



Maurício Vilela Guerra

**Caracterização do Canal de Propagação para
Redes de TV Digital de Freqüência Única**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Co-orientador: Prof. Carlos Vinício Rodriguez Ron

Rio de Janeiro
Abril de 2012



Maurício Vilela Guerra

Caracterização do Canal de Propagação para Redes de TV Digital de Frequência Única

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.

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

Prof. Carlos Vinício Rodriguez Ron

Co-Orientador

CETUC

Prof. Gláucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

Prof. Flavio José Vieira Hasselmann

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

Profa. Leni Joaquim de Matos

UFF

Dr. Rodolfo Sabóia Lima de Souza

Inmetro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de abril de 2012

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

Maurício Vilela Guerra

Graduou-se em Engenharia Eletrônica em 1989. Trabalhou por um ano na área de Telecomunicações antes de começar Mestrado na área de Sistemas de Comunicação na Pós-Graduação da PUC-Rio. Participou de congressos na área Microondas e Optoeletrônica. Aprovado em Concurso Público para Professor do Magistério Superior na área de Engenharia Elétrica / Telecomunicações do CEFET/RJ onde atualmente trabalha como Professor Assistente Nível 3. Suas áreas de interesse abrangem Caracterização e Modelagem de Canal em Banda Larga, Processos Estocásticos e Teoria Estatística das Comunicações.

Ficha Catalográfica

Guerra, Maurício Vilela

Caracterização do canal de propagação para redes de TV digital de frequência única / Maurício Vilela Guerra ; orientadora: Luiz Alencar Reis da Silva Mello ; co-orientadora: Carlos Vinício Rodriguez Ron. – 2012.

140 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Perfil de retardos. 3. Propagação UHF. 4. TV digital. 5. ISDB-T. 6. Sistemas SFN. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Rodriguez Ron, Carlos Vinício. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Aos meus orientadores Professor Luiz Alencar Reis de Silva Mello,
Professor

Carlos Vinício Rodriguez Ron e Professor Rodolfo Sabóia Lima de Souza
pelos ensinamentos, compreensão, apoio e parceria para a realização deste
trabalho.

Aos Professores Gláucio Lima Siqueira, José Ricardo Bergmann e João
Célio Brandão pelas importantes contribuições.

Ao Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos pelo seu importante apoio
neste trabalho.

À Minha Família por todo apoio e carinho em todas as horas. Em especial
a minha esposa Adriana e a meus filhos Leonardo e Roberta.

A todos os professores do CETUC, pelos ensinamentos.

Aos funcionários do CETUC.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Resumo

Guerra, Mauricio Vilela; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Orientador); Ron, Carlos Vinício Rodriguez (Co-orientador). **Caracterização do canal de propagação para redes de TV Digital de frequência única (SFN)**. Rio de Janeiro, 2011. 140p. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem como objetivo obter a caracterização do canal de propagação para redes de TV Digital de frequência única (SFN) bem como desenvolver modelos para simulação do desempenho dos serviços de radiodifusão e para tanto medições de campo devem ser realizadas. A avaliação do desempenho de redes individuais através de medidas tem duas desvantagens significativas: custo elevado com demanda de tempo considerável e nem sempre é possível aplicar os resultados de campo com a avaliação de desempenho de receptores comerciais. Neste caso, simulações realizadas em laboratório, utilizando modelos condicionados pelas propriedades do canal de rádio, podem ser a resposta ao problema. Estes modelos podem ser usados em diferentes simulações, tornando possível não somente a avaliação de desempenho, bem como a análise e projeto de equipamentos e sistemas de comunicação adequados para uma determinada característica de canal SFN. São apresentadas as campanhas de medições realizadas, incluindo a descrição das regiões e configurações de medição, técnicas de medição e processamento de dados utilizados. Em sequência, é apresentada uma análise da perda média de propagação com base 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 é apresentado a modelagem do canal como uma linha densa de retardos e a modelagem estatística dos parâmetros do canal com base nos resultados experimentais.

Palavras-chave

Radiopropagação, TV Digital, Redes de Frequência Única.

Abstract

Guerra, Mauricio Vilela; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Advisor); Ron, Carlos Vinício Rodriguez (Co-advisor). **Propagation Channel Characterization for SFN Digital TV**. Rio de Janeiro, 2011. 140p. Doctoral Thesis – – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work aims to obtain through a field measurement the characterization of the propagation channel for Digital TV using single frequency networks (SFN) and to develop models for simulating the performance of broadcasting services. The evaluation of the performance of individual networks by means of measurements has significant drawbacks: high cost, considerable time demand and is not always possible to apply field measurement results in the performance evaluation of commercial receivers. In this case, laboratory simulations using models conditioned by the radio channel properties may be the answer to this problem. These models can be used in different simulations making possible not only the performance evaluation but also the analysis and design of equipment and communication systems suitable for a particular SFN channel characteristic. This text presents the measurement campaigns carried out, including the description of regions and measurement settings, measurement techniques and data processing used. In sequence, is presented an analysis of the average path loss based on the performed measurements and its comparison with the predicted path loss provided by the ITU-R recommended model. The broadband channel characterization is carried out by the statistical modeling of the channel multipath power delay profile. Finally, the modeling of the channel as a tapped delay line and the statistical description of the channel dispersion parameters based on experimental results are presented.

