ALFREDO JOSÉ CARRANZA OROPEZA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE COMUNICAÇÕES
WiMAX (IEEE 802.16 - 2004) COM ADS (ADVANCED DESIGN
SYSTEM).**

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

São Paulo

2008

ALFREDO JOSÉ CARRANZA OROPEZA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE COMUNICAÇÕES
WiMAX (IEEE 802.16 - 2004) COM ADS (ADVANCED DESIGN
SYSTEM).**

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

Área de concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador:
Prof. Jose Kleber da Cunha Pinto

São Paulo

2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 17 de outubro de 2008.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Oropeza, Alfredo José Carranza

**Análise e simulação do sistema de comunicações WiMAX
(IEEE 802.16 - 2004) com ADS (Advanced Design System) /
A.J.C. Oropeza. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.
120 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrô-
nicos.**

**1.Wireless 2.Simulação 3.Robustez (Análise) I.Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
de Sistemas Eletrônicos II.t.**

DEDICATORIA

A meus pais que dedicaram todo seu esforço na minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela benção da vida.

Ao Prof. Jose Kleber da Cunha Pinto pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

A meus pais pelo esforço e carinho de sempre.

A meus irmãos pelo apoio constante.

Aos amigos e a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

De instrução ao sábio e ele se fará mais sábio:
ensina ao justo, e ele crescerá em
entendimento.

Provérbios: 9:9

RESUMO

Este trabalho apresenta uma visão geral do modo de transmissão OFDM do padrão IEEE 802.16. O controle de acesso ao meio (MAC) e da camada física (PHY) são descritos em detalhes. Especialmente a estrutura do frame na camada (PHY). Além disso, as diferentes configurações da camada PHY com diferentes níveis de robustez são analisadas. Em seguida a simulação de um frame de dados com ADS (*Advanced Design System*) com todas as especificações da camada PHY são incluídas: Randomização, FEC, modulação adaptativa e IFFT/FFT. Um canal com multipercursos *Rayleigh fading* é implementada também. Finalmente são analisadas as curvas de espectro em frequência e tempo, e a constelação no transmissor e receptor *Downlink e Uplink*, respectivamente.

Palavras-chave: Padrão IEEE 802.16. Camada física (PHY). Simulação. Análise da robustez.

ABSTRACT

This work presents a general overview of the mode of transmission OFDM standard IEEE 802.16. The medium access control (MAC) and physical layer (PHY) are described in detail, especially the structure of frame layer (PHY). Moreover, the different configurations PHY layers with different level strengths are analyzed. Then the simulation of a frame data with ADS (Advanced Design System) with all the specifications of PHY layer are included: Randomização, FEC, adaptive modulation and IFFT / FFT. A breaking multipath Rayleigh fading is implemented as well. In analyzes the curves of spectrum in frequency and time, and constellation in the transmitter and receiver Uplink and Downlink, respectively.

Keywords: Standard IEEE 802.16. Physical layer (PHY). Simulation. Analysis of robustness.

LISTA DE FIGURAS.

2.1. Topologia de rede sem fio completa.....	20
2.2. Topologia e arquitetura da rede WIMAX.....	21
2.3. Arquitetura de protocolos da tecnologia WIMAX: Camada física e de enlace de dados	22
2.4. Esquema de modulação adaptativa adotado na tecnologia WiMAX.....	31
2.5. Formação de feixes (<i>Beamformer</i>) para múltiplos sinais.....	33
2.6. Dois exemplos de feixes otimizados e correspondentes fatores de amplitude (α).	33
3.1. Exemplo de domínio da frequência de um sistema de OFDM com três canais.	36
3.2. Domínio da frequência de um sistema OFDM.....	37
3.3. Transmissor – Receptor de um sistema de comunicações de OFDM.....	38
3.4. <i>Overlaid</i> entre o transmissor e receptor.....	40
3.5. Taxas de Símbolos altos que provocam ISI (FDM).....	41
3.6. Redução da ISI com Taxa de Símbolo baixa.....	41
3.7. Posição das portadoras OFDM.....	43
3.8 mostra a estrutura do domínio de tempo do símbolo de OFDM.....	43
4.1 <i>Transceiver</i> 802.16a OFDM PHY.....	46
4.2a. Diagrama de blocos da camada OFDM PHY 802.16a Transmissão.....	49
4.2b. Diagrama de blocos da camada OFDM PHY 802.16a. Recepção.....	50
4.3. <i>Scrambler/Descrambler</i>	51
4.4. Codificador <i>convolucional</i>	53
4.5. Estrutura do quadro (<i>frame</i>) OFDM com FDD.....	57
5.1. Sub-rede FEC.....	68
5.2. Sub rede para CC código <i>Rate_ID</i> = 2/3.....	68
5.3. Sub rede para todas as taxas de código CC.....	69
5.4. Estrutura do Preâmbulo <i>Downlink</i> da entrada do <i>frame</i>	70
5.5. Geração dos preâmbulos <i>Downlink PHY</i>	71
5.6. Estrutura do FCH.....	72
5.7. Embaralhador (<i>Scrambling</i>), Canal de Codificação, e Mapeamento para o símbolo CH.....	72
5.8. Bloco para geração do <i>subframe Downlink Burst</i> de WiMAX.....	73

5.9. Embaralhador (<i>scrambled</i>), codificação do canal, e o mapeador para os símbolos dos dados.....	74
5.10. Desenho da Modulação de um símbolo OFDM.....	75
5.11. Blocos da geração do <i>subframe downlink</i> OFDM WiMAX.....	77
5.12. Receptor do sinal WiMAX (Demodulação RF, demodulação OFDM, demultiplexação).....	78
5.13. Diagrama de blocos do Transmissor Receptor e Canal.....	79
5.14. Formas de onda (esquerdo à direita) Preâmbulo 1, Preâmbulo 2, cabeçalho, e dados do sinal WiMAX <i>Downlink</i>	82
5.15. Forma de onda da Potencia e Espectro WiMAX <i>Downlink</i>	82
5.16. Formas de onda Preâmbulo e dados do sinal WiMAX <i>Uplink</i>	83
5.17. Forma de onda da Potencia e Espectro WiMAX <i>Uplink</i>	83
5.18. Tabela estatística de transmissão e formas de onda do <i>subframe downlink</i>	85
5.19. Gráfica BER vs. SNR Para diferentes tipos de codificação sobre o canal SUI-1	87
5.20. Gráfica BER vs. SNR Para diferentes tipos de codificação sobre o canal SUI-2	87
5.21. Gráfica BER vs SNR Para diferentes tipos codificação sobre o canal SUI-3	88
5.22 Grafica BER vs SNR Para 16QAM $\frac{1}{2}$ sobre os diferentes canais SUI.....	89
5.23. Efeitos FEC em QPSK $\frac{1}{2}$ sobre o modelo de canal SUI-3.....	90
5.24. Efeitos FEC em 16QAM $\frac{1}{2}$ sobre o modelo de canal SUI-3.....	91
5.25. Efeitos FEC em 64QAM $\frac{2}{3}$ sobre o modelo de canal SUI-3.....	91
5.26. Gráficas de dispersão Para modulação BPSK (RS-CC) sobre modelo de canal SUI-1	92
5.27. Gráficas de dispersão Para modulação QPSK (RS-CC $\frac{1}{2}$) sobre modelo de canal SUI-1.....	93
5.28. Gráficas de dispersão Para modulação 16QAM (RS-CC $\frac{3}{4}$) sobre modelo de canal SUI-1.....	93
5.29. Gráficas de dispersão Para modulação 64QAM (RS-CC $\frac{2}{3}$) sobre modelo de canal SUI-1.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Sumário das designações da camada física do IEEE 802.16 - 2004.....	27
Tabela 2. Atraso de espalhamento. (HOYMANN, 2005), (KEPLER, et al, 2002).	29
Tabela 3. Tipos de modulação WiMAX. (IEEE Std 802.16-2004, 2004).....	30
Tabela 4. Taxas de dados, tipos de modulação e largura de banda em MHz (IEEE Std 802.16-2004, 2004).....	30
Tabela 5. Parâmetros da camada 256-OFDM PHY (IEEE Std 802.16a -2003, 2003), (ETSI, 2005).....	46
Tabela 6. Codificação obrigatória do canal por modulação (IEEE Std 802.16a -2003, 2003).....	56
Tabela 7: Tipo de Terreno para canais SUI.....	62
Tabela 8: Características dos canais SUI.....	62
Tabela 9: Retardo por Espalhamento dos Canais SUI.....	63
Tabela 10: Potencia dos Taps (antena unidirecional) de Canais SUI.....	64
Tabela 11: Fator K 90% (antena unidirecional) dos canais SUI.....	64
Tabela 12. Valores para as medidas de WiMAX.....	82
Tabela 13 : SNR requerido para nível de BER de 10^{-3} , para diferentes perfils de modulação e codificação.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS

AAS	Sistema de Antena Adaptativa.
ARQ	Requerimento Automático de repetição.
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise.</i>
ATM	Modo de Transferência Assíncrona.
BER	<i>Bit Error Rate.</i>
BPSK	<u><i>Binary Phase Shift Keying.</i></u>
BS	Estação Radio Base.
BWA	Acesso sem Fio de Banda Larga
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function.
CID	Identificador de conexão.
CRC	Verificação de Redundância Cíclica.
CPE	Equipamento estabelecido como premissa para o cliente.
DLFP	Prefixo do Frame <i>Downlink</i> .
DIUC	Código de uso no intervalo <i>Downlink</i> .
DSL	Linha de Subscrição Digital.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute.</i>
FCH	Controle de cabeçalho do Frame.
FEC	Correção de Erro Futuro.
FDD	Duplexação por Divisão de Frequência.
FFT	Transformada Rápida de Fourier.
IE	Elemento de Informação.
IP	Protocolo de Internet.
LOS	Linha de Visada.
MIMO.	<i>Multiple input multiple output.</i>
MAC	Controle de acesso ao Meio.
NLOS	Sem Linha de Visada.
OFDMA.	Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência Ortogonal.
OFDM	Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência.

PDU	Protocolo de Unidade de Dados.
PHY	Camada Física.
PMP	Ponto Multiponto.
QAM	Modulação Por Amplitude de Quadratura.
QoS	Qualidade de Serviço.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying.</i>
RTG	Abertura de transição no Transmissor/Receptor.
RLC	Controle de Radio Enlace.
SDU	Unidade de Serviço de Dados.
SNR	Relação Sinal a Ruído.
SS	<i>Subscriber Station.</i>
Slot.	Mínima Unidade de Assinação Possíveis de dados para OFDM PHY.
SC.	Portadora Única.
TDD	Duplexação por Divisão do Tempo.
TTG	Abertura de transição no Receptor/Transmissor.
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão.
TDMA	Acesso Multiple por Divisão de Tempo.
UCD	Mensagem do Descritor de Canal <i>Uplink</i> .
UIUC	Código de uso no intervalo <i>Uplink</i> .
USG	<i>Unsolicited Grant Service</i>
WirelessMAN	Redes de Área Metropolitana Sem Fio.
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access.</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity.</i>
WiLAN	Redes de Área Local Sem Fio.
3G	Terceira Geração de Telefonia Celular.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa e Motivações.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.3 Estrutura do Trabalho.....	18
 2. FAMILIA IEEE 802.16.....	 19
2.1 Resumo da família IEEE 802.16.....	19
2.2 Revisão do padrão IEEE 802.16 - 2004.....	22
2.2.1. Características da camada Física (PHY).....	23
2.2.1.1 Padrões da Camada Física IEEE 802.16 – 2004.....	24
2.2.1.1.1 - WirelessMAN-SC.....	25
2.2.1.1.2 - WirelessMAN-Sca.....	25
2.2.1.1.3 - WirelessMAN-OFDM.....	26
2.2.1.1.4 - WirelessMAN-OFDMA.....	26
2.2.1.2 Vantagens e Desvantagens dos Padrões da camada física.....	27
2.2.1.3 Modulação Adaptativa, codificação e taxas de dados.....	29
2.2.1.4. Sistema de Antenas Adaptativas.....	32
2.2.1.4.1. Técnicas de Antenas Adaptativas que permitem SDMA.....	33
2.2.2. Camada de controle de Acesso ao Meio (MAC).....	35
 3. MODELO DA ESTAÇÃO BASE 802.16A OFDM – PHY.....	 36
3.1. Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM).....	36
3.1.1. Ortogonalidade das Subportadoras.....	37
3.1.1.1. Conversão Série a paralelo.....	39
3.1.1.2. Modulação com a inversa FFT.....	40
3.1.1.3. Inserção do Prefixo Cíclico.....	40
3.1.1.4. Conversão Serie a Paralelo.....	40

