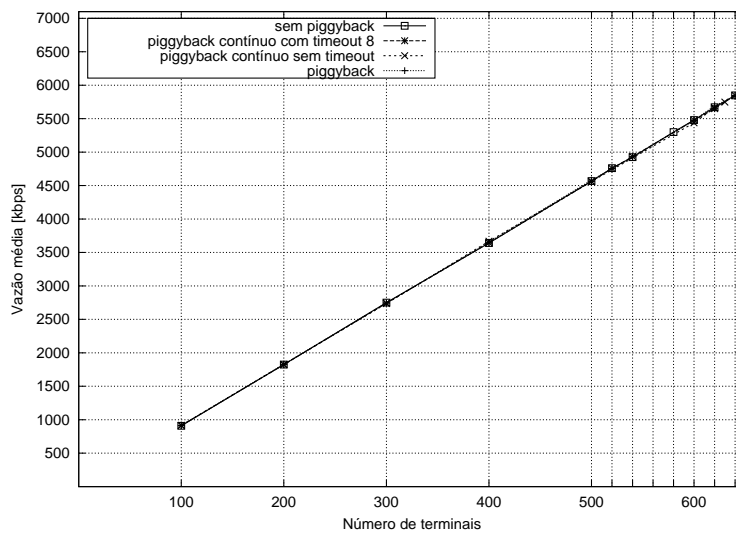


(c) Utilização média do canal na subcamada MAC.

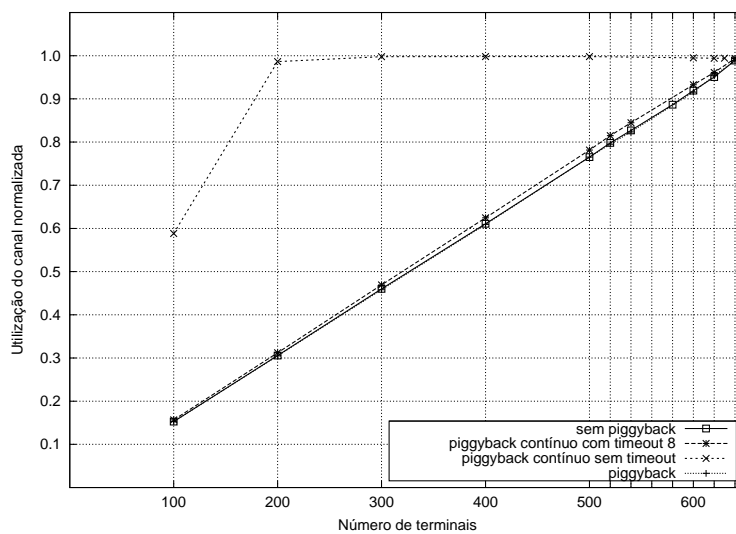
Figura 5.7 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS2 no cenário NLOS com tráfego exponencial.



(a) Retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação.

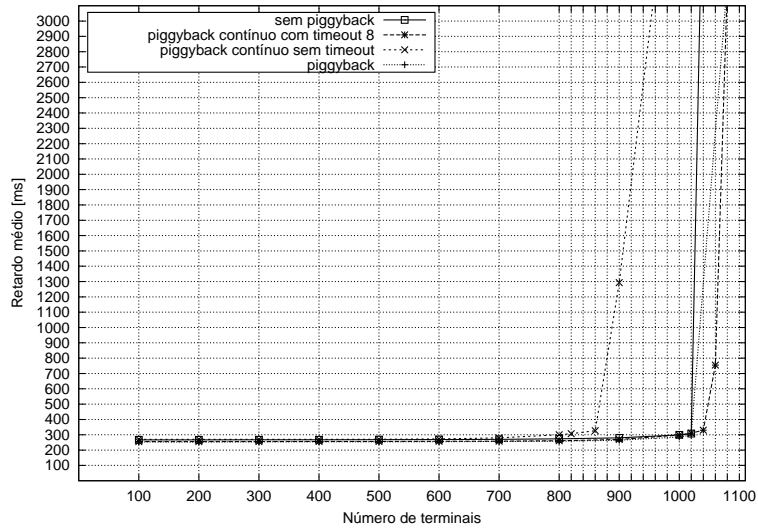


(b) Vazão média na camada de aplicação.

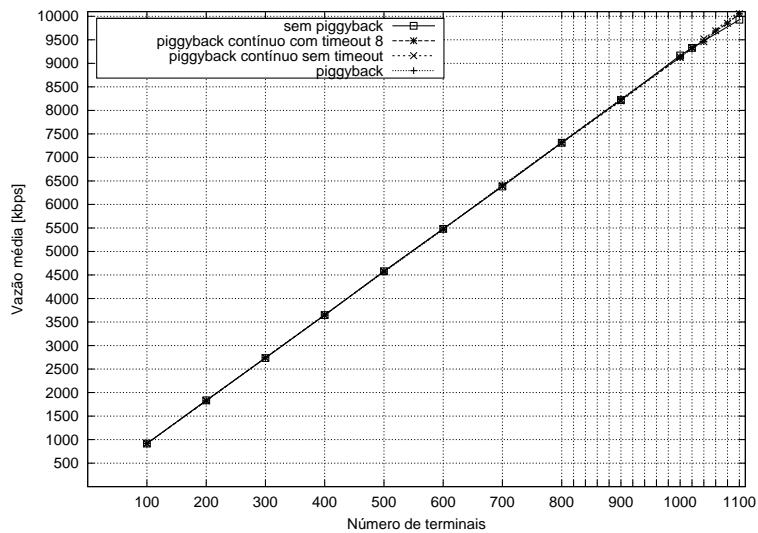


(c) Utilização média de canal na subcamada MAC.

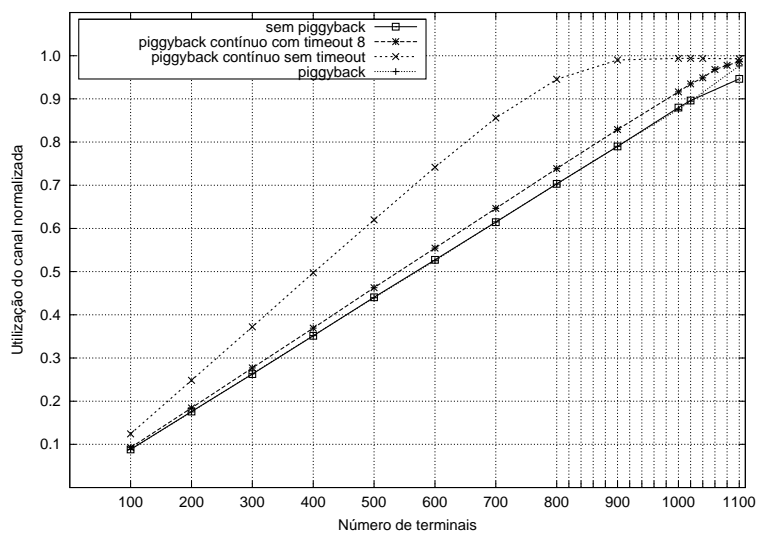
Figura 5.8 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS3 no cenário NLOS com tráfego exponencial.



(a) Retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação.

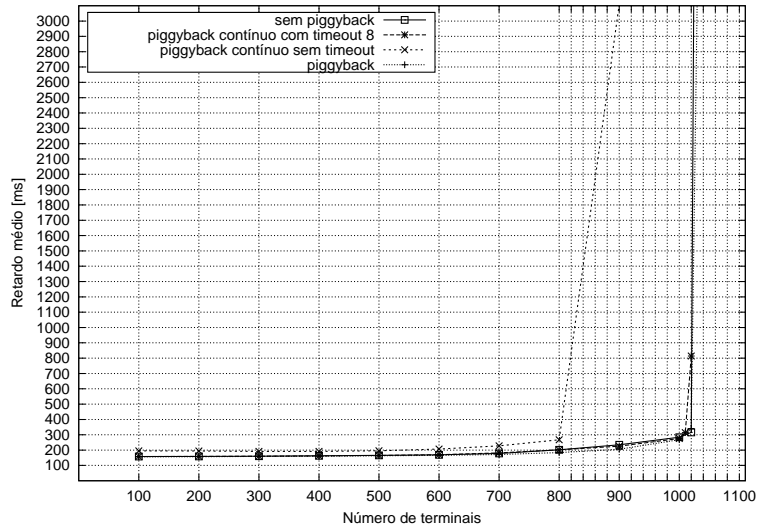


(b) Vazão média na camada de aplicação.

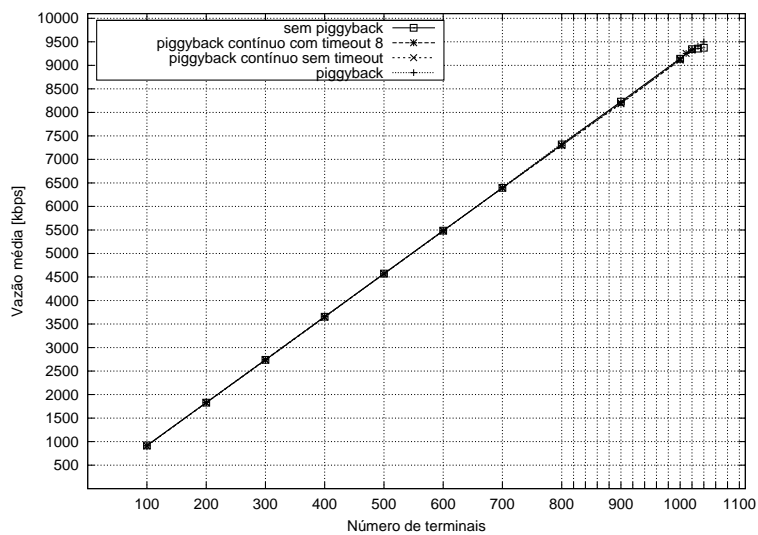


(c) Utilização média do canal na subcamada MAC.

