



**Rogério Moreira Lima Silva**

**Caracterização de Canal em 3,5GHz Usando  
Técnicas de Sondagem STDCC e OFDM**

**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. Gláucio Lima Siqueira

Rio de Janeiro

Abril de 2011



**Rogério Moreira Lima Silva**

**Caracterização de Canal em 3,5GHz Usando  
Técnicas de Sondagem STDCC e OFDM**

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. Gláucio Lima Siqueira**  
**Orientador**

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Prof. Carlos Vinício Rodríguez Ron**  
Inmetro

**Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**  
Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Profa. Leni Joaquim de Matos**  
UFF

**Prof. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos**  
Inmetro

**Prof. Rodolfo Sabóia Lima de Souza**  
Inmetro

**Prof. Antonio Dias de Macedo Filho**  
Universidade Gama Filho

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de abril de 2011

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

## **Rogério Moreira Lima Silva**

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Maranhão em 2001, e Mestre em Engenharia Elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia em 2004

### Ficha Catalográfica

Silva, Rogério Moreira Lima

Caracterização de canal em 3,5 GHz usando técnicas de identificação sondagem STDCC e OFDM / Rogério Moreira Lima Silva; orientador: Gláucio Lima Siqueira. – 2011.

125 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Caracterização de canal. 2. STDCC. 3. OFDM. I. Siqueira, Gláucio Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que me incentivaram, apoiaram e possibilitaram esta oportunidade de ampliar meus horizontes. Agradeço também ao Dr. Rodolfo Sabóia por disponibilizar o laboratório e a VAN do INMETRO e todos os equipamentos necessários a Tese, e ao apoio da equipe do INMETRO, em especial ao Dr. Pedro Gonzales e ao Eng<sup>o</sup> João Calbras do laboratório de TV digital, bem como o técnico Jacir. Agradeço também aos amigos: Leonardo, Fabrício, Marco Aurélio, Sandro, António e Vanessa.

Agradeço a Universidade Gama Filho, em especial ao Pró-reitor Prof. Dr. Paulo Cesar Dahia Ducos e ao Prefeito Prof Sebastião de Oliveira Ramos pelo apoio dado, principalmente em ceder o local para instalação do transmissor. Também agradeço ao Sr. Glimar Barroso de Araújo, Chefe do SEOMA, pelo auxílio e por providenciar alimentação para o transmissor, e também ao Sr Ailson Guimarães da Silva, chefe de segurança da UGF. Agradecimento especial ao amigo Prof Fábio Salgado por sua ajuda e apoio nas questões relacionadas à Universidade Gama Filho.

Agradecimentos aos meus pais Francisco Silva e Maria Telma Moreira Lima Silva, e em especial ao meu avô William Moreira Lima, grande incentivador de meus estudos, que infelizmente não pode estar mais conosco devido ao seu falecimento em 30 de junho de 2008. Um agradecimento especial a minha esposa Cristina Pinto Carvalho Moreira Lima Silva que sempre me apoiou e incentivou na conclusão deste trabalho.

Não poderia deixar de prestar um agradecimento especial ao Dr. Carlos Rodriguez, meu co-orientador, por toda ajuda na Tese, tanto no setup de medidas bem como toda a ajuda nas dúvidas com o software *Matlab* para aquisição e processamento dos dados.

E em especial ao meu Professor Orientador Dr. Gláucio Lima Siqueira, por sua disponibilidade, paciência, atenção e dedicação.

**“AS LEIS DA MATÉRIA SÃO AQUELAS QUE  
NOSSAS MENTES DEVEM FABRICAR, E AS  
LEIS DA MENTE SÃO AQUELAS  
FABRICADAS PELA MATÉRIA ”.**

