



**Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos**

**Caracterização do Canal de Propagação Banda Larga  
na Faixa UHF para Aplicações de TV Digital**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro, agosto de 2008



**Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos**

**Caracterização do Canal de Propagação Banda Larga  
na Faixa UHF para Aplicações de TV Digital**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC - Rio

**Dr. Gláucio Lima Siqueira**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC - Rio

**Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante**

Universidade Federal do Pará - UFPa

**Dr. Julio Cesar Rodrigues Dal Bello**

Universidade Federal Fluminense - UFF

**Dr. Rodolfo Sabóia Lima de Souza**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC - Rio

**Dr. Erasmus Couto Brazil de Miranda**

Universidade Católica de Petrópolis - UCP

**Dr. Claiton Pereira Colveiro**

Inmetro

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico -  
PUC - Rio

Rio de Janeiro, 29 de agosto de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos**

Graduo-se em Engenharia de Sistemas, na Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta - Colômbia), em 2001. Em agosto de 2003, recebeu o título de mestre em ciências de Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro na Área de Electromagnetismo Aplicado.

#### Ficha Catalográfica

Gonzalez Castellanos, Pedro Vladimir
<p>Caracterização do Canal de Propagação Banda Larga na Faixa UHF para Aplicações de TV Digital / Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – 2008.</p>
<p>149 f. : Il. ; 30 cm</p>
<p>Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.</p>
<p>Inclui bibliografia</p>
<p>1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Perfil de retardos. 3. Propagação em UHF. 4. TV digital. 5. ISDB-T. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.</p>

CDD: 621.3

A Deus

Aos meus pais Blanca, Pacho e aos meus irmãos que souberam entender a minha  
ausência e apoiaram cada uma das minhas escolhas.

A minha esposa Natacha, pelo companheirismo e pelo amor que continuamos  
cultivando dia a dia.

Ao meu irmão Jaime e a Julia por terem me acolhido na minha chegada ao Brasil  
como mais um dos seus filhos.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Luiz A. R. Silva Mello, pelo apoio e confiança.

Ao CNPq pelo apoio financeiro necessário na realização desta tese.

A PUC–Rio pela bolsa de isenção proporcionada, sem a qual não poderia realizar este curso.

Ao INMETRO, pelo apoio logístico e estrutural necessário para a realização da segunda campanha de medições.

Ao Dr. Rodolfo Sabóia Lima, e Dr. Erasmus Couto pelo apoio e cooperação.

Aos funcionários do CETUC, que sempre estão dispostos a oferecer qualquer ajuda.

Aos meus amigos Luis Ramirez, Fabrício, Sandro, Maria Lucia, Marco Ans, Maiquel, André, Rogério, Carlos, Juliana, Marcio, Marcela, Claiton, Bráulio Vag, Vinicius a Prof. Leni, em especial ao Bráulio e a Juliana pela colaboração na campanha de medições realizada no INMETRO.

## Resumo

Gonzalez Castellanos, Pedro Vladimir; Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. **Caracterização do Canal de Propagação Banda Larga na Faixa UHF para Aplicações de TV Digital**. Rio de Janeiro, 2008. 149p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese tem como objetivo a caracterização experimental do canal de propagação na faixa de UHF para as aplicações em sistemas de TV Digital. Através de campanhas de medições de campo em condições que aproximam a operação real destes sistemas foi levantado um conjunto de dados que permitiu: a avaliação de métodos de previsão da perda média de propagação em regiões urbanas densas; a determinação do retardo médio e banda de coerência do canal nestas regiões, em condições de recepção externa e interna; a caracterização estatística do espalhamento de retardos do canal; e a simulação do canal em diferentes condições de recepção para obtenção de seu perfil de retardos. São apresentadas as três campanhas de medidas realizadas, incluindo a descrição das regiões e configurações de medição, técnicas de medição e processamento de dados utilizados. A seguir é apresentada uma análise da perda média de propagação nas medições realizadas e a comparação com as previsões fornecidas para os mesmos percursos pela implementação do modelo do ITU-R. A caracterização em banda larga do canal é realizada pela modelagem estatística do perfil de retardos de multipercurso do canal. Finalmente, são apresentados os resultados de simulações para obtenção do perfil de retardos do canal com base nos resultados experimentais obtidos e a modelagem estatística desenvolvida nesta tese.