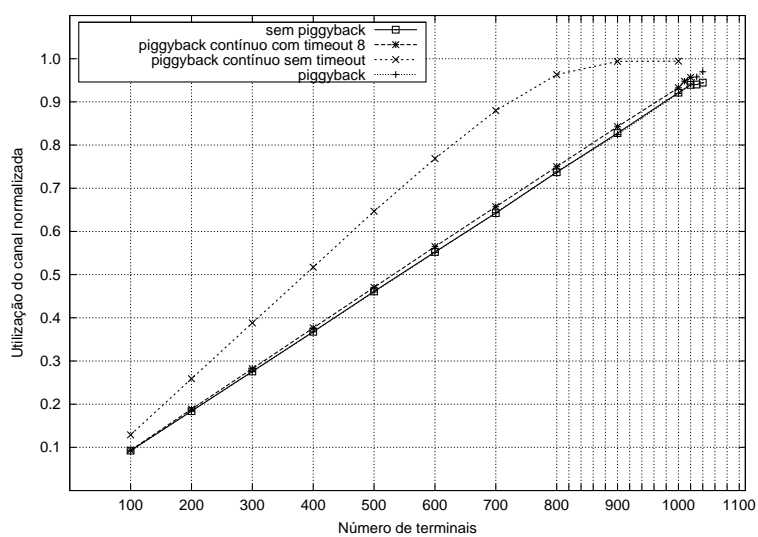
Figura 5.9 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS1 no cenário LOS com tráfego exponencial.



(a) Retardo média fim-a-fim na camada de aplicação.

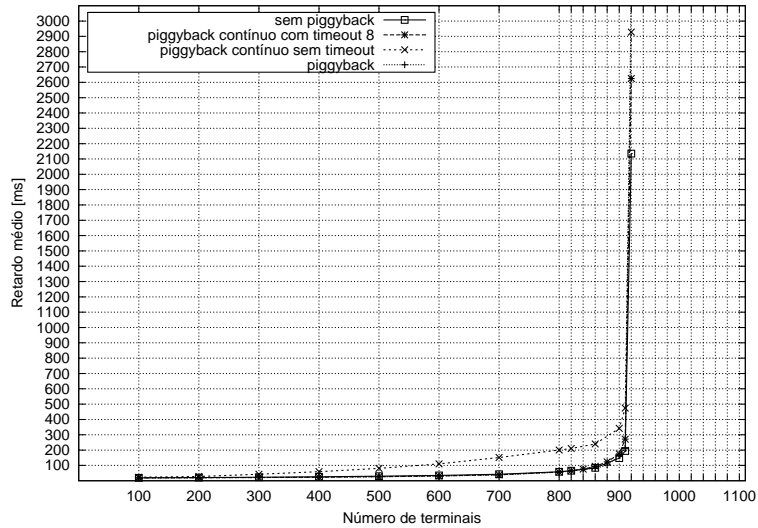


(b) Vazão média na camada de aplicação.

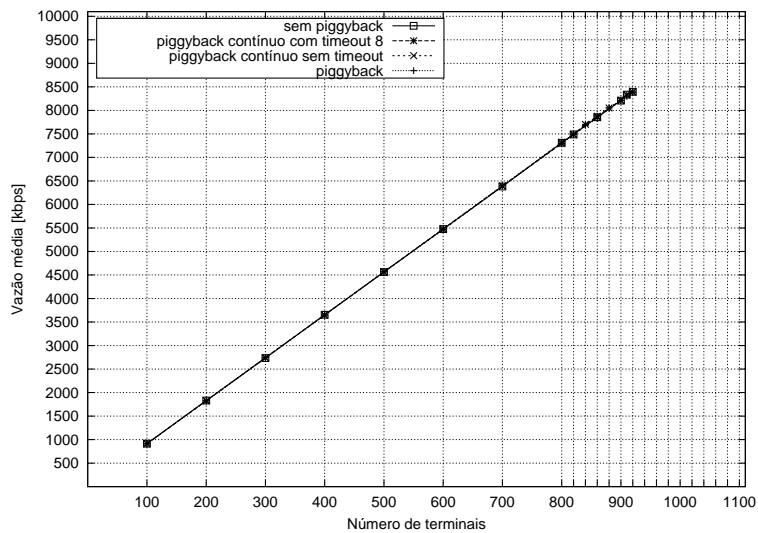


(c) Utilização média do canal na subcamada MAC.

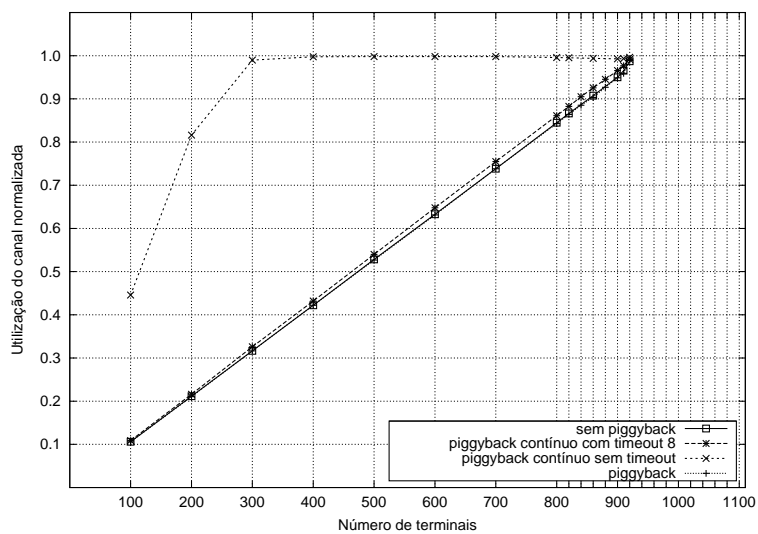
Figura 5.10 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS2 no cenário LOS com tráfego exponencial.



(a) Retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação.

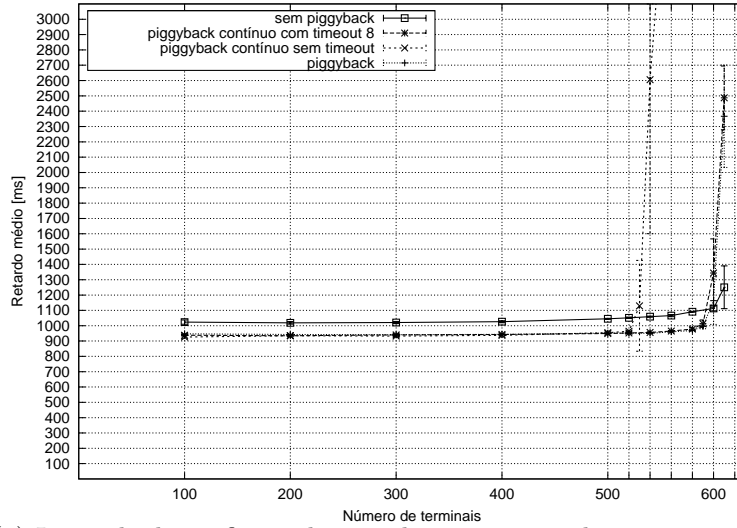


(b) Vazão média na camada de aplicação.

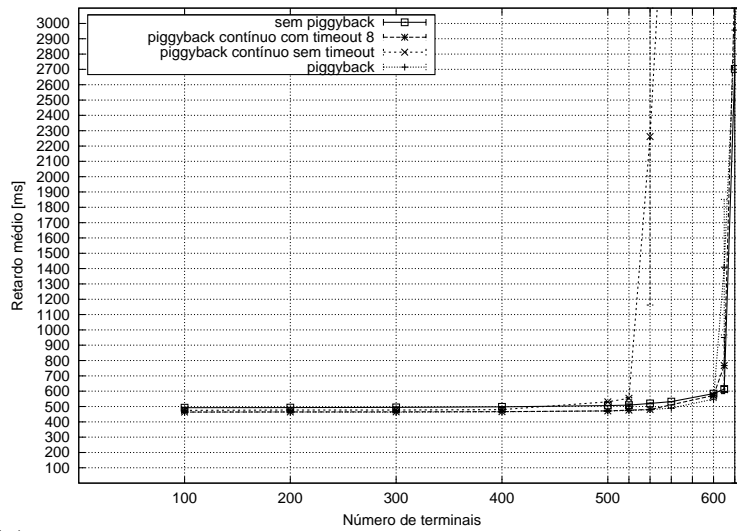


(c) Utilização média do canal na subcamada MAC.

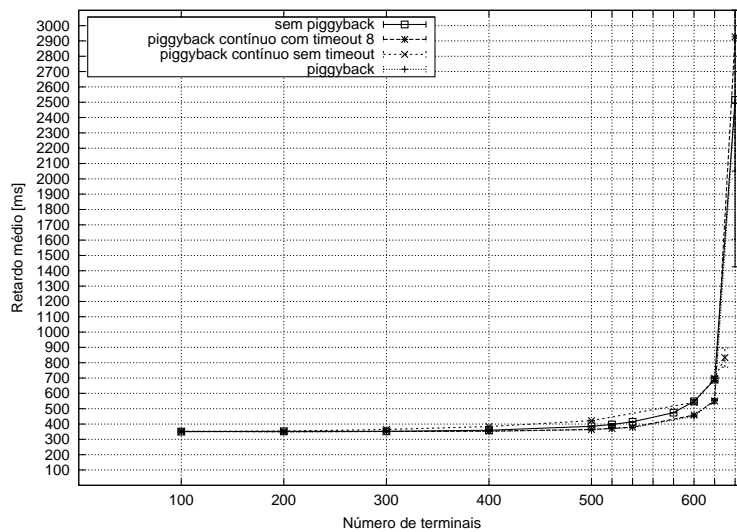
Figura 5.11 - Desempenho do esquema de acesso ao meio MAS3 no cenário LOS com tráfego exponencial.



(a) Intervalo de confiança do retardo no esquema de acesso ao meio MAS1.

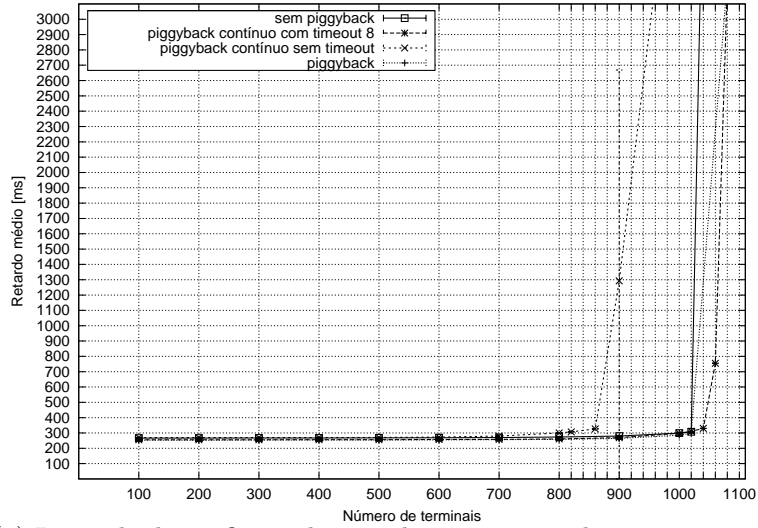


(b) Intervalo de confiança do retardo no esquema de acesso ao meio MAS2.

