



**Byron Paúl Maza Chalán**

**Detecção ótima por grupos em sistemas de  
transmissão em blocos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador : Prof. Raimundo Sampaio Neto  
Co-Orientador: Prof. César Augusto Medina S.

Rio de Janeiro  
Agosto de 2012



**Byron Paúl Maza Chalán**

## **Detecção ótima por grupos em sistemas de transmissão em blocos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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. Raimundo Sampaio Neto**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações — PUC-Rio

**Prof. César Augusto Medina S.**

Co-Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações — PUC-Rio

**Prof. José Mauro Pedro Fortes**

Centro de Estudos em Telecomunicações — PUC-Rio

**Prof. Rodrigo Caiado de Lamare**

University of York

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Agosto de 2012

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

### **Byron Paúl Maza Chalán**

Graduou-se em Engenharia em Eletrônica e Telecomunicações na Universidad Técnica Particular de Loja UTPL (Loja, Equador). Trabalhou na UTPL no Departamento de Telecomunicações, desenvolvendo sistemas de Tele-Medicina e Telemetria. É professor na Faculdade de Engenharia em Eletrônica e Telecomunicações da UTPL.

#### Ficha Catalográfica

Maza, Byron

Detecção ótima por grupos em sistemas de transmissão em blocos / Byron Paúl Maza Chalán; orientador: Raimundo Sampaio Neto; co-orientador: César Augusto Medina S.. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

68 f.: il. (color.); 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. OFDM;. 3. Sistemas de portadora única;. 4. Detecção por grupos;. 5. Detecção ML;. 6. Estimação de canal.. I. Sampaio, Raimundo. II. Medina, César A.. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimientos

*Al Profesor Raimundo Sampaio Neto, por su apoyo incondicional e incentivo durante el transcurso de toda la maestría, pues es un ejemplo a seguir por su don de gente y excelencia académica.*

*A César Medina, por su incentivo a comenzar mis estudios de postgrado, por su ayuda para ingresar a esta universidad y por su cálida acogida en los primeros días en este país, en general por su amistad brindada.*

*A la CAPES y a la PUC-Río, por las becas concedidas.*

*A la UTPL, por haberme concedido permiso para realizar estos estudios.*

*A mis amigos de la PUC-Río, especialmente a Leonel Arévalo compañero de los buenos y los malos momentos, gracias a su ayuda se hizo más llevadero el inicio de esta maestría. A Marco Guamán por compartir su amistad, triunfos y tristezas en estas tierras lejanas de nuestra patria. A Francisco Sandoval por su amistad incondicional, espero continuar siendo compañero en los estudios de doctorado. A mis amigos y amigas de Ecuador, quienes estuvieron siempre pendientes de mi persona durante estos dos años.*

*Finalmente a mi padres y hermanos, infinitas gracias por su apoyo, por ser la base de lo que soy, este trabajo esta dedicado para ustedes.*

## Resumo

Maza, Byron; Sampaio, Raimundo; Medina, César A.. **Detecção ótima por grupos em sistemas de transmissão em blocos.** Rio de Janeiro, 2012. 68p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os sistemas de transmissão em bloco, permitem a transmissão de  $N$  símbolos de forma simultânea, seja em modulação de portadora única ou multiportadora. A recepção ótima, no sentido de máxima verossimilhança em canais com multipercursos apresenta um custo computacional elevado de  $\mathcal{A}^N$ , onde  $\mathcal{A}$  é a ordem da constelação ( $\mathcal{A} = 2$  para BPSK). Para evitar este alto custo computacional é usual fazer a detecção símbolo a símbolo após a equalização. Nesta dissertação é proposto um receptor com detecção por grupos que apresenta uma complexidade intermediária entre o receptor ótimo e os receptores que utilizam detecção símbolo-a-símbolo em sistemas com transmissão em blocos. O tipo de estrutura idealizada agrupa as componentes do bloco equalizado em grupos e realiza detecção conjunta ótima dos símbolos em cada grupo. Com relação às possíveis estratégias de agrupamento foram propostos três métodos, o primeiro método faz uma busca exaustiva pelo agrupamento ótimo e tem como consequência um custo computacional elevado para um número grande de símbolos por bloco. Na procura por algoritmos que evitem uma busca exaustiva pelo agrupamento ótimo, mas que resultem em bons ganhos de desempenho, e a sua aplicação em sistemas com um número elevado de símbolos por bloco, foram propostos dois métodos de agrupamento sub-ótimos e eficientes, cujos receptores apresentaram ganhos de desempenho apreciáveis quando comparados ao receptor convencional.

## Palavras-chave

OFDM; Sistemas de portadora única; Detecção por grupos; Detecção ML; Estimação de canal.