**JAMES CLERCK MAXWELL**

## Resumo

Silva, Rogerio Moreira Lima; Siqueira, Gláucia Lima (Orientador). **Caracterização de Canal em 3,5GHz Usando Técnicas de Sondagem STDCC e OFDM**. Rio de Janeiro, 2011. 125p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nos últimos anos a demanda por serviços de comunicações móveis tem crescido de modo significativo. Embora o serviço telefônico ainda predomine, com a popularização dos terminais móveis, a transmissão de dados (mensagens curtas, correio eletrônico, acesso à Internet, etc.) assume progressivamente uma posição relevante no mercado. Os sistemas móveis de 2ª geração (2G) e da geração de transição (2,5G) ocupam atualmente as faixas de 800 / 900 MHz e 1,8 / 1,9 GHz, sendo esta última estando prevista também para a 3ª geração (3G). O aumento crescente que se observa na capacidade dos sistemas móveis e a possibilidade de congestionamento do espectro em UHF são fatores que justificam investigar a utilização de frequências mais elevadas, onde o problema da largura da faixa de transmissão é menos restritivo. Por outro lado, é de se esperar que, inicialmente, a necessidade de expansão do espectro para os serviços móveis seja crítica em áreas urbanas e suburbanas. As áreas suburbanas são importantes devido aos problemas para prover acesso banda larga nestas regiões devido a baixa capilaridade das redes de TV a Cabo e dos Modems ADSL. A demanda por banda larga faz surgir novas tecnologias, em especial Wi-Fi e WiMAX. Entretanto, as WLAN's como Wi-Fi dependem de *backhall* para expansão destas redes. Assim sendo, a tecnologia WiMAX surgiu como alternativa para que se tenha uma oferta de serviços banda larga que atenda a demanda por estes serviços. Neste contexto, o presente trabalho propõe um estudo do canal em 3,5GHz (pois a mesma está licitada para uso do WiMAX no Brasil) em áreas suburbanas por estas serem as que mais sofrem com o problema de falta de cobertura por produtos banda larga, sem ter na maioria dos casos, sua demanda atendida. O estudo será fundamentado nos fenômenos físicos que caracterizam o canal em 3,5GHz e na análise a partir de duas técnicas de sondagem OFDM e STDCC. Uma comparação entre as técnicas citadas e seu uso para caracterização de canal.

## Palavras-chave

Caracterização de Canal; STDCC; OFDM.

## Abstract

Silva, Rogerio Moreira Lima; Siqueira, Gláucia Lima (Advisor). **Channel Characteristic at 3,5GHz with Souding Techniques STDCC and OFDM**. Rio de Janeiro, 2011. 125p. PhD Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the last years the demand for services of mobile communications has grown in significant way. Although the telephonic service still predominates, with the increase of the mobile terminals, the transmission of data (short messages, e-mail, access to the Internet, etc.) it is assuming an excellent position in the market. The mobile systems of 2<sup>a</sup> generation (2G) and the generation of transistion (2,5G) occupy the bands of 800 currently/ 900 MHz and 1,8/ 1,9 GHz, this last one being also foreseen for 3<sup>a</sup> generation (3G). The increasing increase that if observes in the capacity of the mobile systems and the possibility of congestion of the specter in UHF is factors that they justify to more investigate the use of raised frequencies, where the problem of the width of the transmission band is less restrictive. On the other hand, it is of if waiting that, initially, the necessity of expansion of the specter for the mobile services is critical in urban areas. The suburban area important due the problems for supply access wideband in these regions due to problems of density these modem cable and ADSL. Actually the demand by wideband, go to the sprouting of new technologies in special Wi-Fi and WiMAX. However, the WLAN's as Wi-Fi depend on the backhall for expansion of theses nets. Like this being, the technology WiMAX arose like alternative for that have a wide band service offering that attend the demand by these service. In this context this work proposes a study of the channel in 3,5GHz (therefore to same this licitado for use of the WiMAX in Brazil) in suburban areas by these will be the that more suffer with the cover absence problem by products wide band, without have, in the majority of the cases, its demand attended. The study will be substantiated us physical phenomena that characterize the channel in 3,5GHz and in the analysis from two techniques of survey OFDM and STDCC. A comparison between the techniques cited and his use for characterization of channel.

## Keywords

Channel Characteristic; STDCC; OFDM.