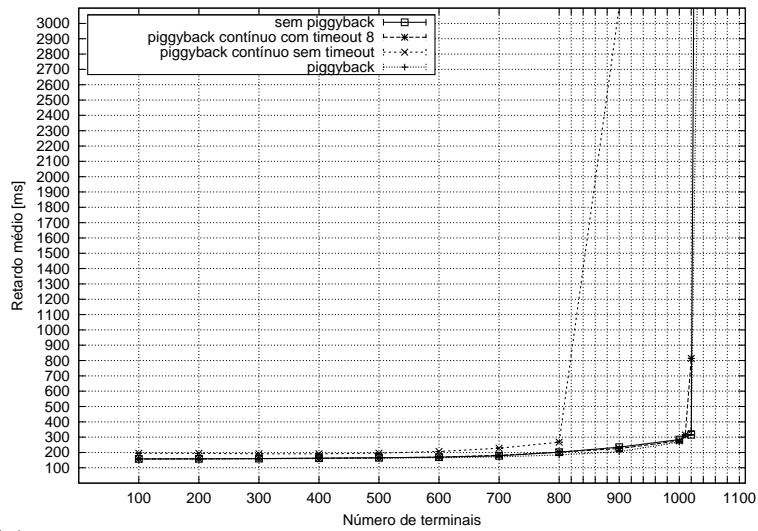


(c) Intervalo de confiança do retardo no esquema de acesso ao meio MAS3.

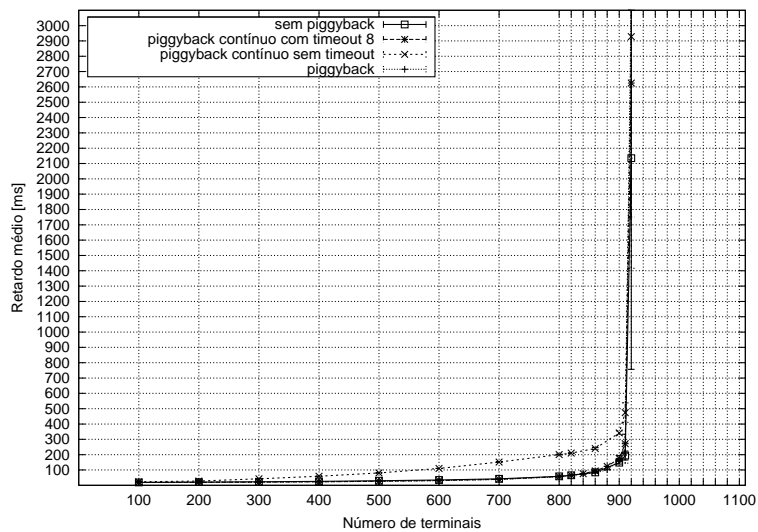
Figura 5.12 - Intervalos de confiança do retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação no cenário NLOS com tráfego exponencial.



(a) Intervalo de confiança do retardo no esquema de acesso ao meio MAS1.

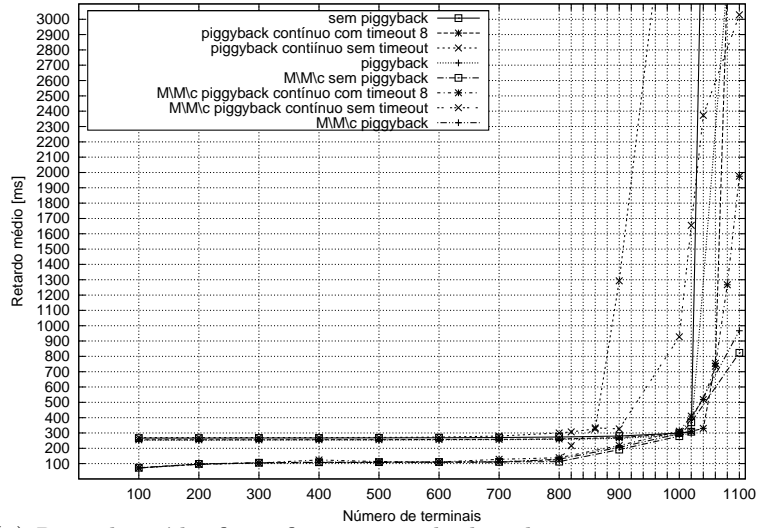


(b) Intervalo de confiança do retardo no esquema de acesso ao meio MAS2.

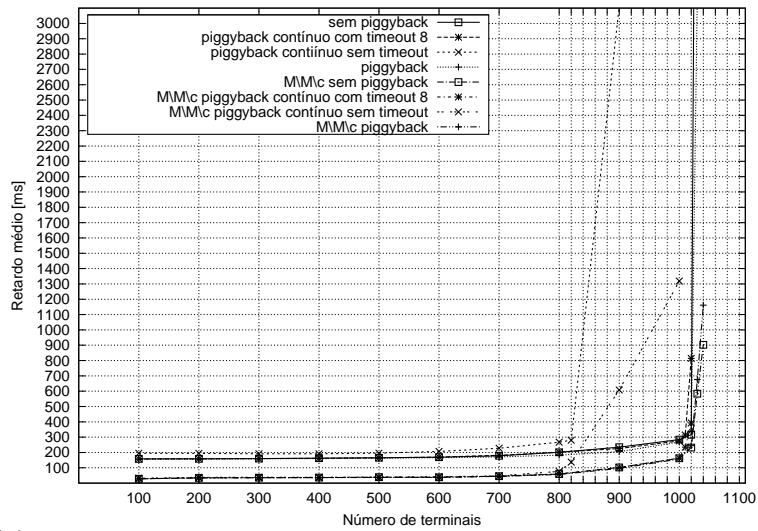


(c) Intervalo de confiança do retardo no esquema de acesso ao meio MAS3.

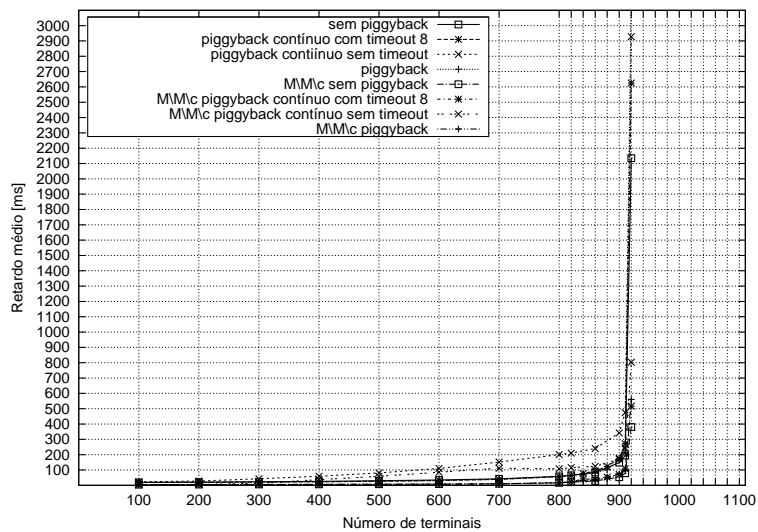
Figura 5.13 - Intervalos de confiança do retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação no cenário LOS com tráfego exponencial.



(a) Retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação no esquema de acesso ao meio MAS1.



(b) Retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação no esquema de acesso ao meio MAS2.



(c) Retardo médio fim-a-fim na camada de aplicação no esquema de acesso ao meio MAS3.

Figura 5.14 - Comparação dos resultados de retardo médio fim-a-fim obtidos com aqueles gerados em um sistema $M/M/c$ com mesmo fator de carga e tempo médio de serviço no cenário LOS e tráfego exponencial.

6 - COMPARAÇÃO DOS DESEMPENHOS DOS PADRÕES DVB-RCT E WIMAX

Neste capítulo são comparados os desempenhos dos padrões DVB-RCT e WiMAX fixo, em sistemas celulares limitados pelo ruído, ou seja, constituídos por uma única célula ou por várias células suficientemente distantes entre si, de modo a tornar a interferência entre células desprezível. Essa comparação baseou-se em resultados referentes ao padrão WiMAX fixo, previamente publicados [2]. Estes resultados são particularmente úteis pois foram obtidos utilizando parâmetros de sistema usuais em aplicações de radiodifusão tais como modo ponto-multiponto, duplexação por divisão de frequência e transmissão full-duplex, tanto na estação base como nos terminais.

Para facilitar a comparação entre resultados, a abordagem utilizada foi simular o sistema DVB-T/RCT usando os mesmos parâmetros utilizados na simulação do WiMAX fixo [2], tais como tipo de fonte de tráfego, distribuição dos modos de transmissão (MCS), quantidade de portadoras, intervalo de guarda, largura de banda, modelo de propagação, frequência de operação entre outros. Também, foi proposta uma correção no modelo de fonte de tráfego *Web*, utilizado em [2], com base em observações contidas em [82].

6.1 - TRABALHOS RELACIONADOS

O desempenho do padrão WiMAX fixo tem sido intensamente pesquisado, especialmente de sua camada física OFDMA, em virtude da grande demanda por redes metropolitanas de acesso sem fio. Um resumo sobre o assunto pode ser visto em [26]. Comparativamente, a quantidade de trabalhos relacionados à subcamada MAC ainda é pequena. Tal fato se deve, em grande parte, à complexidade das máquinas de estados finitos e à omissão do padrão quanto a pontos importantes necessários para implementação tais como escalonamento e adaptação dinâmica de modulação e taxa de código.

Em [16] foi analisado o desempenho da subcamada MAC, usando uma camada física OFDM-TDD e tráfego CBR com tamanho fixo de carga útil de 381 bytes. Este tamanho

de carga útil foi considerado ótimo, em virtude de maximizar a vazão ao mesmo tempo em que minimiza a sobrecarga de controle (*overhead*). O cenário era constituído por uma única estação base WiMAX, operando na frequência de 5 GHz, banda de 20 MHz, tempo de quadro de 10 ms e usuários uniformemente distribuídos pela área de cobertura utilizando modulação e taxa de código compatíveis com uma taxa de erro de bit residual constante e igual a 10^{-5} . A vazão máxima foi de 10 Mbps, com 15 usuários, e o retardo não foi indicado.

No Brasil, fruto das pesquisas realizadas para escolha do WiMAX fixo para prover o canal de interatividade intrabanda, diversos trabalhos foram publicados [83] [14] [84]. Particularmente, em [83] foram apresentados resultados de simulação baseados em diversos cenários de tráfego utilizando a camada física OFDM-TDD em um canal com largura de banda de 3,5 MHz. A capacidade obtida de uma célula com um único setor foi de aproximadamente 550 usuários para retardos inferiores a 5 segundos e taxa de transmissão de dados acima de 5 kbps.