## Abstract

Maza, Byron; Sampaio, Raimundo (Advisor); Medina, César A. (Co-advisor). **Optimum group detection in block transmission systems**. Rio de Janeiro, 2012. 68p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Block transmission systems allow transmissions of  $N$  symbols simultaneously, with single carrier or multi-carrier modulation. Maximum likelihood optimal reception in multipath channels have a high computational cost of  $\mathcal{A}^N$ , where  $\mathcal{A}$  is the constellation order ( $\mathcal{A} = 2$  for BPSK). To avoid this cost is usual to make symbol-by-symbol detection after equalization. In this work we propose a receiver with group detection that has a good tradeoff between computation complexity and bit error rate performance. The idealized structure groups the components of the equalized block in sub-blocks and does optimal joint detection of the symbols in each sub-block. With relation to possible grouping strategies three methods were proposed. The first one searches for an optimal grouping and has, as a consequence, a high computational cost for block with a large number of symbols. Sub-optimal efficient algorithms that avoid the exhaustive search for the optimal grouping but show good performance gains and feasible application in systems with large number of symbols per block were proposed. The resulted receivers achieved substantial performance gain in comparison with the conventional symbol-by-symbol receiver.

## Keywords

OFDM; single carrier systems; groups detection; ML detection; channel estimation.

## Sumário

1	Introdução	<b>12</b>
1.1	Objetivo	13
1.2	Contribuições da Pesquisa	13
1.3	Organização do Texto	13
1.4	Notação Adotada	14
1.5	Lista de Abreviações	14
2	Modelo do sinal	<b>15</b>
2.1	Transmissão e Recepção por blocos	15
2.2	Equalização no Domínio da Frequência	19
3	Receptores de sistemas de transmissão em blocos	<b>23</b>
3.1	Receptor símbolo-a-símbolo	23
3.2	Receptor de Máxima Verossimilhança (ML) Global	24
3.3	Receptor ótimo por grupos	26
3.4	Desempenho dos receptores estudados	30
4	Estratégias de agrupamento e desempenho dos receptores	<b>34</b>
4.1	Método 1: Agrupamento visando a minimização da probabilidade de erro de bit do símbolo com pior desempenho	34
4.2	Um critério geral para formação de grupos	38
4.3	Método 2: Agrupamento de máxima correlação	39
4.4	Método 3: Agrupamento de máxima correlação, caso particular para SC-CP	44
4.5	Resultados das simulações	47
5	Deteção por grupos com estimação de canal	<b>59</b>
5.1	Estimação de canal utilizando símbolos piloto e matriz refinadora	59
5.2	Resultados das simulações	62
6	Conclusões	<b>65</b>

## Lista de figuras

2.1	Estrutura geral de um sistema de transmissão por blocos	16
3.1	Receptor símbolo-a-símbolo	23
3.2	Receptor ML global	24
3.3	Estrutura geral do receptor ótimo por grupos	26
3.4	Receptor Ótimo ML por grupos	28
3.5	Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ para MC-ZP	30
3.6	Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ para SC	32
3.7	Módulo da matriz de covariância $\mathbf{K}_{\mathbf{n}_{zp}}^{mc}$	33
4.1	Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP com detecção ótima por grupos	37
4.2	Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP com detecção ótima por grupos	38
4.3	Autocorrelação	45
4.4	Experimento 1: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=64 com detecção ótima por grupos	49
4.5	Experimento 1: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=1024 com detecção ótima por grupos	50
4.6	Experimento 1: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=64 com detecção ótima por grupos	50
4.7	Experimento 1: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=1024 com detecção ótima por grupos	51
4.8	Experimento 2: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=64 com detecção ótima por grupos	51
4.9	Experimento 2: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=1024 com detecção ótima por grupos	52
4.10	Experimento 2: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=64 com detecção ótima por grupos	52
4.11	Experimento 2: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=1024 com detecção ótima por grupos	53
4.12	Experimento 3: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=64 com detecção ótima por grupos	54
4.13	Experimento 3: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=1024 com detecção ótima por grupos	54
4.14	Experimento 3: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=64 com detecção ótima por grupos	55
4.15	Experimento 3: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=1024 com detecção ótima por grupos	55
4.16	Experimento 4: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=64 com detecção ótima por grupos	56
4.17	Experimento 4: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=1024 com detecção ótima por grupos	56
4.18	Experimento 4: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=64 com detecção ótima por grupos	57



4.19	Experimento 4: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=1024 com detecção ótima por grupos	57
5.1	Estrutura da estimação de canal Pós-DFT utilizando matriz purificadora	62
5.2	Experimento 1: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=64 com detecção por grupos	62
5.3	Experimento 1: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=64 com detecção por grupos	63
5.4	Experimento 2: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-ZP, N=64 com detecção por grupos	64
5.5	Experimento 2: Taxa de erro de bit (BER) versus $\frac{E_b}{N_0}$ (dB) para SC-CP, N=64 com detecção por grupos	64

## Lista de tabelas

3.1	Comparação dos receptores	29
4.1	Algoritmo de implementação do Método 1	36
4.2	Algoritmo de implementação do Método 2	43
4.3	Algoritmo de implementação do Método 3	47
4.4	Dados das simulações	47
4.5	Dados dos agrupamentos	48
4.6	Legenda das curvas de desempenho	48

*“Hay hombres que luchan un día y son buenos.  
Hay otros que luchan un año y son mejores.  
Hay quienes luchan muchos años y son muy  
buenos. Pero hay los que luchan toda la vida:  
esos son los imprescindibles.”*

**Bertolt Brecht, .**