

Universidade Federal de Juiz de Fora
Mestrado em Sistemas Eletrônicos

Guilherme Ribeiro Colen

**SISTEMAS CLUSTERED-OFDM SISO E MIMO PARA POWER LINE
COMMUNICATION**

Juiz de Fora
2012

Guilherme Ribeiro Colen

**SISTEMAS CLUSTERED-OFDM SISO E MIMO PARA POWER LINE
COMMUNICATION**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas Eletrônicos, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro

Juiz de Fora
2012

Guilherme Ribeiro Colen

Sistemas *Clustered*-OFDM SISO e MIMO para *power line communication*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas Eletrônicos, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Aprovada em 06 de setembro de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro
Orientador

Prof. Dr. Max Henrique Machado da Costa
UNICAMP

Prof. Dr. Weiler Alves Finamore
UFJF

Prof. Dr. Edimar José de Oliveira
UFJF

A minha mãe Angelina
A meu pai Eloi
A minha irmã Denise
A minha noiva Fernanda

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus as graças concedidas, em especial, a oportunidade de estudar e estar sempre aprendendo.

Aos meus pais Eloi e Angelina, pelo apoio durante toda a minha vida, em todas as minhas decisões. Me ensinado tudo o que preciso para crescer na vida. E por compreender a minha ausência durante todo o mestrado, principalmente, na reta final.

À minha irmã Denise que sempre vai estar no meu coração, independente da distância física.

À minha noiva Fernanda agradeço o apoio incondicional em todas as situações que passamos juntos. E por compreender os momentos nos quais não estive presente.

A toda minha família de sangue e de consideração que entendia os momentos que eu não podia comparecer por ter que ficar em casa estudando.

Ao meu orientador Moisés pela orientação durante o mestrado e pela a oportunidade de trabalhar no projeto do modem PLC. Obrigado, também, pelo apoio e incentivo constantes, sempre mostrando que acredita no meu trabalho.

A todos os professores da banca por aceitarem o convite, contribuindo com esta dissertação.

Aos professores e aos amigos do LAPTEL por estarem sempre dispostos a me ajudar com conselhos e dicas, sem as quais tornaria meu trabalho muito mais difícil.

A todos os meus amigos pelas palavras de apoio e incentivo.

Aos Professores e Funcionários da Universidade Federal de Juiz de Fora.

A todas as outras pessoas que me apoiaram durante os meus estudos do mestrado.

“Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado, mas nada pode ser modificado até que seja enfrentado.”

Albert Einstein

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo investigar, propor e analisar esquemas para reduzir a complexidade computacional de algoritmos implementados na camada física de transceptores para comunicação de dados via rede elétrica - *power line communication* (PLC) que são baseados em multiplexação por divisão de frequência ortogonal - *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM). Inicialmente, o *Clustered-OFDM* é investigado e analisado com o intuito de reduzir a complexidade computacional dos transceptores PLC. Além disto, uma relação entre complexidade computacional e desempenho é demonstrada para *Clustered-OFDM* e múltiplo acesso por divisão de frequência ortogonal - *orthogonal frequency division multiple access* (OFDMA). Os resultados computacionais quantificam a relação entre complexidade computacional e redução da capacidade do canal para o *Clustered-OFDM* em comparação com o OFDMA. Em seguida, é proposto e analisado um esquema *Clustered-OFDM* para comunicação com múltiplas entradas e múltiplas saídas - *multiple-input and multiple-output* (MIMO) 2×2 , denominado MIMO-*Clustered-OFDM*, que tem como base um código de bloco espacial e temporal. Os resultados de comparações revelam que a proposta MIMO-*Clustered-OFDM* pode reduzir a capacidade do canal para atingir uma menor complexidade computacional, comparado ao MIMO-OFDMA. Por último, é introduzido um processo para analisar estatisticamente a degradação gerada pelo agrupamento de subportadoras contíguas para o uso de algoritmos de alocação de bits. Um estudo de caso com canais PLC revela que o critério aplicado para agrupar subportadoras contíguas pode proporcionar diferentes níveis de reduções de rendimento, bem como de outras perdas de desempenho se o tamanho do grupo é variável.

Palavras-chave: Sistemas PLC, transceptores *Clustered-OFDM*, transceptores MIMO-*Clustered-OFDM*, alocação de bits.

ABSTRACT

This thesis aims at investigating, proposing, and analyzing techniques to reduce the computational complexity of algorithms implemented in the physical layer of power line communication (PLC) transceivers which are based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). First, the clustered-OFDM is investigated and analyzed to reduce computational complexity. Also, a trade between computational complexity and performance is demonstrated for clustered-OFDM and orthogonal frequency division multiple access (OFDMA). Performance results quantify what kind of tradeoff between computational complexity and capacity reduction can be achieved in comparison with OFDMA. Second, a clustered-OFDM scheme for 2×2 multiple input multiple output (MIMO) communication based on space time block code, named MIMO-clustered-OFDM, is proposed and analyzed. Comparison results reveal that the proposed MIMO-clustered-OFDM can trade capacity with computational complexity and can achieve lower computational complexity than MIMO-OFDMA. Third, a procedure to statistically analyze the degradation yielded by the use of granularity for grouping a set of contiguous subcarriers to be used by bitloading algorithm is introduced. A case study with PLC channels reveals that the criterion applied to group of contiguous subcarriers can offer different levels of throughput reductions and other performance losses if the size of the group is varied.

Keywords: PLC systems, Clustered-OFDM transceivers, MIMO-Clustered-OFDM transceivers, bitloading.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Esquema <i>Clustered</i> -OFDM para comunicação de dados <i>downlink</i>	25
2	Diagrama de bloco para o modulador/demodulador SSB-OFDM para <i>Clustered</i> -OFDM, considerando transmissão USB.	37
3	Modulação baseada no SSB-OFDM.	39
4	Diagrama de bloco para o modulador/demodulador DSB-OFDM para <i>Clustered</i> -OFDM.	41
5	Diagrama de bloco para o modulador/demodulador HS-OFDM para <i>Clustered</i> -OFDM.	43
6	Diagrama de bloco do transmissor $\mathcal{P}(\cdot)$ -I.	45
7	Diagrama de bloco do transmissor $\mathcal{P}(\cdot)$ -II.	47
8	Diagrama de bloco do receptor $\mathcal{Q}(\cdot)$ -I.	48
9	Diagrama de bloco para o receptor $\mathcal{Q}(\cdot)$ -II.	50
10	Diagrama de bloco do receptor $\mathcal{Q}(\cdot)$ -III.	51
11	Complexidade computacional em termos do número de adições.	53
12	Complexidade computacional em termos do número de multiplicações.	54
13	Desempenho de BER do esquema <i>Clustered</i> -OFDM com os moduladores/demoduladores SSB-OFDM, DSB-OFDM, e as seis combinações de transmissores e receptores estudados.	55
14	<i>Clustered</i> -OFDM e OFDMA: complexidade computacional em função de P para a BS e a SS considerando NP constante.	56
15	<i>Clustered</i> -OFDM e OFDMA: UB e LB da capacidade média do canal.	57
16	χ e η em função de P considerando NP constante.	58
17	<i>Clustered</i> -OFDM e OFDMA: complexidade computacional total em função de P considerando NP e M constantes.	59

18	<i>Clustered</i> -OFDM e OFDMA: complexidade computacional total em função de M considerando NP e P constantes.	59
19	Rede de distribuição de energia elétrica de baixa tensão.	64
20	Modelagem do canal de comunicação <i>downlink</i> , no domínio do tempo discreto, entre a BS e as SSs.	64
21	Modelagem do canal de comunicação, no domínio da frequência, entre a BS e as SSs considerando um sistema multiportadora.	67
22	Esquema MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM para comunicação <i>downlink</i> de dados baseado no STBC 2×2	69
23	Complexidade computacional em termos do número total de operações (multiplicações + adições) para o esquema OFDMA considerando comunicação SISO e MIMO de dados.	72
24	Diagrama de blocos de $\mathcal{P}(\cdot)$ e $\mathcal{Q}(\cdot)$ do esquema proposto para MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM.	75
25	Complexidade computacional em termos do número de adições.	79
26	Complexidade computacional em termos do número de multiplicações.	80
27	Espectro de amplitude dos canais MIMO PLC.	82
28	Desempenho de BER do esquema MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM com o moduladores/demoduladores proposto.	82
29	MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM e MIMO-OFDMA: complexidade computacional em função de P para a BS e a SS considerando NP constante.	83
30	Capacidade de cada subportadora do canal MIMO considerando $P = 10$	84
31	MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM e MIMO-OFDMA: capacidade do canal MIMO. ..	85
32	χ e η em função de P considerando NP constante para comunicação MIMO de dados.	86
33	MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM e MIMO-OFDMA: complexidade computacional total em função de P considerando NP e M constantes.	86
34	MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM e MIMO-OFDMA: complexidade computacional total em função de M considerando NP e P constantes.	87

35	Algoritmo de alocação de bits e energia.	90
36	Algoritmo de alocação de bits considerando a granularidade.	92
37	Fluxograma da metodologia para a análise da granularidade em algoritmos de alocação de bits.	94
38	Algoritmo para a análise preliminar.	95
39	Distribuição de probabilidade do <i>Erro</i> para a análise preliminar.	97
40	Esquema do HS-OFDM em banda base: (a) Transmissor e (b) Receptor. ...	98
41	Algoritmo para a análise da BER.	99
42	Resposta em frequência dos canais usados para a análise de BER.	100
43	BER obtida para cada caso simulado.	101
44	BER obtida para o caso 2 considerando diversas variâncias.	102
45	Algoritmo para a análise da taxa de transmissão.	103
46	Distribuição de probabilidade cumulativa da perda de taxa de transmissão. $x(\%)$ é a perda percentual de taxa.	104

LISTA DE TABELAS

1	Variáveis da equação do modelo de um canal PLC	22
2	OFDMA: Taxa e complexidade computacional para BS e SS.	28
3	Complexidade computacional de $\mathcal{P}(\cdot)$ e $\mathcal{Q}(\cdot)$ para o p -ésimo <i>cluster</i> no esquema OFDMA.	28
4	<i>Clustered</i> -OFDM: Taxa e complexidade computacional para BS e SS.	29
5	Complexidade computacional de $\mathcal{P}(\cdot)$ e $\mathcal{Q}(\cdot)$ quando o modulador/demodulador SSB-OFDM é aplicado.	40
6	Complexidade computacional de $\mathcal{P}(\cdot)$ e $\mathcal{Q}(\cdot)$ para o modulador/demodulador DSB-OFDM.	43
7	Complexidade computacional de $\mathcal{P}(\cdot)$ e $\mathcal{Q}(\cdot)$ para o modulador/demodulador HS-OFDM.	45
8	Complexidade computacional de $\mathcal{P}(\cdot)$ -I.....	46
9	Complexidade computacional de $\mathcal{P}(\cdot)$ -II.....	48
10	Complexidade computacional de $\mathcal{Q}(\cdot)$ -I	49
11	Complexidade Computacional de $\mathcal{Q}(\cdot)$ -II	50
12	Complexidade computacional de $\mathcal{Q}(\cdot)$ -III.....	52
13	Parâmetros para o cálculo da complexidade computacional.	53
14	Parâmetros do canal LIT PLC.....	54
15	Parâmetros das simulações de performance de BER.	55
16	Parâmetros para as análises da complexidade computacional e da capacidade do canal para <i>Clustered</i> -OFDM e OFDMA.	56
17	Complexidade computacional de $\mathcal{P}(\cdot)$ e $\mathcal{Q}(\cdot)$ para o p -ésimo <i>cluster</i> no esquema MIMO-OFDMA.	72

18	Complexidade computacional de $\mathcal{P}(\cdot)$ e $\mathcal{Q}(\cdot)$ para o esquema proposto para MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM.	78
19	Parâmetros para o cálculo da complexidade computacional em função de N	79
20	Parâmetros do canal \mathbf{H}_{11} LIT PLC.	80
21	Parâmetros do canal \mathbf{H}_{12} LIT PLC.	80
22	Parâmetros do canal \mathbf{H}_{21} LIT PLC.	81
23	Parâmetros do canal \mathbf{H}_{22} LIT PLC.	81
24	Parâmetros das simulações de performance de BER.	81
25	Parâmetros para as análises da complexidade computacional e da capacidade do canal para MIMO- <i>Clustered</i> -OFDM e MIMO-OFDMA.	83
26	Casos analisados nas simulações computacionais.	96
27	Parâmetros da etapa de inicialização.	96
28	SNR em constelações QAM quadradas.	97
29	Casos testados nas simulações computacionais.	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIGN ruído gaussiano aditivo impulsivo - *additive impulsive Gaussian noise*

AWGN ruído gaussiano aditivo branco - *additive white Gaussian noise*

BER taxa de erro de bits - *bit error rate*

BP passa banda - *band-pass*

BS estação base - *base station*

CIR resposta ao impulso do canal - *channel impulse response*

DFT transformada de Fourier discreta - *discrete Fourier transform*

DMT *discrete multitone modulation*

DSB banda lateral dupla - *double-sideband*

DSB-OFDM multiplexação por divisão de frequência ortogonal com banda lateral dupla
- *double-sideband orthogonal frequency division multiplexing*

DSL *Digital Subscriber Line*

DTFT transformada de Fourier no tempo discreto - *Discrete Time Fourier Transform*

FEQ equalizador no domínio da frequência - *frequency domain equalizer*

FFT transformada rápida de Fourier - *fast Fourier transformed*

HS-OFDM multiplexação por divisão de frequência ortogonal com hermitiano simétrico
- *hermitian symmetric orthogonal frequency division multiplexing*

IDFT transformada de Fourier discreta inversa - *inverse discrete Fourier transform*

IFFT transformada inversa rápida de Fourier - *inverse fast Fourier transformed*

LB limitante inferior - *lower bound*

LIT linear e invariante no tempo

LP passa baixa - *low-pass*

LSB banda lateral inferior - *lower side band*

MIMO múltiplas entradas e múltiplas saídas - *multiple-input and multiple-output*

OFDM multiplexação por divisão de frequência ortogonal - *orthogonal frequency division multiplexing*

OFDMA múltiplo acesso por divisão de frequência ortogonal - *orthogonal frequency division multiple access*

PAPR relação entre a potência de pico e a potência média - *peak to average power ratio*

PC prefixo cíclico

PHY física - *physical*

PLC comunicação de dados via rede elétrica - *power line communication*

PSD densidade espectral de potência - *power spectral density*

QAM modulação de amplitude em quadratura - *quadrature amplitude modulation*

SISO *single-input and single-output*

SNR relação sinal ruído - *signal to noise ratio*

SS estação assinante - *subscriber station*

SSB banda lateral única - *single-sideband*

SSB-OFDM multiplexação por divisão de frequência ortogonal com banda lateral única - *single-sideband orthogonal frequency division multiplexing*

STBC código em bloco espacial e temporal - *Space-Time Block Code*

UB limitante superior - *upper bound*

USB banda lateral superior - *upper side band*

WiMAX *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

ZF zero forçado - *zero forcing*