Em outro trabalho [2], foi utilizada a camada física OFDM-FDD e fontes de tráfego ON/OFF exponencial para avaliar o desempenho do sistema em termos de retardo e vazão na camada de aplicação. Para simplificar a simulação, a camada física foi suposta livre de erros. Todavia, a implementação da camada de enlace foi mais detalhada pois incluiu algoritmos de escalonamento, tanto para o canal de descida como de subida (retorno), e o controle de acesso ao meio por contenção usando o algoritmo de recuo binário exponencial. Nos resultados de retardo e vazão apresentados, cada terminal e estação base poderiam ter um número variável de conexões e cada conexão poderia transportar o tráfego agregado produzido por um número variável de fontes básicas. Dependendo da duração de quadro, foram obtidas vazões de até 1,2 Mbps no canal de retorno com 7 MHz de banda e retardo superiores a 175 ms para 40 terminais de assinante, cada um gerando dados a uma taxa de 24,5 kbps.

Em [17], foram comparados o desempenho em termos de vazão do WiMAX, modo OFDMA-TDD, e do padrão HSDPA. Os resultados indicam que o WiMAX possui maior eficiência espectral que o HSDPA para vazão semelhante no canal de descida. No canal de retorno foram alcançadas vazões de 250 kbps para até 15 usuários.

6.2 - PARÂMETROS DO SISTEMA WIMAX FIXO

Das configurações utilizadas nos trabalhos relacionados, a de [2] é a que mais se aproxima do modelo de referência apresentado no Capítulo 2 quando estiver sendo utilizado um canal de interatividade intrabanda. A Tabela 6.1 apresenta os valores dos principais parâmetros utilizados na simulação do sistema WiMAX fixo cujo desempenho será comparado com o do sistema DVB-T/RCT. Com exceção da taxa de código, que foi informada pelo autor em contato direto por mensagem eletrônica, os demais parâmetros foram obtidos diretamente no trabalho mencionado. Com relação à modulação adaptativa, baseando-se em resultados apresentados em [16], foi assumida a existência de uma proporção entre o número de SS empregando cada uma das modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Nesse caso, não é necessário adotar nenhum modelo específico de propagação, normalmente válido apenas em uma determinada faixa de frequência, pois o resultado final da aplicação desse modelo, que é a distribuição dos modos de transmissão na área de cobertura da célula, já foi especificado.

Tabela 6.1 - Valores dos parâmetros da camada física e da subcamada MAC do padrão WiMAX fixo utilizados em [2]

Parâmetros	Valores
Largura de banda do canal	7 MHz
Duração de símbolo OFDM ($T_s = T_u + T_g$)	34 μ s
Intervalo de guarda (T_g)	2 μ s
Duração de quadro	5 ms, 10 ms, 20 ms
Tempo inicial de alocação no uplink	duração de um quadro
Request backoff start	4 ($cw = 16$)
Request backoff end	10 ($cw = 1024$)
Temporizador para detecção de colisão de requisição de banda por contenção	50 ms
Taxa de código	3/4
Taxa de erro de bit da camada física	livre de erros
Modulação adaptativa	(4x) QPSK (2x) 16-QAM (1x) 64-QAM

Os valores dos parâmetros utilizados pelo DVB-T/RCT foram listados nas Tabelas 5.1 e 5.2 do Capítulo anterior referentes a um canal de 7 MHz.

6.3 - MODELO DA FONTE DE TRÁFEGO

Para realizar a comparação do DVB-T/RCT com o WiMAX fixo, um modelo de fonte de tráfego *Web* baseado em medições de tráfego *http* na Internet [82] foi usado para se

obter o desempenho do sistema DVB-T/RCT em termos do retardo e vazão médios. As características desse modelo são apresentadas na Tabela 6.2.

O modelo usado neste trabalho é diferente modelo de fonte tráfego *Web* utilizado para avaliação de desempenho do WiMAX fixo [2] embora seja também baseado nos resultados publicados em [82]. Os autores de [2] utilizaram os parâmetros c (média) e σ (desvio padrão) obtidos a partir da média e desvio padrão do logaritmo das amostras de dados que haviam sido utilizadas com o propósito de ajuste da distribuição [82]. Infelizmente, essa abordagem resulta numa média geométrica das amostras de dados que é em geral diferente de sua média aritmética empírica. Diferentemente de [2], este trabalho adotou a sugestão de [82] para se obter uma aproximação lognormal não polarizada pela média (*mean-unbiased*). Durante as simulações, observou-se que as amostras dessa fonte de tráfego possuem maiores valores de variância e, portanto, pelo menos teoricamente, deveriam determinar um pior desempenho em termos de retardo nos sistemas com elas carregados. Todavia, verificou-se que os resultados obtidos com os dois tipos de fonte foram semelhantes.

Tabela 6.2 - Especificação das distribuições, parâmetros e taxa da fonte de tráfego *Web*

Especificação	Tamanho de objecto	Objetos por página	Tempo entre chegadas
Distribuição	Lognormal	$0,5\delta(x-1)+\text{lognormal}$	Weibull
Parâmetros	$c=5,2555$	$c=0,42705$	$c=0,9788$
	$\sigma=1,2133$	$\sigma=1,6679$	$\sigma=0,8636$
Taxa média da fonte	24,5 kbps		

6.4 - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, o retardo médio do enlace de subida do sistema DVB-T/RCT é mostrado na Figura 6.1. Apenas o esquema de acesso ao meio MAS3 foi utilizado porque possui o menor ganho de concentração (ver Tabela 5.3) e, portanto, próximo àquele fornecido pela camada física OFDM-TDD do WiMAX fixo de referência sem subcanalização, ou seja, nenhum. Desse modo, ambos os sistemas permitem obter áreas de cobertura e qualidade de serviço semelhantes. É possível observar que o modo de transmissão sem pedido de carona permite menor retardo médio que o modo com pedido de carona. Esse

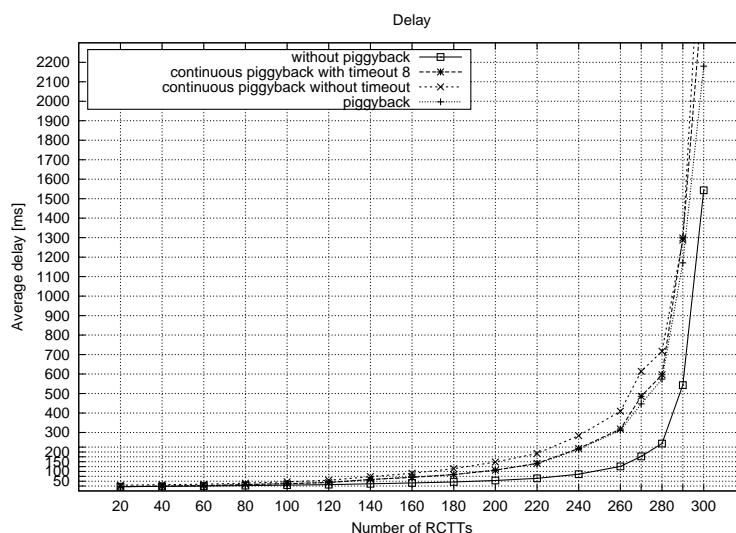


Figura 6.1 - Retardo médio do sistema DVB-T/RCT carregado com fontes de tráfego Web

comportamento é devido à predominância dos modos de transmissão com tamanhos de salvias menores que o tamanho da célula ATM tais como QPSK 3/4.

Com base na Figura 6.1, observa-se que o DVB-T/RCT suporta até 280 RCTTs, a uma taxa de 24,5 kbps, antes que o retardo médio aumente sem limites. A se confirmar o resultado publicado em [2], o número de usuários atendidos pelo sistema DVB-T/RCT, carregado com fontes de tráfego *Web* e utilizando o acesso ao meio por *ranging* e reserva, é sete vezes maior que o do WiMAX fixo. Esse resultado poderia ter sido ainda melhor caso o intervalo de guarda utilizado no DVB-RCT (1/4) fosse igual ao do WiMAX fixo (1/8).

As curvas da Figura 6.2 mostram o aumento linear típico da vazão com o número de RCTTs (carga oferecida). Independentemente do mecanismo de requisição de reserva utilizado, as curvas apresentam formas idênticas. A máxima vazão obtida foi de quase 7000 kbps. Conseqüentemente, caso seja confirmado o resultado apresentado em [2], a vazão da camada de aplicação no enlace de subida do sistema DVB-T/RCT é quase seis vezes maior que a verificada no sistema WiMAX fixo. Com esse resultado, a eficiência espectral relativa à taxa de transmissão de dados (vazão) da camada de aplicação do DVB-RCT é aproximadamente 1 bit/s/Hz.

Infelizmente os resultados obtidos nesse Capítulo não são conclusivos pois:

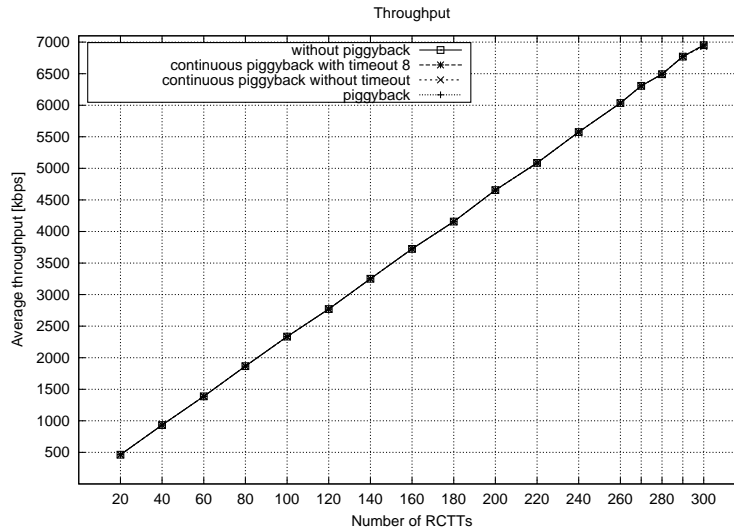


Figura 6.2 - Vazão média do sistema DVB-T/RCT carregado com fontes de tráfego *Web*

- os resultados obtidos no Capítulo 3 de [60] indicam que, pelo menos teoricamente, a camada física do WiMAX fixo possui uma eficiência espectral maior que a camada física do DVB-RCT;
- os mecanismos utilizados para requisição de banda são diferentes: contenção em $BW_{min} slots$ no caso do sistema WiMAX fixo de referência [2] e subcanal dedicado para *ranging* no sistema DVB-T/RCT;e
- finalmente, na Seção 4.1 de [2] foi encontrada uma inconsistência pois é assumido que a menor unidade de tráfego é 147 Kbps, referente à agregação de seis fontes *Web*, mas a Figura 2 mostra que a vazão de $S = N = 10$ é 245 Kbps e não 1470 Kbps. Dessa forma, os resultados do WiMAX fixo seriam cerca de seis vezes maiores que os apresentados por [2], levando à conclusão, neste caso, da equivalência aproximada de desempenho dos dois sistemas.