3.1.1.5. Redução de Interferência Inter - Símbolo (ISI).....	41
3.2. OFDM no WiMAX.....	43
4. ESTRUTURA DA CAMADA 802.16A OFDM PHY.....	47
4.1. Estrutura da camada 802.16a OFDM PHY.....	47
4.1.1. Banda RF (Radio Frequência).....	48
4.1.2. Descrição do Bloco de Transmissão e Recepção da Estação Banda Base	50
4.1.2.1 0xFF Padding.....	51
4.1.2.2 Randomização.....	51
4.1.2.3. <i>Tail Byte 0x00 FEC Padding</i>	52
4.1.2.4. Correção de erro futuro (FEC).....	52
4.1.2.4.1 Codificador <i>Reed-Solomon</i>	52
4.1.2.4.2 Codificador <i>Convolutacional</i> / Decodificador <i>Viterbi</i>	53
4.1.2.5. Interpolação (<i>Interleaving</i>).....	55
4.1.2.6. Montagem do Frame, pilotos, intervalo de Guarda.....	55
4.1.2.6.1. Modulação / Demodulação.....	55
4.1.2.6.2. Montagem do Frame.....	56
4.1.3. Modelo do Canal.....	59
4.1.3.1. Perdas por Trajetórias.....	59
4.1.3.2. Atraso de Propagação por Multipercursos.....	60
4.1.3.3. Características Fading.....	60
4.1.3.4. Espalhamento Doppler.....	61
4.1.4. Modelos de Canal. <i>Stanford University Interim</i> (SUI).....	61
4.1.5. Implementação do Modelo de Canal SUI.....	65
5. SIMULAÇÃO DO MODELO DA ESTAÇÃO BANDA BASE WiMAX..	67
5.1 Implementação com o simulador ADS.....	68
5.1.1 Introdução.....	68
5.1.2 Componentes da Codificação do canal.....	68
5.1.2.1. Preâmbulos.....	71
5.1.2.2. Estrutura FCH.....	72

5.1.2.3. Geração de subframe <i>Downlink Burst</i>	74
5.1.2.4. Modulação OFDM.....	75
5.1.2.5. Código completo da Geração do Sinal.....	77
5.1.3 Modelo de Canal e Receptor.....	79
5.1.3.1 Demodulação do sinal WiMAX.....	79
5.2 Blocos do Transmissor, Modelo de canal e Receptor WiMAX em ADS...	80
5.3. Medições.....	81
5.3.1. Descrição da simulação WiMAX.....	81
5.3.2. Parâmetros da Simulação.....	81
5.3.3. Resultados das Simulações Realizadas para a transmissão.....	
e recepção sem efeitos de canal.....	82
5.3.4 Resultados do desempenho da Camada Física com efeitos.....	
de canal de transmissão.....	87
5.3.4.1 Gráficas BER.....	87
5.3.4.2 Efeitos do Corretor de Erro Futuro FEC.....	91
5.3.4.3 Gráficos de Dispersão. (<i>Scatter Plots</i>).....	93
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	96
6.1 Conclusões.....	96
6.2 Trabalhos Futuros.....	97
REFERENCIAS.....	99
ANEXOS	
A. CAMADA DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO (MAC).....	104
B. PREAMBULOS.....	113
C. ADS (<i>Advanced Design Simulator</i>).....	119