

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Renata Braz Falcão da Costa

**Estimação de Canal em Sistemas de
Comunicação sobre Linhas de Potência**

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: Marco Antonio Grivet Matoso Maia

**Rio de Janeiro
Setembro de 2007**

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

Renata Braz Falcão da Costa

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações pela UFF (Universidade Federal Fluminense) em 2000. Pós-graduação em Sistemas de Comunicação pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2003.

Ficha Catalográfica

da Costa, Renata Braz Falcão

Estimação de Canal em Sistemas de Comunicação sobre Linhas de Potência/ Renata Braz Falcão da Costa; orientador: Marco Antonio Grivet Matoso Maia. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

v., 146 f.: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Telecomunicações – Teses
2. Sistemas de Comunicação sobre Linhas de Potência.
3. Estimação de Canal.
4. Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal. Matoso Maia, Marco Antonio Grivet (Marco Antonio Matoso Maia). II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3



Renata Braz Falcão da Costa

**Estimação de Canal em Sistemas de
Comunicação sobre Linhas de
Potência**

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. Prof. Marco Antonio Grivet Matoso Maia

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Raimundo Sampaio Neto

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Marcelo Roberto Baptista Pereira Luis Jimenez

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Ernesto Leite Pinto

IME

Dr. Alberto Gaspar Guimarães

IME

Dr. Pedro Henrique Gouvêa Coelho

UERJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de setembro 2007

Agradecimentos

Ao meu Orientador Professor Marco Antonio Grivet pelo estímulo e parceria para a realização do trabalho.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

Aos meus pais, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

Ao meu marido Sandro e a minha filha Maria Luiza pela paciência e estímulo ao meu trabalho.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

A Capes pelo apóio financeiro.

Resumo

Costa, Renata Braz Falcão da; Matoso Maia, Marco Antonio Grivet. **Estimação de Canal em Sistemas de Comunicação sobre Linhas de potência**. Rio de Janeiro, fevereiro de 2008. 146p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A utilização das linhas de potência para fins de comunicação vem recebendo grande atenção nos últimos anos, principalmente devido a grande demanda por serviços de telecomunicações. A grande virtude é que as linhas de potência para comunicação apresentam uma solução sem a necessidade de nova fiação. Além disso, apresentam saída de potência disponível em todos os cômodos de uma residência, onde o terminal de comunicação possa ser usado, são de fácil instalação e acima de tudo apresentam custo reduzido. Sendo assim a comunicação através de linhas de potência vem se mostrando uma solução viável na oferta de serviços de telecomunicações. Esta tese investigou os sistemas PLC no que diz respeito à estimação do canal. Foi desenvolvido um método paramétrico de estimação do canal PLC baseado no algoritmo EM (*Expectation Maximization*). Foi feita a avaliação de desempenho combinando modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), estimação do canal PLC e equalização, sendo utilizado como referências os equalizadores ZF (Zero Forcing) e MMSE (Minimum Mean Square Error).

Palavras-chave

Telecomunicações; sistemas de comunicação sobre linhas de potência; estimação do canal; multiplexação por divisão de frequência ortogonal.

Abstract

Costa, Renata Braz Falcão da; Matoso Maia, Marco Antonio Grivet (Advisor). **Channel Estimation over Power Line Communications Systems**. Rio de Janeiro, fevereiro de 2008. 146p. D.Sc Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The powerline communications systems have been receiving increasing attention in last few years. Power line communications presents a “no new wires” solution with the additional advantages of ubiquitous node availability, easy installation, and cost effectiveness. This thesis investigation the powerline estimation channel. It was presented parametric channel estimation method using EM (*Expectation Maximization*) algorithm. The performance using OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), PLC Channel estimation and equalization was availability. The performance was studied using two equalization techniques Zero-Forcing and Minimum Mean Square Error.

Keywords

Telecommunications; power line communications systems; channel estimation; Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

Sumário

1. Introdução	16
1.1 Visão geral da tese	21
1.1.1 Objetivo do trabalho	21
1.1.2 Estrutura da tese	21
2. Tecnologia PLC	24
2.1 Histórico	24
2.2 Equipamentos PLC	25
2.3 Topologias de redes	28
2.4 A rede de distribuição de energia elétrica vista como canal de comunicação	31
2.5 Resumo do capítulo	35
3. Estimação do canal	37
3.1 O modelo multipercurso para o canal PLC	37
3.1.1 Multipercurso	38
3.1.2 Perda nos cabos	40
3.1.3 Modelo de canal	41
3.2 Estimação dos parâmetros do modelo de canal PLC	42
3.2.1 Particularização da otimização para o caso do canal PLC proposto	53
3.2.2 Algoritmo de estimação para a função de transferência para canais PLC	57
3.3 Resultados relativos à estimação do canal PLC com a técnica apresentada	59
3.3.1 Algoritmo alternativo de estimação da função de transferência para canais PLC	65
3.3.1.1 Resultados relativos à estimação do canal PLC com a técnica alternativa apresentada	67
3.4 Resultados relativos à sensibilidade da técnica apresentada	83
3.5 O Problema da ordem do Modelo	88

3.6	Resumo do capítulo	89
4.	Transmissão e recepção OFDM	91
4.1	A técnica OFDM	91
4.1.2	Transmissão e recepção de sinais OFDM	95
4.1.3	Equalização	103
4.2	Vantagens e desvantagens da técnica OFDM	106
4.3	Aplicações OFDM	107
4.3.1	<i>Digital Audio Broadcasting (DAB)</i>	108
4.3.2	<i>Digital Video Broadcasting (DVB)</i>	109
4.3.3	Wireless LAN	110
4.4	Identificação do canal	111
4.5	Avaliação de desempenho	118
4.6	Resumo do capítulo	127
5.	Conclusões e Sugestões	130
5.1	Estimação de canal PLC	130
5.2	Avaliação de desempenho	132
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	132
6	Referências bibliográficas	134
	Apêndices	137

Lista de Figuras

Figura 2.1 Equipamentos PLC	26
Figura 2.2 Redes PLC	28
Figura 2.3 Diagrama da rede de acesso de baixa voltagem	29
Figura 2.4 Uma típica rede doméstica baseada em PLC	30
Figura 2.3 Resposta em amplitude para três canais dentro de um apartamento. (a) dentro de um mesmo circuito elétrico; (b) com uma maior distância de transmissão; (c) através de diferentes circuitos	33
Figura 3.1 Canal PLC	38
Figura 3.2 Topologia genérica da rede elétrica	60
Figura 3.3 Rede PLC contendo N ramos	60
Figura 3.4 Resposta em freqüência de uma rede PLC com três ramos (N=3)	62
Figura 3.5 (a) Função para estimação de d_k utilizando 5 picos; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada	63
Figura 3.6 Resposta em freqüência de uma rede PLC com cinco ramos (N=5)	64
Figura 3.7 (a) Função para estimação de d_k utilizando 3 picos; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada	65
Figura 3.8: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias; (d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	68
Figura 3.9 Resposta em freqüência de uma rede PLC com sete ramos (N=7)	69
Figura 3.10: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função	

de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias; (d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	70
Figura 3.11 Resposta em freqüência de uma rede PLC com nove ramos (N=9)	71
Figura 3.12: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias; (d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	72
Figura 3.13 Resposta em freqüência de uma rede PLC com onze ramos (N=11)	72
Figura 3.14: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias; (d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	73
Figura 3.15: Resposta em freqüência a partir do modelo de Zimmermann	74
Figura 3.16: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias; (d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	75
Figura 3.17: Resposta em freqüência a partir do modelo de Zimmermann	76
Figura 3.18: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias; (d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	77
Figura 3.19: Três canais discretos no tempo: (a) Canal A; (b) Canal B; (c) Canal C	78
Figura 3.20: Resposta em freqüência para os canais: (a) A; (b) B; (c) C	79
Figura 3.21: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias;	

(d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	80
Figura 3.22: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias; (d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	81
Figura 3.23: (a) Função para estimação de d ótimo; (b) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em dB; (c) Histograma de distâncias; (d) Função de transferência estimada de acordo com a técnica apresentada em escala linear	82
Figura 3.25 MSE em função da porcentagem de utilização da faixa de frequência	83
Figura 3.26 Dispersão do Canal	84
Figura 3.27: (a) MSE em função da porcentagem de utilização da faixa de frequência; (b) Dispersão do canal	85
Figura 3.28: (a) MSE em função da porcentagem de utilização da faixa de frequência; (b) Dispersão do canal	86
Figura 3.29: (a) MSE em função da porcentagem de utilização da faixa de frequência; (b) Dispersão do canal	87
Figura 4.1 Ortogonalidade no domínio da frequência	92
Figura 4.2 Ortogonalidade no domínio do tempo	93
Figura 4.3 Esquema do transmissor OFDM	97
Figura 4.4 Esquema da combinação canal e receptor OFDM	98
Figura 4.5 Receptor OFDM com prefixo cíclico	100
Figura 4.6 Receptor OFDM com preenchimento de zeros	102
Figura 4.7 Receptor OFDM (a) Receptor CP; (b) Receptor ZP	112
Figura 4.8 Esquema de identificação do canal	114
Figura 4.9: Desempenho obtido para sistema ZP-OFDM empregando a modulação BPSK (a) 100% dos símbolos pilotos; (b) 80% dos símbolos pilotos; (c) 60% dos símbolos pilotos;	

(d) 40% dos símbolos piloto 121

Figura 4.10: Desempenho obtido para sistema ZP-OFDM empregando a modulação BPSK (a) 100% dos símbolos pilotos;

(b) 80% dos símbolos pilotos; (c) 60% dos símbolos pilotos;

(d) 40% dos símbolos piloto 124

Figura 4.11: Desempenho obtido para sistema ZP-OFDM

empregando a modulação BPSK (a) 100% dos símbolos pilotos;

(b) 80% dos símbolos pilotos; (c) 60% dos símbolos pilotos;

(d) 40% dos símbolos piloto 126

Lista de tabelas

Tabela 4.1 Parâmetros OFDM para sistema DAB	109
Tabela 4.2 Parâmetros OFDM para sistema DVB	110
Tabela 4.3 Parâmetros OFDM para o padrão IEEE 802.11a	111
Tabela 4.4 Modulações e taxas de codificação do padrão IEEE 802.11a	111

Lista de Símbolos Matemáticos

* Convolução

$E[]$ valor esperado

\otimes Produto de Kronecker

$p_{\underline{x}, \underline{y}}$ Função densidade de probabilidade conjunta entre \underline{x} e \underline{y}

A^\dagger Transposto conjugado

A^H Hermitiano

$\text{Tr}(A)$ Traço da matriz A

$\text{Pinv}(A)$ Pseudo Inversa da matriz A

Lista de Acrônimos

ADSL: Asynchronous Digital Subscriber Line

AWGN: Additive White Gaussian Noise

BER: Bit Error Rate

BPSK: Binary Phase Shift Keying

BT: Baixa Tensão

CDMA: Coded-division Multiple Access

CPE: Customer Premises Equipment

CP-OFDM: *Cyclic* Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

DAB: Digital Audio Broadcasting

DAE: Data Aided Estimation

DDCE: Direct Decision channel Estimation

DVB: Digital Video Broadcasting

EB: Estação Base

EM: Expectation Maximization

EMC: Electromagnetic Compatibility

ESA: Estacionário no Sentido Amplo

ETSI: European Telecommunication Standards Institute

FEC: Forward Error Correction

FFT: Fast Fourier Transformer

FM: Frequency Modulation

FSK: Frequency Shift Keying

HF: High Frequency

HFC: Hybrid Fiber Coax

IBI: Inter Block Interference

ICI: *Inter-Carrier Interference*

IDFT: Inverse Discrete Fourier Transformer

IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers

ISDN: Integrated Services Digital Networks

ISI: Intersymbol Interference

LAN: Local Area Network
LMS: Least Mean Square
LMSD: Local Multipoint Distribution Systems
LS: Least Square
ML: Maximum Likelihood
MMC: Multicarrier Modulation
MMSE: Minimum Mean Square Error
MS: Mean Square
MSE: Mean Square Error
MT: Média Tensão
NLMS: Normalized Least Mean Square
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAPR: Peak-to-Average Power Ratio
PLC: Power Line Communication
PLTF: Power Line Telecommunications Forum
PSD: Power Spectral Density
PSK: Phase Shift Keying
PSTN: Public Switched Telephone Network
QAM: Quadrature Amplitude Modulation
QPSK: Quadrature Phase Shift Keying
RLS: Recursive Least Square
SRN: Signal-to-Noise Ratio
SS: Spread Spectrum
xDSL: Digital Subscriber Line
ZF: Zero Forcing
ZP-OFDM: Zero Padding – Orthogonal Frequency Division Multiplexing