Keywords

Radiopropagation, Digital TV, SFN.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1. Introdução | 13 |
| 1.1. Descrição do Problema | 14 |
| 1.2. Motivação | 16 |
| 1.3. Organização do Trabalho | 17 |
| 2. Efeitos de Propagação | 18 |
| 2.1. Ambientes Urbanos | 18 |
| 2.2. Sombreamento | 19 |
| 2.3. Multipercursos | 21 |
| 2.3.1. Multipercurso em Pequena Escala | 22 |
| 2.3.2. Fatores Influenciando o Desvanecimento em Pequena Escala | 24 |
| 2.4. Resposta Impulsional Discretizada | 25 |
| 2.5. Modelos de Predição da Perda de Propagação | 26 |
| 2.5.1. Recomendação ITU-R P. 1546-3 | 27 |
| 2.6. Caracterização de Canal Rádio de Banda Larga | 29 |
| 2.6.1. Linha Densa de Retardos | 30 |
| 2.6.2. Perfil de Retardos | 33 |
| 2.6.3. Análise da Variabilidade do Sinal em Pequena Escala na SFN | 35 |
| 2.6.3.1. Fator de Rice (K) | 36 |
| 3. Sistemas SFN | 38 |
| 3.1. Características da SFN | 38 |
| 3.2. Configurações da Rede de Frequência Única | 40 |
| 3.3. Estudo dos Atrasos | 41 |
| 3.3.1. Captação sem Fio | 41 |
| 3.3.2. Transmissão Conjunta | 47 |
| 3.4. Componentes do Modelo de Canal SFN | 49 |
| 4. Descrição do Sistema e Campanha de Medição | 52 |
| 4.1. Descrição do Sistema | 52 |
| 4.1.1. Bloco de Transmissão | 53 |
| 4.1.2. Bloco de Recepção | 59 |
| 4.2. Planejamento das Medições | 64 |
| 4.3. Recomendação ITU-R BT. 2035 | 68 |
| 5. Análise dos Dados e Resultados | 70 |
| 5.1. Ambiente de Medições | 71 |
| 5.1.1. Bairro de Jacarepaguá | 73 |
| 5.1.2. Bairro da Barra da Tijuca | 73 |
| 5.1.3. Bairro do Recreio dos Bandeirantes | 74 |
| 5.2. Análise da Perda Média de Propagação do Transmissor Principal | 75 |
| 5.2.1. Dependência da Perda de Propagação com a distância | 75 |
| 5.2.2. Comparação com a Rec. ITU-R P. 1546-3 | 79 |
| 5.2.3. Ganho e Melhoria de Diversidade da SFN | 83 |

| | |
|---|------------|
| 6. Caracterização do Canal SFN | 83 |
| 6.1. Atrasos Estruturais numa SFN | 83 |
| 6.2. Metodologia das Medições do Canal | 90 |
| 6.3. Processamento dos Dados Medidos | 94 |
| 6.4. Resultados das Medições da Resposta Impulsional do Canal | 96 |
| 6.4.1. Perfis de Retardos Medidos - Antena Direcional | 96 |
| 6.4.2. Perfis de Retardos Medidos - Antena Omni | 98 |
| 6.4.3. Parâmetros por Ponto de Medição | 100 |
| 6.5. Parâmetros de Dispersão do Canal SFN | 101 |
| 6.6. Modelo do Canal para Recepção Fixa | 104 |
| 6.6.1. Descrição da Metodologia Aplicada | 104 |
| 6.6.2. Modelos TDL | 105 |
| 6.7. Estatísticas do Perfil de retardos | 108 |
| 6.7.1. Modelo Estatístico do Canal SFN | 109 |
| 6.7.1.1. Número de Componentes de Multipercorso – Modelo de Poisson | 109 |
| 6.7.1.2. Distribuição dos Tempos de Chegada | 111 |
| 6.7.1.3. Distribuição das Amplitudes Relativas | 112 |
| 7. Conclusões | 115 |
| 7.1. Perda de Propagação com a Distância | 116 |
| 7.1.1. Parâmetros do Canal | 117 |
| 7.1.2. Modelagem Estatística – Antenas Direcional e Omni | 120 |
| 7.1.3. Caracterização Estatística do Canal SFN | 122 |
| 7.2. Considerações Finais | 122 |
| 7.3. Sugestões para Trabalhos Futuros | 123 |
| 8. Referências Bibliográficas | 124 |
| Anexo A. - Perfis de Retardos | 129 |
| Antena Direcional | 129 |
| Antena Omnidirecional | 137 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Comportamento da qualidade de vídeo digital e analógico em função da intensidade de Campo | 15 |
| Figura 2.1 Rádio propagação em áreas urbanas | 19 |
| Figura 2.2 Desvanecimentos em Pequena e Larga Escala | 21 |
| Figura 2.3 Adição construtiva e destrutiva de dois percursos | 22 |
| Figura 2.4 Desvanecimento da envoltória quando dois sinais com diferentes fases se combinam | 23 |
| Figura 2.5 Modelo de resposta impulsional discretizada e variante no tempo para um canal de multipercurso | 25 |
| Figura 2.6 Curvas de Potência Excedendo 50 % do tempo na faixa de frequência de 100 MHz | 28 |
| Figura 2.7 Estrutura do filtro transversal | 31 |
| Figura 2.8 Nível de sinal médio em larga escala versus excesso de retardo | 31 |
| Figura 2.9 Perfil de potência de retardos (perfil de retardos) | 34 |
| Figura 2.10 Função densidade de probabilidade das distribuições de Rice (b), Rayleigh (a) e Gaussiana | 37 |
| Figura 3.1 Diferentes configurações de uma SFN de pequena área | 41 |
| Figura 3.2 Captação sem fio sem ocorrência de interferência intersimbólica | 42 |
| Figura 3.3 Captação sem fio com ocorrência de interferência intersimbólica | 43 |
| Figura 3.4 Conceito de Hipérbole | 44 |
| Figura 3.5 Gráfico para cálculos | 45 |
| Figura 3.6 Região livre de interferência num sistema com captação sem fio | 47 |
| Figura 3.7 Região livre de interferência num sistema com transmissão conjunta | 48 |
| Figura 3.8 Ajuste da região livre de interferência | 48 |
| Figura 3.9 SFN vista como um sistema com diversidade de <i>site</i> | 50 |
| Figura 3.10 Propagação através de um único canal escalar na SFN | 50 |
| Figura 4.1 Diagrama de blocos do sistema de operação | 53 |
| Figura 4.2 Transmissor de TV Digital principal - Sumaré | 54 |
| Figura 4.3 Antena transmissora principal PHP 15E - Sumaré | 54 |
| Figura 4.4 Diagrama horizontal da antena principal PHP 15E, escala E/E_{MAX} | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.5 Diagrama de radiação vertical da antena PHP 15E, escala E/E_{MAX} | 56 |
| Figura 4.6 Retransmissor de TV Digital - Pena | 56 |
| Figura 4.7 Antena retransmissora SFN TTSL4UO - Pena | 57 |
| Figura 4.8 Diagrama horizontal da antena retransmissora SFN TTSL4UO, escala E/E_{MAX} | 58 |
| Figura 4.9 Diagrama vertical da antena retransmissora SFN TTSL4UO, escala E/E_{MAX} | 58 |
| Figura 4.10 Estação repetidora – Serra do Medanha | 59 |
| Figura 4.11 Localização geográfica do enlace Sumaré – Mendanha – Igreja da Pena | 59 |
| Figura 4.12 Configuração de montagem dos equipamentos de medição instalados na estação móvel de teste | 60 |
| Figura 4.13 Sistema de aquisição de dados da unidade móvel de teste | 62 |
| Figura 4.14 Fixação do casador $75/50 \Omega$ e das antenas junto à haste retrátil | 62 |
| Figura 4.15 Antena receptora | 63 |
| Figura 4.16 Diagrama horizontal da antena receptora | 63 |
| Figura 4.17 Diagrama vertical da antena receptora | 64 |
| Figura 4.18 Localização geográfica dos pontos de medida da campanha | 65 |
| Figura 4.19 Perfil de retardo obtido através do analisador vetorial ANRITSU MS8901A | 66 |
| Figura 4.20 Recepção SFN | 66 |
| Figura 4.21 Diferença dos atrasos na rede SFN | 67 |
| Figura 5.1 Região de medidas | 72 |
| Figura 5.2 Urbanização do Bairro da Barra da Tijuca | 74 |
| Figura 5.3 Urbanização do Bairro do Recreio dos Bandeirantes | 75 |
| Figura 5.4 Gráfico da perda no percurso em relação ao ajuste | 78 |
| Figura 5.5 Distribuição lognormal dos erros | 78 |
| Figura 5.6 Localização geográfica dos transmissores e pontos de recepção com obstrução | 79 |
| Figura 5.7 Interface da ferramenta desenvolvida para cálculo do campo segundo a Rec. ITU-R P. 1546-3 | 80 |
| Figura 5.8 Comparação dos valores de campo medidos (em vermelho) e calculados (em verde) com a ITU-R P. 1546-3 | 81 |
| Figura 5.9 Comparação dos valores de perda de transmissão medidos (em vermelho), calculados (em verde) com a ITU-R P. 1546-3 e em espaço livre (em azul) | 82 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.10 Distribuição cumulativa da perda de transmissão na SFN e cenários com um transmissor (Sumaré) | 85 |
| Figura 6.1 Mecanismos geradores da interferência intersimbólica na SFN | 88 |
| Figura 6.2 Localização dos pontos na região oeste da cidade do Rio de Janeiro | 91 |
| Figura 6.3 SFN vista como um sistema com diversidade de site | 92 |
| Figura 6.4 Filtragem do sistema | 93 |
| Figura 6.5 Filtragem dos transmisses – Sumaré e Pena | 93 |
| Figura 6.6 Perfil de retardo com a filtragem das componentes válidas | 96 |
| Figura 6.7 Resposta impulsional e parâmetros do canal – antena direcional a 10 m de altura | 97 |
| Figura 6.8 Distribuição de potência dos retardos no canal – antena direcional a 10 m de altura | 97 |
| Figura 6.9 Distribuição acumulada da potência dos retardos – antena direcional | 98 |
| Figura 6.10 Resposta impulsional e parâmetros do canal – antena omnidirecional a 10 m de altura | 98 |
| Figura 6.11 Distribuição de potência dos retardos no canal – antena omnidirecional a 10 m de altura | 99 |
| Figura 6.12 Distribuição cumulativa da potência dos retardos – antena omni | 100 |
| Figura 6.13 Limiões definidos para os perfis de retardos | 101 |
| Figura 6.14 Determinação do número de percursos | 102 |
| Figura 6.15 Modelos TDL para limiões de -10, -15 e -20 dB – antena direcional | 106 |
| Figura 6.16 Modelos TDL para limiões de -10, -15 e -20 dB – antena omni | 106 |
| Figura 6.16 Distribuição acumulada dos retardos para todos os perfis: a) direcional e (b) omni | 108 |
| Figura 6.17 Distribuição acumulada dos valores do retardo rms para todos os perfis: (a) direcional e (b) omni | 108 |
| Figura 6.18 Ajuste do número de componentes de multipercurso – direcional e omni | 110 |
| Figura 6.19 Ajuste do tempo de inter-chegada das componentes de multipercurso – direcional e omni | 112 |
| Figura 6.20 Distribuição acumulada das amplitudes relativas das componentes de multipercurso – antenas (a) direcional e (b) omni | 114 |

Lista de tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 Relação entre fator K e distribuições de Rice, Rayleigh e Gaussiana | 37 |
| Tabela 4.1 Especificações da antena transmissora principal PHP15E | 55 |
| Tabela 4.2 Especificações da antena retransmissora SFN TTSL4UO | 57 |
| Tabela 4.3 Especificações da antena receptora | 63 |
| Tabela 4.4 Latitudes, longitudes e atrasos dos pontos medidos | 65 |
| Tabela 6.1 Fator de Rice (k), valores médios de retardo e valor rms dos perfis de retardos medidos | 100 |
| Tabela 6.2 Parâmetros de dispersão de retardo do canal SFN – antena direcional | 102 |
| Tabela 6.3 Parâmetros de dispersão de retardo do canal SFN – antena omni | 102 |
| Tabela 6.4 OFDM em sistemas de TV Digital (SBTVD) | 103 |
| Tabela 6.5 Modelos de linhas densas de retardos para limiares de -10, -15 e -20 dB – antena direcional | 106 |
| Tabela 6.6 Modelos de linhas densas de retardos para limiares de -10, -15 e -20 dB – antena omni | 107 |
| Tabela 6.7 Valores dos parâmetros das distribuições que serviram como ajuste das amplitudes das componentes de multipercurso – antena direcional | 113 |
| Tabela 6.8 Valores dos parâmetros das distribuições que serviram como ajuste das amplitudes das componentes de multipercurso – antena omni | 113 |
| Tabela 7.1 Valores dos parâmetros de ajuste da perda média | 116 |
| Tabela 7.2 Parâmetros do canal obtidos no ambiente de medidas | 118 |
| Tabela 7.3 Comparação dos parâmetros obtidos em outros ambientes de propagação, para 1 e 2 transmissores | 119 |