## Palavras-chave

Perfil de retardos, Propagação em UHF, TV Digital, ISDB-T

## Abstract

Gonzalez Castellanos, Pedro Vladimir; Mello, Luiz Alencar Reis da Silva (Advisor). **UHF Wide-Band Radio Propagation Channel Characterization for Digital TV Applications**. Rio de Janeiro, 2008. 149p. PhD Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis aims the experimental characterization of propagation channel of UHF band for applications in Digital TV systems. Through of measurements in the field conditions as close to actual operation of these systems was raised a set of data that allowed: the evaluation of methods for prediction of propagation mean loss in dense urban areas, determining the mean power delay and the coherence bandwidth of the channel in these regions, in two types of reception conditions, indoor and outdoor, the statistical characterization of the delay spread, and the simulation of channel for different conditions for obtain a power delay profile. Three measures campaigns are reported, including the description of regions and setup of measurement; measurement techniques and data processing methodology. It is presented a review of the average loss for the measurements developed and compared with data provided for same pathways, for the implementation of the ITU-R model. The characterization of the broadband channel is carried out by the statistical modeling of power delay profile of channel. Finally, it is presents the simulation's results of power delay based on experimental results and statistical modeling developed in this thesis.

## Keywords

Power delay profile, UHF propagation, Digital TV, ISDB-T

## Sumário

1 Introdução	17
1.1. A TV Digital no Brasil	17
1.2. Caracterização do Canal de Propagação para TV Digital	19
1.3. Objetivo e organização da tese	21
2 Modelos de Predição de Perda Média de Propagação	22
2.1. Recomendação ITU-R P.1546-3	22
2.1.1. Cálculo da Altura Nominal da Antena Transmissora	24
2.1.2. Interpolação da intensidade de campo em função da altura $h_1$	25
2.1.3. Interpolação da intensidade de campo em função da distância	28
2.1.4. Interpolação da intensidade de campo em função da frequência	28
2.1.5. Interpolação da intensidade de campo em função da percentagem de tempo	29
2.2. Modelo de Okumura - Hata	31
2.3. Modelo de Longley-Rice [26]	33
3 Modelos para Caracterização do Canal Banda Larga	35
3.1. Caracterização do Canal de Propagação em Banda Larga	36
3.1.1. Caracterização de Canais Determinísticos	36
3.1.2. Canais Aleatórios Variantes no Tempo	39
3.1.3. Classificação de Canais Reais	41
3.1.4. Caracterização em Pequena Escala	44
3.2. Modelo De Saleh – Valenzuela	46
3.3. Métodos Para Descrição Espacial De Canais	49

3.3.1. Modelos Geométrico-Estatísticos de Canais de Banda Larga	50
3.3.2. Filosofia Dos Modelos Geométrico-Estatísticos	50
3.3.3. Modelos Espaciais De Canais Banda Larga Do Tipo Geométrico-Estatístico	52
3.3.4. Modelo Geométrico-Estatístico De Rebatida Única Circular	52
3.3.5. Modelo Geométrico-Estatístico De Rebatida Única Elíptica	54
3.4. Ferramentas De Simulação	56
3.4.1. Os Pacotes SIRCIM e SMRCIM	56
4 Campanhas de Medições	60
4.1. Primeira Campanha de Medição	60
4.2. Segunda Campanha de Medição	62
4.3. Terceira campanha de medição	66
4.4. Obtenção Perfil de Retardos Usando um Sinal com modulação OFDM	69
4.5. Processamento dos Dados Medidos	74
5 Modelagem do Canal	76
5.1. Análise da Perda Média de Propagação no Percorso	76
5.1.1. Software da Recomendação ITU-R P.1546-3	79
5.1.2. Resultados Obtidos	81
5.2. Espalhamento de retardos do canal	83
5.2.1. Estatísticas do Perfil de Retardo em Ambiente Externo	83
5.2.2. Estatísticas do Perfil de Retardo em Ambiente Externo – Interno	88
5.2.3. Medidas Adicionais em Ambiente Externo-Interno	92
5.3. Modelo Estatístico do Canal	95
5.3.1. Estatísticas dos Parâmetros do Canal	95
5.3.2. Número de Componentes de Multipercorso – Modelo de Poisson	95