# Sumário

|   |            |
|---|------------|
| <b>1. Introdução</b>                                | <b>14</b>  |
| <b>2. Caracterização do Canal</b>                   | <b>17</b>  |
| 2.1. Canal de Comunicação                           | 18         |
| 2.2. Aleatoriedade e Canais Variantes no Tempo      | 21         |
| <b>3. Setup de Medidas</b>                          | <b>29</b>  |
| 3.1. STDCC  | 30         |
| 3.1.1. Faixa Dinâmica                               | 34         |
| 3.1.2. Resolução em Frequência                      | 34         |
| 3.1.3. Resolução de Multipercurso                   | 35         |
| 3.1.4. Fator de Escala                              | 35         |
| 3.1.5. Resolução Doppler                            | 36         |
| 3.2. Sonda STDCC                                    | 36         |
| 3.3. OFDM   | 39         |
| 3.3.1. Faixa Dinâmica.                              | 44         |
| 3.3.2. Resolução em Frequência                      | 45         |
| 3.3.3. Resolução de Multipercurso                   | 45         |
| 3.4. Sonda OFDM                                     | 46         |
| <b>4. Ambiente de Medidas</b>                       | <b>48</b>  |
| 4.1. Escolha das Rotas                              | 48         |
| <b>5. Metodologia de Captura e Análise de Dados</b> | <b>54</b>  |
| 5.1. Captura de Dados                               | 54         |
| 5.2. Análise de Resultados                          | 59         |
| 5.2.1. Análise de Perfis                            | 59         |
| 5.2.2. Análise de Variabilidade                     | 84         |
| <b>6. Conclusão</b>                                 | <b>89</b>  |
| <b>Referências bibliográficas</b>                   | <b>92</b>  |
| <b>Apêndice A</b>                                   | <b>97</b>  |
| <b>Apêndice B</b>                                   | <b>111</b> |
| <b>Apêndice C</b>                                   | <b>122</b> |
| <b>Apêndice D</b>                                   | <b>123</b> |
| <b>Apêndice E</b>                                   | <b>124</b> |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – A resposta do receptor permite que os ecos do pulso transmitido possam ser sobrepostos produzindo a interferência intersimbólica (ISI). | 17 |
| Figura 2.2– Modelo de Canal no Domínio do Tempo  | 19 |
| Figura 2.3 – Modelo de Canal no Domínio da Frequência. Fonte:[2]   | 19 |
| Figura 2.4 – Relação entre as funções que caracterizam o canal   | 20 |
| Figura 2.5 – As funções de Autocorrelação do Canal   | 22 |
| Figura 2.6 – Relações entre as funções de Correlação dos Canais WSSUS  | 25 |
| Figura 3.1 – Função de Autocorrelação da seqüência PN.   | 31 |
| Figura 3.2 – Gráfico ilustrando seqüência filtrada (em azul) e não filtrada (em vermelho)  | 31 |
| Figura 3.3 – Varredura em 3,5GHz   | 32 |
| Figura 3.4 – Varredura em 3,5GHz   | 32 |
| Figura 3.5 – Varredura em 3,5GHz   | 33 |
| Figura 3.6 – Varredura em 3,5GHz   | 33 |
| Figura 3.7 – Transmissor instalado na cobertura do prédio AG no Campus Piedade da Universidade Gama Filho  | 37 |
| Figura 3.8 – Curva do resposta do amplificador de potência   | 38 |
| Figura 3.9 – Resposta do amplificador de potência na região linear   | 38 |
| Figura 3.10 – Perfil em Visada   | 39 |
| Figura 3.11 – Subportadoras de um Sinal OFDM   | 40 |
| Figura 3.12 – Transmissão de um sinal OFDM   | 40 |
| Figura 3.13 – Recepção de um sinal OFDM  | 41 |
| Figura 3.14 – Mapeamento para transmissão de um sinal OFDM   | 41 |
| Figura 3.15 – Mapeamento para recepção de um sinal OFDM  | 42 |
| Figura 3.16 – Gráfico ilustrando o sinal OFDM  | 43 |
| Figura 3.17 – Gráfico ilustrando seqüência filtrada (em azul) , seqüência não filtrada (em vermelho) e sinal OFDM (em verde)                         | 44 |
| Figura 3.18 – Curva do resposta do amplificador de potência  | 46 |
| Figura 4.1 – Visualização do Transmissor para a Rota 1   | 48 |
| Figura 4.2 – Rota 1 identificada em vermelho   | 49 |
| Figura 4.3 – Visualização do Transmissor para a Rota 2   | 49 |
| Figura 4.4 – Rota 2 identificada em vermelho   | 50 |
| Figura 4.5 – Visualização do Transmissor para a Rota 3   | 50 |
| Figura 4.6 – Rota 3 identificada em vermelho   | 51 |
| Figura 4.7 – Visualização do Transmissor para a Rota 4   | 51 |
| Figura 4.8 – Rota 4 identificada em vermelho   | 52 |
| Figura 4.9 – Visualização do Transmissor para o Receptor da recepção fixa  | 52 |
| Figura 4.10 – identificação da medida feita fixa.  | 53 |
| Figura 4.11 – Rota 1 em vermelho, Rota 2 em azul, Rota 3 em verde e Rota 4 em rosa.  | 53 |
| Figura 5.1 – Sistema receptor usado nas medições   | 55 |
| Figura 5.2 – Unidade Móvel usada nas medidas   | 55 |
| Figura 5.3 – Recepção de Seqüencia PN usando filtro  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.4 – Recepção de Sequência PN sem filtro   | 57 |
| Figura 5.5 – Recepção de Sinal OFDM  | 57 |
| Figura 5.6 – Sinal recebido quando se envia uma seqüência pseudoaleatória.                               | 58 |
| Figura 5.7 – Sinal recebido quando se envia um sinal OFDM  | 58 |
| Figura 5.8a – Perfil de retardos STDCC rota 1 ( d=1,13km), em azul marcado os multipercursos detectados  | 60 |
| Figura 5.8b – Perfil de retardos OFDM rota 1 (d=1,13km), em azul marcado os multipercursos detectados    | 60 |