6.5 - CONCLUSÃO

Este Capítulo apresentou uma comparação entre os desempenhos do DVB-RCT e WiMAX fixo com resultados favoráveis ao primeiro em relação aos resultados publicados do último [2] tanto em termos de retardo como de vazão. Essa comparação se baseou nos valores de parâmetros apresentados nas Tabelas 6.1(WiMAX), 5.1 (DVB-T)

e 5.2 (DVB-RCT). Para facilitar a comparação, o mesmo modelo de fonte de tráfego baseado em [82] foi utilizado.

Todavia, os resultados obtidos nesse Capítulo não são conclusivos em virtude da existência de resultados teóricos comparando a eficiência espectral dos padrões [60], de diferenças na implementação dos padrões e de inconsistência encontrada no trabalho escolhido como referência [2].

7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste Capítulo, primeiramente serão realizadas deduções lógicas baseadas e fundamentadas no texto e decorrentes da pesquisa. Em seguida serão feitas recomendações e sugestões resultantes do trabalho que deverão ser objetos de pesquisas futuras.

7.1 - CONCLUSÕES

As contribuições que foram propostas nesse trabalho estão todas relacionadas à tecnologia OFDMA: um modelo analítico para cálculo da distribuição de probabilidades de colisão de subportadoras e do ganho de processamento, um modelo analítico para cálculo da interferência co-canal em sistemas celulares, a avaliação de desempenho do padrão DVB-RCT e a comparação dos desempenhos dos padrões DVB-RCT e WiMAX. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- os modelos analíticos propostos para estudo da interferência em sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA podem ser utilizados tanto para dimensionar tais sistemas como para simplificar simulações de desempenho das camadas de aplicação desses sistemas;
- em virtude da interferência na célula vítima depender da carga nas células co-canais adjacentes, o dimensionamento de sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA deve considerar o valor médio da carga naquelas células;
- em relação ao desempenho do DVB-RCT, foram obtidos resultados significativos mostrando o aproveitamento quase total da capacidade de transmissão da subcamada MAC. Tal fato ressalta as excelentes qualidades do acesso por reserva e *ranging*;
- comparando os quatro mecanismos de requisição de banda para acesso ao meio por reserva no DVB-RCT, foi observado que o mecanismo com *piggyback* puro possui um desempenho melhor que os mecanismos com *piggyback* contínuo, com ou sem expiração de temporizador. O mecanismo de requisição com *piggyback*

também demonstrou ser superior ao mecanismo de requisição de banda sem *piggyback*;

- considerando o resultado de desempenho de um sistema baseado no padrão WiMAX fixo em um canal com 7 MHz de largura de banda [2], o sistema DVB-T/RCT demonstrou a grande vantagem na utilização da banda disponível medida, tanto em termos de retardo médio como de vazão, ambos medidos na camada de aplicação. Todavia, esse resultado não é conclusivo em virtude da existência de resultados teóricos comparando a eficiência espectral dos padrões, de diferenças na implementação dos padrões e de inconsistência encontrada no trabalho escolhido como referência [2]; a se confirmar os resultados apresentados em [2], o DVB-RCT suportaria um número sete vezes maior de usuários que o WiMAX fixo. Por outro lado, na possibilidade de erro nessa referência, conforme discutido anteriormente no Capítulo 6, os desempenhos seriam aproximadamente equivalentes com pequena vantagem para o DVB-RCT;
- o padrão DVB-RCT se mostra adequado para implantação do canal de interatividade intrabanda em sistemas terrestres de televisão digital interativa em virtude de poder ser utilizado em uma arquitetura celular com até dois setores por célula, não apenas em áreas rurais e comunidades não adequadamente servidas por outras redes de telecomunicações, como também em áreas metropolitanas e urbanas;
- finalmente, considerando a pequena sobrecarga do canal de descida DVB-T com tráfego de controle do canal de subida DVB-RCT, a infraestrutura disponível pode ser compartilhada, reduzindo os custos de implantação, custeio e manutenção de um canal de retorno dedicado para redes de radiodifusão.

7.2 - RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como propostas para pesquisas posteriores decorrentes deste trabalho, colocam-se as seguintes recomendações:

- verificação do desempenho do padrão DVB-RCT com outros intervalos de guarda,

com o método de acesso por contenção e com utilização de diversidade multiusuário;

- elaboração de uma metodologia para planejamento e dimensionamento de sistemas celulares baseados na tecnologia OFDMA utilizando o modelo analítico proposto para cálculo de probabilidade de colisão e interferência;
- proposta de um novo perfil para o WiMAX incorporando os esquemas de acesso ao meio do DVB-RCT;
- pesquisa de algoritmos de escalonamento e mapeamento de requisições de banda;
- utilização de fontes de tráfego auto-similares para avaliar a influência do tráfego agregado no desempenho do sistema DVB-T/RCT; e
- desenvolvimento de um modelo analítico de interferência para sistemas OFDMA com permutação ASP e SC-FDMA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Std 802.16e-2005, *Part 16: air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems*, IEEE, 28 Feb 2006.
- [2] L. L. Claudio Cicconetti e Alessandro Erta, “Performance evaluation of the IEEE 802.16 MAC for QoS support,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 6, n. 1, p. 26–37, Jan 2007.
- [3] Recommendation J.110, *Basic Principles for Worldwide Common Family of Systems for the Provision of Interactive Television Services*, ITU-T, 1998.
- [4] K. Fazel e S. Kaiser, *Multi-carrier and spread spectrum systems*. John Wiley Sons Ltd, 2003.
- [5] Std A/53, *Digital Television Standard*, Advanced Television Systems Committee, 3 Jan 2007.
- [6] Std EN 300 744, *Digital Video Broadcasting (DVB): Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television*, 1st ed., ETSI, 2001.
- [7] Std ISDB-T, *Transmission system for digital terrestrial television broadcasting*, 1st ed., ARIB, 2005.
- [8] Std EN 302 304, *Digital Video Broadcasting: Transmission System for Handheld Terminals*, 1st ed., ETSI, Nov 2004.
- [9] Std EN 301 958, *Digital Video Broadcasting (DVB): Interaction Channel for Digital Terrestrial Television (RCT) incorporating Multiple Access OFDM*, ETSI, Mar 2002.
- [10] Fernando Ituo Higashie et al, “Arquitetura de Referência do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre,” CPqD, Relatório Técnico, 10 Feb 2006.
- [11] —, “Especificação Técnica de Referência,” CPqD, Relatório Técnico, 10 Feb 2006.
- [12] —, “Modelo de Referência do Sistema Brasileiro de Televisão Digital,” CPqD, Relatório Técnico, 13 Feb 2006.

- [13] Std 802.16-2004, *Part 16: air interface for fixed broadband wireless access systems*, IEEE, 2004.
- [14] Luis Geraldo Meloni, “A new WiMAX profile for DTV return channel and wireless access,” em *IEEE Mobile WiMAX*, Mar 2007.
- [15] Marcelo Sampaio Alencar, *Televisão Digital*. Editora Érica, 2007.
- [16] Christian Hoymann, “Analysis and performance evaluation of the OFDM-based metropolitan area network IEEE 802.16,” *Computer Networks*, v. 1, n. 49, p. 341–363, 22 Jun 2005.
- [17] R. L. Fan Wangt e Amitava Ghosht, “IEEE 802.16e system performance: analysis and simulations,” em *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2005.
- [18] “Implementation guidelines for DVB terrestrial services: transmission aspects,” ETSI, Std. TR 101 190, Abr 2004, ver. 1.2.1.
- [19] Miguel Elias Mitre Campista, “Wireless Ad Hoc Networks on Underserved Communities: An Efficient Solution for Interactive Digital TV,” em *8th IFIP/IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communication Networks*, Jul 2006, p. 187–198.
- [20] “Spectrum for terrestrial return channel for interactive digital television broadcasting services operating in the VHF/UHF broadcast band,” ITU-R, Doc. 6M/13-E, Set 2003.
- [21] Rainer Lueder, “The convergence of broadcast and telecommunications platforms,” Ad hoc group DVB-UMTS, Relatório Técnico, 6 Fev 2002.
- [22] Adailton José Santos Silva, Astrid M. Carneiro Heinisch, Douglas Roberto Vicente, José Antonio Mechaileh, e Luís Geraldo Meloni, “Recomendações para o Modelo de Referência do CI-SBTVD,” Universidade de Campinas, Relatório Técnico, 16 Dez 2005.
- [23] Somsak Kittipiyakul e Tara Javidi, “Resource Allocation in OFDMA with Time-Varying Channel and Bursty Arrivals,” *IEEE Communications Letters*, v. 11, n. 9, p. 708–710, Set 2007.

- [24] Patrick Hosein, “QoS scheduling of uplink resources in OFDMA networks,” *Computer Networks*, n. 51, p. 2368–2378, 8 Feb 2007.
- [25] Syed Hussain Ali, Ki-Dong Lee, e Victor C. M. Leung, “Dynamic Resource Allocation in OFDMA Wireless Metropolitan Area Networks,” *IEEE Wireless Communications*, p. 7–13, Feb 2007.
- [26] Mikael Stenard, Tommy Svensson, Tony Ottosson, Andres Ahlén, Arne Svensson, e Anna Brunstrom, “Towards Systems Beyond 3G Based on Adaptive OFDMA Transmission,” em *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 12, Dez 2007, p. 2432–2455.
- [27] D. Prendergast, B. Caron, e Yiyang Wu, “The Implementation of a Return Channel for ATSC-DTV,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 53, n. 2, p. 521–529, Jun 2007.
- [28] Israel Koffman e Vincentzio Roman, “Broadband Wireless Access Solutions Based on OFDM Access in IEEE 802.16,” *IEEE Communications Magazine*, Abr 2002.
- [29] Kingsley E. Haynes e Milton I. Rube, “Directional Bias in Urban Population Density,” *Annals of the Association of American Geographers*, v. 63, n. 1, p. 40–47, Mar 1973.
- [30] Douglas L. Carnahan, Avery M. Guest, e Omer R. Galle, “Congestion, Concentration and Behavior: Research in the Study of Urban Population Density,” *The Sociological Quarterly*, v. 15, n. 4, p. 488–506, 1974.
- [31] C. Garcia, H. Ernam, W. Egner, e S. Subramanian, “Demand modeling and growth planning for TDMA-based wireless networks,” em *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, v. 1, 1999, p. 433–436.
- [32] Francesca Pozzi e Christopher Small, “Vegetation and Population Density in Urban and Suburban Areas in the U.S.A.” em *Proceedings of Third International Symposium of Remote Sensing of Urban Areas*, Jun 2002.
- [33] 3GPP TS 36.211, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access: Physical Channels and Modulation*, v8.4.0 ed., Set 2008.

- [34] Sergey N. Moiseev et al., “Analysis of the Statistical Properties of the Interference in the IEEE 802.16 OFDMA Network,” em *Proceedings of the IEEE Wireless Communications & Networking Conference*, 2006.
- [35] Christian Hoymann e Stephan Goebbels, “Dimensioning Cellular WiMAX Part I: Singlehop Networks,” em *Proceedings of the 13th European Wireless Conference*, Abr 2007.
- [36] IST-WINNER, “D5.4, Final Report on Link Level and System Level Channel Models,” IST-4-027756 WINNER II, Set 2006.
- [37] W. C. Y. Lee, “Smaller cells for greater performance,” *IEEE Communications Magazine*, v. 29, n. 11, p. 19–23, 1991.
- [38] J. Zander, “Generalized reuse partitioning in cellular mobile radio,” em *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, 1993, p. 181–184.
- [39] H. Fujii e H. Yoshino, “Theoretical Capacity and Outage Rate of OFDMA Cellular System with Fractional Frequency Reuse,” em *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Mai 2008, p. 1676–1680.
- [40] V. Erceg et al, “A model for the multipath delay profile of fixed wireless channels,” *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, v. 17, n. 7, p. 1205–1211, Jul 1999.
- [41] Recommendation P.1546-3, *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*, 3rd ed., ITU-R, 2007.
- [42] DTTB Handbook, *Digital terrestrial television broadcasting in the VHF/UHF bands*, 1st ed., ITU, 2002.
- [43] Francisco Fraile Gil e David Gomez Barquero, “On the Capacity of DVB-RCT to Provide Interactive Services,” Dissertação de Mestrado, University of Gävle, 2004.
- [44] Yehuda Ben-Shimol, Itzik Kitroser, e Yefim Dinitz, “Two-Dimensional Mapping for Wireless OFDMA Systems,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 52, n. 3, p. 388–396, 3 Set 2006.

- [45] Gábor Fodor, Miklós Telek, e Chrysostomos Koutsimanis, “Performance analysis of scheduling and interference coordination policies for OFDMA networks,” *Computer Networks*, n. 52, p. 1252–1271, 2008.
- [46] John G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. McGraw-Hill, 2000.
- [47] André C. G. de C. Reis e Paulo R. L. Gondim, “An Analytical Subcarrier Collision Model for OFDMA-Based Cellular Networks,” *submitted to IEEE Communications Letters*, Fev 2009.
- [48] WiMAX Forum, “WiMAX system evaluation methodology v.2.1,” Retrieved from <http://www.wimaxforum.org/documents>, 2007.
- [49] Andreas Fernekess, Anja Klein, Bernhard Wegmann, Karl Dietrich, e Matthias Litzka, “Load Dependent Inteference Margin for Link Budget Calculations of OFDMA Networks,” *IEEE Communications Letters*, v. 12, n. 5, p. 398–400, Mai 2008.
- [50] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, e Rias Muhamed, *Fundamentals of WiMAX : understanding broadband wireless networking*. Pearson Education, Inc, 2007.
- [51] “Terrestrial Return Channel for Interactive Broadcasting Services Operating in the VHF/UHF Broadcast Bands Based on Recomendation ITU-R BT.1306-1,” ITU, ITU-R, Doc. 6/387-E, 2003.
- [52] Gerard Faria e Fabio Scalise, “DVB-RCT: A wireless return channel for DVB-T,” em *IBC Conference*, 11 Ago 2000.
- [53] D. Prendergast, Y. Wu, K. Saelian, e B. Caron, “Digital Video Broadcasting Return Channel Terrestrial (DVB-RCT) and On Channel Repeaters (OCR) for Broadband Internet Multimedia Service to Rural and Remote Areas,” em *IBC Conference*, 2004.
- [54] Andras Vargas, *OMNeT++ Version 3.3 User Manual*, 2007.
- [55] Y.-H. You, Byoung-Chul Song, Yong-Kuk Park, Jin-Tae Kim, e Y.-S. Choi, “Performance enhancement of DVB-RCT systems for interactive wireless broadcasting,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, v. 50, n. 3, p. 870–876, Ago 2004.

- [56] Y.-H. You, W.-G. Jeon, J.-W. Wee, S.-T. Kim, I. Hwang, e H.-K. Song, “OFDMA Uplink Performance for Interactive Wireless Broadcasting,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 51, n. 3, p. 383–388, Set 2005.
- [57] You Young-Hwan, Jang Byung-Jun, e Song Hyoung-Kyu, “Low-complexity and MAI-robust Wireless Broadcasting System with Return Channel,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 52, n. 4, p. 597–610, Dez 2006.
- [58] O. Alani, M. Al-Akaidi, e S. Linfoot, “Performance evaluation of DVB-RCT return path in fading channels with added diversity,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, v. 52, n. 2, p. 377–382, Mai 2006.
- [59] Seamus O’Leary, Fintan Ryan, Brian Wynne, e Chris Gilliam, “Interactive Digital Terrestrial Television - The Wireless Return Channel and the EU Sponsored WITNESS Project,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 47, n. 2, p. 160–163, Jun 2001.
- [60] Peng Li e Qi Chang, “Performance Analysis and Test of the DVB-RCT System,” Dissertação de Mestrado, Royal Institute of Technology, 2006.
- [61] André C. G. de C. Reis e Paulo R. L. Gondim, “Performance Evaluation of DVB-RCT Standard,” em *Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, Abr 2006.
- [62] Gerard Faria e Fabio Scalise, “DVB-RCT: a Standard for Interactive DVB-T,” em *ITIS France*, Harris Broadcast Europe, Ed., 2001.
- [63] A. Untersee e G. Connan, “DVB - Return Channel Terrestrial: an Update,” Harris Broadcast Europe, Relatório Técnico, 2002.
- [64] T. P. Lin Xu e Ralf Tönjes, “DRIVE-ing to the Internet: Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments,” em *IEEE Conference on Local Computer Networks*, Nov 2000.
- [65] A. K. George Gardikis e Evangelos Pallis, “Beyond 3G: A Multi-Services Broadband Wireless Network with Bandwidth Optimisation,” em *VTS/IEEE International Symposium on 3G Infrastructure and Services*, Jul 2001, p. 176–179.

- [66] Gerard Faria, “The Missing Link for Digital Terrestrial TV,” Harris Broadcast Europe, Relatório Técnico, 2002.
- [67] G. Gardikis, A. Kourtis, e P. Constantinou, “Dynamic Bandwidth Allocation in DVB-T Networks Providing IP Services,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 49, n. 3, p. 314–318, Set 2003.
- [68] *RN-BS28PM Base Station Manual*, Runcom Technology Ltd, 2002.
- [69] Wei Li, Gilles Gagnon, Hong Liu, e André Vincent, “IP over Terrestrial ATSC DTV Channels: Performance Evaluations on Data Transmission Throughput,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 52, n. 2, Jun 2006.
- [70] Std DOCSIS 1.1, “Radio Frequency Interface Specification,” Cable Television Laboratories, Std. DOCSIS 1.1, 7 Set 2005.
- [71] Gayathri Chandrasekaran, Mohammed Hawa, e David Petr, “Preliminary performance evaluation of QoS in DOCSIS 1.1,” University of Kansas, Relatório Técnico ITTC-FY2003-TR-22736-01, 2003.
- [72] Wei-Tsong, Kun-Chen Chung, Kuo-Chih Chu, e Jen-Yi Pan, “DOCSIS performance analysis under high traffic conditions in the HFC networks,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 52, n. 1, Mar 2006.
- [73] Chammika Mannakkara e Svante Signell, “Software Implementation of DVB-RCT Modulator,” em *International Conference on Industrial and Information Systems*, Ago 2006, p. 463–469.
- [74] “Generic coding of moving pictures and associated audio information systems,” ISO/IEC, Std. 13818-1.
- [75] Claude E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” *Bell System Technical Journal*, v. 27, p. 379–423, Jan 1948.
- [76] W. W. Kihong Park, *Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation*, 2000.
- [77] D. Sala e A. Gummalla, “PON functional requirements: services and performance,” presented at IEEE 802.3ah meeting in Portland, OR, USA, Jul 2001.

- [78] G. P. G. Kramer e B. Mukherjee, “IPACT: a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON),” *IEEE Communications*, v. 40, n. 2, p. 74–80, Fev 2002.
- [79] A. M. Law e W. D. Kelton, *Simulation Modelling and Analysis*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2000.
- [80] G. Bolch, S. Greiner, H. Meer, e K. S. Trivedi, *Queueing Networks and Markov Chains*. Wiley-Interscience, 2006.
- [81] Giovanni Iacovoni, Daniela Pierotti, David Parisi, e Marco Isopi, “Cell capacity of LMDS systems in typical traffic scenarios,” *IEEE Communications Magazine*, v. 43, n. 4, p. 122–129, Abr 2005.
- [82] Maurizio Molina, Paolo Castelli, e Gianluca Foddis, “Web traffic modeling exploiting TCP connections’ temporal clustering through HTML-REDUCE,” *IEEE Network*, v. 14, n. 3, p. 46–55, Mai 2000.
- [83] Amaury K. Budri, Jaqueline V. Gonçalves, e Luís Geraldo P. Meloni, “WiMAX Simulation Models for Return Channel in Digital Television Systems,” em *VI International Telecommunications Symposium*, Set 2006.
- [84] Luís Geraldo Meloni, “Return Channel for the Brazilian Digital Television System-Terrestrial,” *Journal of the Brazilian Computer Society*, p. 83–94, Mar 2007.

APÊNDICE

A - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PADRÃO DVB-RCT

O padrão DVB-RCT especifica a codificação de canal, a modulação, o protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) além de prover algumas orientações gerais sobre o gerenciamento do espectro de radiofrequências.

O padrão para o canal de retorno DVB-RCT foi ratificado e publicado em março de 2002 pelo ETSI. O ITU-R recomendou o DVB-RCT para prover o canal de interatividade dos sistemas de televisão digital, baseados no padrão DVB-T.

Este Apêndice apresenta as principais características das camadas físicas e de controle de acesso do padrão DVB-RCT. Para os pontos nos quais o padrão é omissivo, uma solução é proposta. Alguns erros ou inconsistências foram retificados, seguindo as linhas gerais de orientação do próprio padrão, sempre buscando permitir uma implementação correta e eficiente.

A.1 - CAMADA FÍSICA

O padrão DVB-RCT permite que múltiplos usuários acessem simultaneamente o canal de retorno utilizando a tecnologia OFDMA [9]. Alguns dos principais parâmetros de sua camada física foram sintetizados na Tabela A.1.

Usando a tecnologia OFDMA, o conjunto de subportadoras utilizadas é particionado aleatoriamente em subconjuntos denominados subcanais. Cada subcanal é adicionalmente dividido no domínio em *slots* que são os compartimentos básicos de transmissão alocáveis para um RCTT. O *slot* é utilizado para transmitir uma salva de símbolos de canal modulados. A Tabela A.2 apresenta as durações úteis de símbolo do DVB-RCT, de acordo com a largura de canal do sistema DVB-T.

Cada canal de subida é estruturado em quadros de transmissão repetidos (TF)(ver Figura A.1). Cada TF contém um arranjo de símbolos nulos, *ranging*, dados e pilotos utilizados com a finalidade de banda de guarda de canal adjacente, reserva de

Tabela A.1 - Valores dos parâmetros da camada física do padrão DVB-RCT

Parâmetros	Valores
Número de subportadoras OFDM (N)	1024 (1K) e 2048 (2K)
Número de subportadoras OFDM utilizadas (N_u)	842 (1K) e 1712 (2K)
Multiplicadores de relógio ($T = mT_{DVB-T}$)	CS1: 8 (1K) e 4 (2K)
	CS2: 4 (1K) e 2 (2K)
	CS3: 2 (1K) e 1 (2K)
Duração útil do símbolo ($T_u = NT$)	$\approx 1000 \mu s$, $\approx 500 \mu s$ e $\approx 250 \mu s$
Espaçamento entre subportadoras OFDM ($C_S = \frac{1}{T_u}$)	$\approx 1\text{kHz}$ (CS1), $\approx 2\text{kHz}$ (CS2) e $\approx 4\text{kHz}$ (CS3)
Modos de transmissão	6 modos (3 espaçamentos de subportadoras \times 2 conjuntos de subportadoras)
Filtragem de subportadoras	Nyquist e Retangular
Intervalo de guarda ($T_g = pT_u$)	1/4, 1/8, 1/16 e 1/32 (para filtragem retangular apenas)
Quadros de transmissão	TF1 e TF2
Modulação	QPSK, 16-QAM e 64-QAM
Taxa de código	1/2 e 3/4
Codificação de canal	Turbo ou concatenado (RS + Convolutional)
Tipos de salvas	BS1, BS2 e BS3
Número de sub-canais	1708(BS1), 427(BS2) e 59(BS3)
Esquemas de acesso ao meio	MAS1, MAS2 e MAS3 (combinação de BS e TF)
Máximo número de subcanais por usuário (mínimo ganho de concentração)	Filtragem de Nyquist: 64 (qualquer modulação)
Banda do canal ($B_u = C_s N_u$)	Filtragem Retangular: 128 (64-QAM), 192 (16-QAM) e 384 (QPSK) Canais de 1, 1.5, 2, 3, 3.5, 4, 6, 7 e 8 MHz são suportados

Tabela A.2 - Valores da duração útil de símbolo no canal de subida baseado no padrão DVB-RCT, de acordo com a largura do canal de descida baseado no padrão DVB-T e do espaçamento entre subportadoras no canal de subida

Espaçamento entre Subportadoras	Largura do Canal de Descida		
	8 MHz	7 MHz	6 MHz
CS1	896 μs	1024 μs	1195 μs
CS2	448 μs	512 μs	597 μs
CS3	224 μs	256 μs	299 μs

recursos/sincronização, transmissão de dados e estimação de canal, respectivamente. Dois tipos de TF são definidos pelo padrão DVB-RCT, denominados TF1 e TF2. TF1 organiza o canal no domínio do tempo enquanto o TF2 organiza o canal no domínio da frequência. A primeira parte do TF1, conforme mostrado na Figura A.1(b), possui um símbolo nulo e no mínimo um (e no máximo oito) *slot(s)* de *ranging* reservados para 6 símbolos de *ranging*. O grupo de 1 a 8 *slots* de *ranging* forma um intervalo de *ranging*. A segunda parte de TF1 transporta símbolos de dados e pilotos. TF2 (ver Figura A.1(a)) possui um conjunto de quatro ou cinco subcanais consecutivos (denominados subcanal de *ranging*) reservados para *ranging* e os demais subcanais reservados para transmissão de dados (subcanais de dados).

Há três diferentes tipos de estruturas de salvas ou *slots* definidas no padrão DVB-RCT: BS1, BS2 e BS3. Cada uma é formada por 1, 4 e 29 subportadoras, respectivamente,

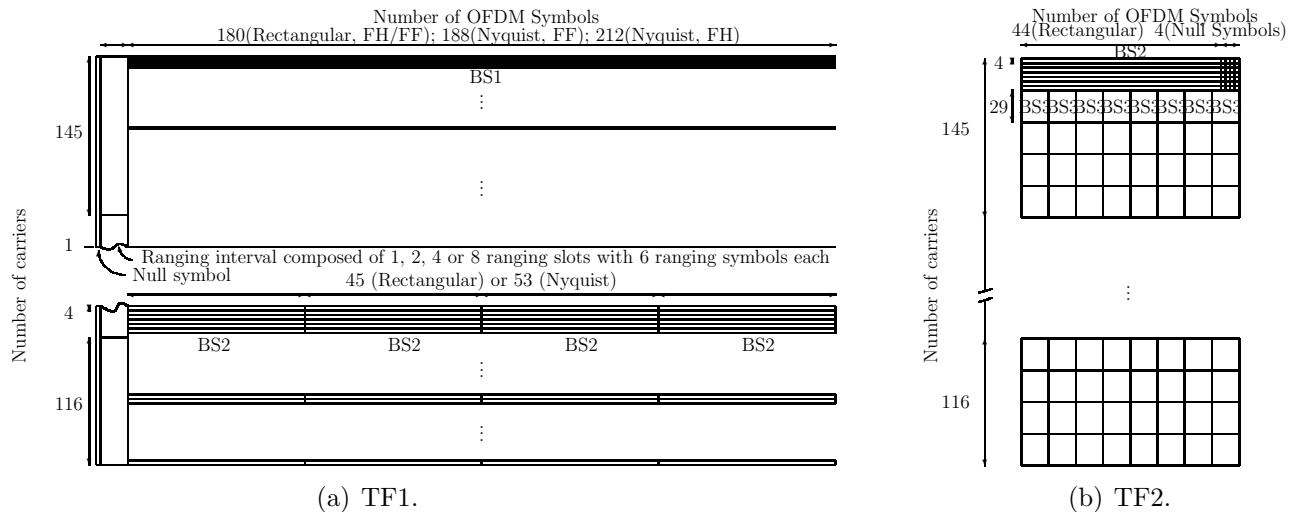


Figura A.1 - Distribuição física dos tipos de salvas nos dois tipos de quadros de transmissão

Tabela A.3 - Valores da carga de dados útil de salvas físicas, de acordo com a modulação e a taxa de código

Especificação	Modulação					
	QPSK		16-QAM		64-QAM	
Taxa de código	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4
Carga de dados (<i>bytes</i>)	18	27	36	54	54	81

e tem durações de transmissão de 180, 45 e 6 símbolos OFDM (formatação retangular de pulso). TF1 pode ser usado com 1 BS1 ou 4 BS2 (não simultaneamente), enquanto TF2 pode ser usado com 1 BS2 e/ou 8 BS3. Independente do tipo, todas as salvas são formadas por 144 símbolos e possuem capacidade que depende da modulação e taxa de codificação. Baseando-se na duração útil do tempo de símbolo listada na Tabela A.2, a duração de cada tipo de salva pode ser calculada. A Tabela A.3 fornece a carga útil de dados das salvas para diferentes modulações e taxas de codificação.

O *slot* de *ranging* é usado pelo RCTT para realizar a sincronização inicial de potência, frequência e tempo com a BS, para manter o sincronismo durante o período de conexão e para realizar a requisição de reserva de banda. Há 32 diferentes códigos de *ranging* CDMA produzidos por um gerador de sequência binária pseudo-aleatório (PRBS) e modulados por BPSK em múltiplas subportadoras (ver Figura A.2) para cada um dos usos já mencionados. Os códigos para sincronização inicial possuem duração de dois símbolos OFDM e devem ser transmitidos durante os dois primeiros símbolos do *slot* de *ranging*, enquanto que os códigos para manutenção de sincronismo e requisição de

reserva de banda têm duração de apenas um símbolo e podem ser transmitidos em qualquer símbolo dos seis disponíveis no *slot* de *ranging*.

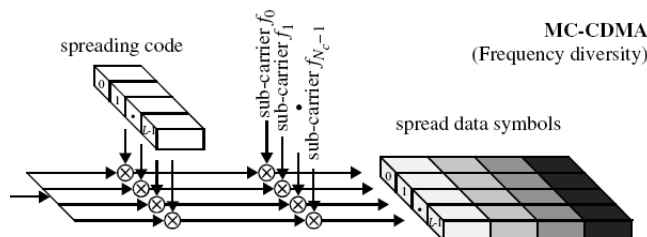


Figura A.2 - Sistema MC-CDMA explorando a diversidade de frequência, adaptado de [4]

O número máximo simultâneo de códigos de *ranging* de usuário, N_u , que podem ser suportados em um sistema *Multi-Carrier Coded Division Multiple Access* (MC-CDMA) é limitado pela interferência multi-usuário. Assumindo que todos os sinais dos códigos de *ranging* possuem potências médias idênticas, os códigos de *ranging* são mutuamente ortogonais e a interferência dos outros usuários adicionam-se apenas na base de potência, a probabilidade de erro P_e para a decodificação com decisão suave no receptor é limitada superiormente pela Equação (A.1) [46].

$$P_e \leq Q \left(\sqrt{\frac{2N_c}{N_u - 1}} \right) \quad (\text{A.1})$$

onde:

- N_c ganho de processamento ou número de subportadoras de *ranging*
- N_u número máximo de usuários suportados no sistema

Usualmente o tamanho do código de espalhamento (L) é igual ao número de subportadoras de *ranging* (N_c) para explorar ao máximo a diversidade em frequência do canal de subida.

A.1.1 - Subcamada MAC

A subcamada MAC do padrão DVB-RCT é orientada a conexão e suporta vários canais de subida por célula para aumentar a capacidade do sistema. Todas as conexões da subcamada MAC do RCTT devem utilizar os mesmos canais de subida e descida. O

algoritmo de escalonamento executado na BS é responsável por alocar os recursos de transmissão no canal de subida, isto é, *slots* para as conexões dos terminais dos usuários quando necessário. Ao mesmo tempo, cada usuário pode requisitar mais recursos se ainda não providos pela BS.

O canal de subida transporta as SDU(s) dos usuários e as PDU(s) da subcamada MAC usando salvas(ver Figura 5.3). Antes da transmissão dentro de cada salva, as SDU(s) são sempre encapsuladas em células ATM enquanto que as PDU(s) da subcamada MAC podem ser encapsuladas em células ATM ou mapeadas diretamente nas salvas. O encapsulamento de mensagens MAC depende do tamanho relativo entre o tamanho da salva e o tamanho da célula ATM. Depois da segmentação e/ou multiplexação, as células são transmitidas para a BS mapeadas em salvas. O encapsulamento de ambos os tipos de mensagens utiliza o *ATM Adaptation Layer 5* (AAL5).

Os PDU(s) MAC na direção de subida podem ser enviados usando *slots* obtidos por contenção, reserva ou *ranging* enquanto que SDU(s) podem ser enviados usando *slots* obtidos por contenção, reserva ou taxa fixa. PDU(s) MAC e SDU(s) são processados pela subcamada MAC do RCTT usando os Algoritmos 1 e 2, respectivamente, que foram desenvolvidos seguindo as diretrizes gerais presentes no padrão DVB-RCT [9].

A linha 3 do Algoritmo 1 assegura que, após recebida a notificação de inicialização com sucesso da INA e a, conseqüente, alocação de um *slot* no canal de subida, o RCTT pode continuar o processo de registro no modo de reserva. A linha 5 é verdadeira sempre que tanto RCTT como a BS(INA) são capazes de enviar e processar requisições de banda enviadas por *ranging*, respectivamente. Essa capacidade torna o uso do modo de acesso por contenção desnecessário, evitando a ocorrência de retardos aleatórios no acesso ao canal de subida gerados pelo algoritmo de recuo binário exponencial, sempre que ocorrer uma colisão.

No caso de SDU(s), a camada AAL5 rotula as células ATM com identificadores específicos da conexão, *Virtual Path Identifier* (VPI) e *Virtual Channel Identifier* (VCI). No caso de PDU MAC, um canal virtual dedicado é usado. O VPI/VCI para este canal é definido como 0x00/0x0021. Um identificador de conexão (CID) é associado na subcamada MAC a cada conexão. Cada conexão suporta os seguintes tipos de en-

Algorithm 1 Algoritmo para processar PDU(s) da subcamada MAC

Require: PDU \leftarrow MAC PDU control message

Ensure: PDU [encapsulated into ATM cell(s) and] inserted into MAC queues

```
1: | Burst |  $\leftarrow$  burst payload length from Table A.3
2: if | PDU |  $\leq$  | Burst | then
3:   if reservedModeSignOn then
4:     insert PDU into rangingMACMsgQueue
5:   else if rangingBWRequestCapable then
6:     insert PDU into rangingMACMsgQueue
7:     schedule short ranging BW request msg
8:   else
9:     insert PDU into contentionMACMsgQueue
10:  end if
11: else
12:   numberOfCells  $\leftarrow$  [| PDU | / | ATM cell payload |]
13:   for  $i = 1$  to numberOfCells do
14:     insert PDU cell into reservationMACMsgQueue
15:   end for
16: end if
```

capsulamentos: IP direto, Ponte MAC *Ethernet*, PPP, telefonia de baixa latência e sinalização telefônica de baixa latência.

A maioria dos PDU(s) MAC de subida possui tamanho menores ou iguais a 18 *bytes*, incluindo um cabeçalho MAC de oito *bytes* composto do tipo de configuração e do endereço MAC de 48 *bits* do RCTT. PDU(s) MAC de subida até 512 *bytes* podem opcionalmente serem suportados usando o protocolo de fragmentação da subcamada MAC.

O padrão DVB-RCT define quatro modos de acesso ao canal de subida controlados pelo protocolo da subcamada MAC do RCTT: contenção, reserva, *ranging* e acesso a taxa fixa.

Algorithm 2 Algoritmo para processar SDU(s) de aplicação

Require: SDU \leftarrow interactive application SDU data message

Ensure: SDU encapsulated into ATM cells and inserted into connection queues

```
1: | Burst |  $\leftarrow$  burst payload length from Table A.3
2: numberOfCells  $\leftarrow$  [| PDU |  $\div$  | ATM cell payload |]
3: if | ATM cell |  $\leq$  | Burst | then
4:   if numberOfCells  $\leq$  maximumContentionAccessMsgLength then
5:     for  $i = 1$  to numberOfCells do
6:       insert SDU cell into contentionDataMsgQueue
7:     end for
8:   else
9:     for  $i = 1$  to numberOfCells do
10:      insert SDU cell into reservationDataMsgQueue
11:    end for
12:    return [| numberOfCells / maximumReservationAccessMsgLength |]
13:  end if
14: else
15:   for  $i = 1$  to numberOfCells do
16:    insert SDU cell into reservationDataMsgQueue
17:  end for
18:  return [| numberOfCells / maximumReservationAccessMsgLength |]
19: end if
```

A.1.1.1 - Contenção

No modo de acesso por contenção, as PDUs da subcamada MAC e SDUs são enviadas usando *slots* não reservados identificados na mensagem de descida $\langle \text{MAC} \rangle$ *Slot State Message*, a qual fornece informações sobre o canal de múltiplo acesso com detecção de portadora virtual. O acesso por contenção provê acesso instantâneo ao meio para os RCTT que compartilham o mesmo canal de subida. A BS (INA) especifica por conexão o tamanho máximo de mensagem que pode ser transmitida por esse modo (*Maximum Contention Access Message Length*). Se o tamanho da mensagem for maior, o modo de acesso por reserva deverá ser utilizado.

Cada RCTT executa um processo separado de contenção por conexão. A realimentação com informações sobre colisões e o estado de reserva de futuros *slots* do canal de retorno de interatividade é enviada pela BS(INA) ao final de todo *slot* de tempo usando a mensagem <MAC> *Slot State Message*. Se a confirmação de recebimento de *slot* de contenção não for recebida, o RCTT procede como se uma confirmação positiva tivesse sido recebida. Se ao contrário, uma confirmação negativa for recebida, o algoritmo de recuo binário exponencial é utilizado para selecionar próxima oportunidade de transmissão em *slot* de contenção. No caso de colisão, o algoritmo de recuo considera o tipo de salva utilizado para enviar a mensagem de subida que colidiu. Isso significa que a retransmissão da mensagem irá ocorrer somente após o RCTT ter esperado o número necessário de salvas do mesmo tipo.

A.1.1.2 - Reserva

Nesse modo, o RCTT primeiramente requisita o número de *slots* necessários para transmitir seu tráfego SDU. Essas requisições de banda não solicitadas são enviadas por *piggyback* no campo GFC de células ATM ou por mensagem de requisição de banda <MAC> *Reservation Request Message* enviadas por intermédio de *slots* de contenção, *ranging*, reserva ou de taxa fixa. A BS (INA) pode fornecer um ou mais agrupamentos de *slots* unicamente atribuídos uma única vez para uma conexão usando uma mensagem <MAC> *Reservation Grant Message*.

Antes que um RCTT possa requisitar *slots* no modo de acesso por reserva, seja por intermédio de mensagem <MAC> *Reservation Request Message* ou por mecanismo de *piggyback*, a BS(INA) deve atribuir um identificador de reserva ao RCTT. Dessa forma, usando o primeiro mecanismo, o RCTT pode requisitar numa mensagem de requisição de reserva qualquer número de *slots* menor que o parâmetro de conexão *maximum reservation access message length* estabelecido pela BS(INA). Caso o mecanismo de *piggyback* seja utilizado, o número de *slots* que um RCTT pode solicitar por requisição é limitado a três valores pre-definidos.

Adicionalmente, um RCTT pode utilizar o mecanismo de *piggyback* contínuo, no qual a requisição com o menor número de *slots* é incluída dentro da última célula com carga

de dados, ainda que não existam mais dados a serem enviados. Essa característica permite interconectar curtos períodos de inatividade sem necessidade de realizar um novo processo de contenção na oportunidade em que a próxima carga de dados necessite ser transferida, melhorando o retardo de acesso mas desperdiçando banda.

A.1.1.3 - *Ranging*

De modo a realizar o acesso por *ranging*, cada RCTT aleatoriamente seleciona um subcanal de *ranging*, *slot* e símbolo para transmitir o código de *ranging* que tenha sido escolhido dentre aqueles destinados para um determinada finalidade. Após a transmissão do código, a requisição de cada RCTT é identificada por intermédio do subcanal de *ranging*, *slot*, símbolo e código utilizado. Apenas uma mensagem por *slot* é enviada ainda que haja mais espaço.

A parte destinada ao fornecimento de *slots* por *ranging* da mensagem <MAC> *Reservation Grant Message* contém os *slots* fornecidos, unicamente atribuídos uma única vez para um RCTT, em resposta às requisições de banda efetuadas por *ranging*. A mensagem <MAC> *Ranging and Power Calibration Message* contém informações para calibração relativas às requisições de sincronização por *ranging* curtas (manutenção) e longas (iniciais). Ambas mensagens são processadas e enviadas no canal de descida no final de cada *slot* de *ranging*.

Assumindo uma perfeita sincronização entre os RCTTs e a BS, uma colisão no modo de acesso por *ranging* ocorrerá sempre que dois ou mais terminais transmitam o mesmo código no mesmo subcanal, *slot* e símbolo. Se o efeito de captura for considerado, a colisão ocorrerá durante a utilização do *slot* fornecido por *ranging*. Nenhum algoritmo para resolução de colisão foi especificado para o modo de acesso por *ranging* pelo padrão DVB-RCT.

A.1.1.4 - Taxa Constante

No modo de acesso com taxa constante, a BS(INA) pode atribuir uma lista fixa de *slots*

ao RCTT assim que a conexão for estabelecida. A BS(INA) pode também atribuir uma lista de *slots* com taxa constante para uma conexão em resposta a uma mensagem <MAC> *Resource Request Message* enviada por um RCTT. Em um cenário típico de radiodifusão, o tráfego de subida gerado por serviços interativos é intermitente (por rajadas). tal característica faz com que o esquema de alocação permanente seja ineficiente.