5.3.3. Distribuição dos Tempos de Chegada	96
5.3.4. Distribuição das Amplitudes Relativas	98
6 Simulação do Canal de TV Digital	101
6.1. Simulação com os Programas SIRCIM e SMRSIM	101
6.1.1. Metodologia da Simulação	101
6.1.2. Resultados das Simulações	102
6.2. Implementação da simulação com o modelo de Saleh e Valenzuela	105
7 Conclusões	108
7.1. Perda de Propagação ao longo da Distância	109
7.2. Modelagem do Canal	110
7.2.1. Parâmetros de Dispersão do Canal	110
7.3. Modelagem Estatística do canal	111
7.4. Simulação do canal	112
7.5. Sugestões para Trabalhos Futuros	112
8 Referências Bibliográficas	114
Anexo A Padrões de TV Digital	119
A.1 Padrões de Televisão Digital	120
A.2 Advanced Television System Committee (Norte-americano)	124
A.3 Digital Video Broadcast-Terrestrial (DVB-T) (Europeo)	126
A.4 Terrestrial Integrated Services Digital Broadcasting – ISDB-T (Japonês)	130
Anexo B Software Desenvolvido - Método de Saleh e Valenzuela	135
Anexo C Software Desenvolvido – Rec. ITU-R P.1546	140

## Lista de figuras

Figura 2.1 Curvas de Potência Excedendo 50 % do tempo na faixa de frequência entre 100 MHz	23
Figura 2.2 Fator de correção em função do ângulo de visada	27
Figura 2.3 Fatores do método de Okumura: (a) atenuação adicional média para área urbana; (b) correções para outras morfologias.	31
Figura 3.1. Relação entre as funções do sistema	38
Figura 3.2. Relação entre as funções do sistema	40
Figura 3.3. Relação entre as funções de correlação dos canais WSSUS	44
Figura 3.4 Conceito de cluster de multipercurso com o significado das constantes de tempo	47
Figura 3.5 Geometria do modelo estatístico-geométrico considerando apenas um espalhamento	51
Figura 3.6 Geometria do modelo geométrico-estatístico de rebatida única circular.	53
Figura 3.7 Geometria do modelo geométrico-estatístico de rebatida única elíptico.	54
Figura 3.8 do perfil de retardos medido em topografia (a)LOS e (b)OBS ao longo de um percurso de 1 m	59
Figura 3.9 Exemplo do perfil de retardos simulado em topografia (a)LOS e (b)OBS ao longo de um percurso de 1 m	59
Figura 4.1 – Diagramas horizontal e vertical da antena utilizada na transmissão	61
Figura 4.3 – Diagramas horizontal e vertical da antena transmissora	63

Figura 4.4. Configuração da montagem dos equipamentos de medição instalados no veículo.	64
Figura 4.6 Perfil de retardo obtido através do analisador ANRITSU MS8901A	65
Figura 4.7 Diagrama de radiação horizontal da antena transmissora	66
Figura 4.8 Diagrama de radiação horizontal da antena receptora	67
Figura 4.10 Alocação dos sinais piloto no domínio bidimensional OFDM	69
Figura 4.11 Diagrama de Blocos do Receptor	70
Figura 4.12 Diagrama de Blocos do Processo de Estimação	72
Figura 4.13 Perfil de retardo depois de aplicado a filtragem de componentes válidas.	75
Figura 5.1 Gráfico da perda no percurso em relação ao ajuste om linha de visada	78
Figura 5.2 Gráfico da perda no percurso em relação ao ajuste sem linha de visada	78
Figura 5.3 Interface da ferramenta desenvolvida para cálculo do campo segundo a Rec. ITU-R P.1546-3	80
Figura 5.4 Interface da ferramenta para cálculo do campo segundo a Rec. ITU-R P.1546-3 – escolha dos pontos Tx e Rx	80
Figura 5.5 Comparação dos valores de campo medidos e calculados com a ITU-R P.1546-3 em pontos com visibilidade (LOS)	82
Figura 5.6 Comparação dos valores de campo medidos e calculados com a ITU-R P.15146 em pontos obstruídos (NLOS)	82
Figura 5.8 Perfil de Retardo de ambiente urbano em linha de visada (Tx – Rx 2km)	83

Figura 5.9 Perfil de Retardo de ambiente urbano em linha de visada (Tx – Rx 2km)	84
Figura 5.10 Perfil de Retardo de ambiente denso urbano sem linha de visada (Tx – Rx 5km)	84
Figura 5.11 Perfil de Retardo de ambiente urbano com linha de visada (Tx – Rx 5km)	85
Figura 5.12 Distribuição cumulativa dos valores RMS (micro segundos) do retardo para todos os perfis	87
Figura 5.13 Distribuição cumulativa dos valores RMS (micro segundos) do retardo para todos os perfis condição de visibilidade.	87
Figura 5.14 Distribuição cumulativa dos valores RMS (micro segundos) do retardo para todos os perfis sem visibilidade	88
Figura 5.15 Perfil de Retardos externo-interno no INMETRO (uma curva por experimento)	89
Figura 5.16 Distribuição cumulativa dos valores RMS (nano segundos) do retardo para todos os perfis em todos os andares no canal 69	92
Figura 5.17 Distribuição cumulativa dos valores RMS (nano segundos) do retardo para todos os perfis em todos os andares no canal 33	94
Figura 5.18 Ajuste do Número de Componentes de Multipercurso em Ambiente Externo-Interno	96
Figura 5.19 Ajuste do tempo de Inter-chegada das Componentes de Multipercurso em Ambiente Externo- Interno	98
Figura 5.20 Distribuição cumulativa da amplitude das componentes	

de multipercurso	100
Figura 6.1 Perfis de retardos para Ambiente Urbano e distância entre Tx e Rx de 1 km	103
Figura 6.2 Perfis de retardos para Ambiente Urbano e distância entre Tx e Rx de 2 km	103
Figura 6.3 Distribuição cumulativa dos valores RMS (micro segundos) do retardo para distância entre Tx e Rx de 1 km	104
Figura 6.3 Distribuição cumulativa dos valores RMS (micro segundos) do retardo para distância entre Tx e Rx de 2 km	104
Figura 6.2 Distribuição do valor RMS do retardo obtido através da simulação	106
Figura 6.3 Gráfico do valor RMS do retardo obtido do trabalho de Saleh - Valenzuela	106
Figura 6.4 Perfil de retardos obtido através de simulação	107
Figura A.1 – Modelo OSI de camadas	122
Figura A.2 – Modelo de referência ITU para a Televisão Digital	124
Figura A.3 – Sistema ATSC	125
Figura A.4 – Modulação 8-VSB	126
Figura A.5 – Sistema DVB	127
Figura A.6 – Diagrama funcional do DVB-T	130
Figura A.7 – Sistema ISDB	131
Figura A.8 – Segmentação de banda no ISDB-T	133

## Lista de tabelas

Tabela 4.1 Configuração do sinal transmitido no padrão ISDB-T	70
Tabela 5.1 Valores médios de retardo e RMS dos perfis de retardo das figuras 6.7 – 6.10	85
Tabela 5.2 Valores médios de retardo e valor RMS dos perfis de retardos medidos em condição de visibilidade.	86
Tabela 5.3 Valores médios de retardo e valor RMS dos perfis de retardos medidos em condição de percurso obstruído.	86
Tabela 5.4 Valores de retardo médio e RMS dos perfis de retardos medidos no andar térreo, canal 69.	90
Tabela 5.5 Valores de retardo médio e RMS dos perfis de retardos medidos no segundo andar, canal 69.	90
Tabela 5.6 Valores de retardo médio e RMS dos perfis de retardos medidos no terceiro andar, canal 69.	91
Tabela 5.7 Valores de retardo médio e RMS dos perfis de retardos medidos no terceiro andar, canal 69.	91
Tabela 5.8 Valores de retardo médio e RMS dos perfis de retardos medidos no térreo, canal 33.	93
Tabela 5.9 Valores de retardo médio e RMS dos perfis de retardos medidos no segundo andar, canal 33.	93
Tabela 5.10 Valores de retardo médio e RMS dos perfis de retardos medidos no terceiro andar, canal 33.	93
Tabela 5.11 Valores de retardo médio e RMS dos perfis de retardos medidos no quarto andar, canal 33.	94

Tabela 5.8 Valores dos parâmetros das distribuições que serviram como ajuste das amplitudes das componentes de multipercurso em ambientes externos	99
Tabela 5.9 Valores dos parâmetros das distribuições que serviram como ajuste das amplitudes das componentes de multipercurso em ambientes externo – interno	99
Tabela 5.9 Comparação dos dados de retardo RMS medidos e simulados	105
Tabela 7.1 Valores dos parâmetros de ajuste da perda média em condições de LOS e NLOS	110
Tabela A.1 – Modos de operação COFDM do DVB	128
Tabela A.2 – Modos de operação do ISDB-T	132
Tabela A.3 – Codificação de áudio	134