| Figura 5.9a – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos rota 1 (d=1,13km)                      | 61 |
| Figura 5.9b – Perfil de retardos OFDM rota 1 com multipercursos válidos (d=1,13km)                       | 61 |
| Figura 5.10 – Perfil de retardos STDCC rota 1 (d=1,13km), em azul marcado os multipercursos detectados   | 62 |
| Figura 5.11 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos rota 1 (d=1,13km)                      | 62 |
| Figura 5.12 – Perfil de retardos STDCC rota 1 ( d=1,12km), em azul marcado os multipercursos detectados  | 63 |
| Figura 5.13 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=1,12km) rota 1                      | 63 |
| Figura 5.14 – Perfil de retardos STDCC rota 1 (d=1,09km) , em azul marcado os multipercursos detectados  | 64 |
| Figura 5.15 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=1,09km) rota 1                      | 64 |
| Figura 5.16 – Perfil de retardos STDCC rota 1 (d=1,03km) , em azul marcado os multipercursos detectados  | 65 |
| Figura 5.17 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=1,03km) rota 1                      | 65 |
| Figura 5.18a – Perfil de retardos STDCC rota 2 (d=2,69km) , em azul marcado os multipercursos detectados | 66 |
| Figura 5.18b – Perfil de retardos OFDM rota 2 (d=2,69km)   | 66 |
| Figura 5.19 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=2,69km) rota 2                      | 67 |
| Figura 5.20 – Perfil de retardos STDCC rota 2 (d=2,69km) , em azul marcado os multipercursos detectados  | 67 |
| Figura 5.21 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=2,69km) rota 2                      | 68 |
| Figura 5.22 – Perfil de retardos STDCC rota 2 (d=2,69km) , em azul marcado os multipercursos detectados  | 68 |
| Figura 5.23 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=2,69km) rota 2                      | 69 |
| Figura 5.24 – Perfil de retardos STDCC rota 2 (d=2,69km) , em azul marcado os multipercursos detectados  | 69 |
| Figura 5.25 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=2,69km) rota 2                      | 70 |
| Figura 5.26 – Perfil de retardos STDCC rota 2(d=2,66km) , em azul marcado os multipercursos detectados   | 70 |
| Figura 5.27 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos rota 2 (d=2,66km)                      | 71 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.28 – Perfil de retardos STDCC rota 2 ( d=2,65km), em azul marcado os multipercursos detectados  | 71 |
| Figura 5.29 – Perfil de retardos STDCC ( d=2,65km) rota 2  | 72 |
| Figura 5.30 – Perfil de retardos STDCC rota 3(d=1,26km), em azul marcado os multipercursos detectados    | 73 |
| Figura 5.31 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=1,26km) rota 3                      | 73 |
| Figura 5.32a – Perfil de retardos STDCC rota 3( d=1,25km) , em azul marcado os multipercursos detectados | 74 |
| Figura 5.32b – Perfil de retardos OFDM rota 3( d=1,25km) , em azul marcado os multipercursos detectados  | 74 |
| Figura 5.33a – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=1,25km) rota 3                     | 75 |
| Figura 5.33b – Perfil de retardos OFDM com multipercursos válidos (d=1,25km) rota 3                      | 75 |
| Figura 5.34 – Perfil de retardos STDCC rota 3 (d=1,23km), em azul marcado os multipercursos detectados   | 76 |
| Figura 5.35 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=1,23km) rota 3                      | 76 |
| Figura 5.36 – Perfil de retardos STDCC rota 3 (d=1,21km), em azul marcado os multipercursos detectados   | 77 |
| Figura 5.37 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=1,21km) rota 3                      | 77 |
| Figura 5.38 – Perfil de retardos STDCC rota 4 (d=0,14km) , em azul marcado os multipercursos detectados  | 78 |
| Figura 5.39 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=0,14km) rota 4                      | 79 |
| Figura 5.40 – Perfil de retardos STDCC rota 4( d=0,14km), em azul marcado os multipercursos detectados   | 79 |
| Figura 5.41 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=0,14km) rota 4                      | 80 |
| Figura 5.42 – Perfil de retardos STDCC rota 4 (d=0,16km), em azul marcado os multipercursos detectados   | 80 |
| Figura 5.43 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=0,16km) rota 4                      | 81 |
| Figura 5.44 – Perfil de retardos STDCC (d=1,35km) rota 4, em azul marcado os multipercursos detectados   | 81 |
| Figura 5.45 – Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos (d=1,35km) rota 4                      | 82 |
| Figura 5.46 - Perfil de retardos STDCC para rota fixa, em azul marcado os multipercursos detectados      | 83 |
| Figura 5.47 - Perfil de retardos STDCC com multipercursos válidos rota fixa                              | 83 |
| Figura 5.48 – Função densidade de probabilidade rota 1 (Rayleigh)  | 85 |
| Figura 5.49 – Função densidade de probabilidade rota 2 (Gaussiana)                                       | 86 |
| Figura 5.50 – Função densidade de probabilidade rota 3 (Rayleigh)  | 87 |
| Figura 5.51 – Função densidade de probabilidade rota 4 (Gaussiana)                                       | 88 |
| Figura 5.52 – Função densidade de probabilidade rota FIXA (Gaussiana)                                    | 88 |

## Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1   | 34 |
| Tabela 5.1 – Parâmetros de dispersão do canal para a Rota 1    | 65 |
| Tabela 5.2 – Parâmetros de dispersão do canal para a Rota 2    | 72 |
| Tabela 5.3 – Parâmetros de dispersão do canal para a Rota 3    | 78 |
| Tabela 5.4 – Parâmetros de dispersão do canal para a Rota 4    | 82 |
| Tabela 5.5 – Parâmetros de dispersão do canal para a Rota fixa | 84 |

## Lista de Siglas

2G – SEGUNDA GERAÇÃO DE SISTEMAS MÓVEIS CELULARES

3G – TERCEIRA GERAÇÃO DE SISTEMAS MÓVEIS CELULARES

BTS – BASE TRANSMISSOR STATION

CCC – CENTRAL DE COMUTAÇÃO E CONTROLE

CFAR – CONSTANT FALSE ALARM

EM OU TM – ESTAÇÃO MÓVEL OU TERMINAL MÓVEL

ERB – ESTAÇÃO RADIOBASE

IMTS – IMPROVED MOBILE TELEPHONE SYSTEM

ITU – INTERNACIONAL TELECOMMUNICATION UNION

OFDM- ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING

PCS – PERSONAL COMMUNICATION SYSTEM

STDCC- SWEEP TIME DELAY CROSS CORRELATION

UIT – UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES

UMTS – UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEM