

**Marcos de Castro Pacitti**

**Influência da Codificação em  
Marcas D'Água Digitais**

**TESE DE DOUTORADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2006



**Marcos de Castro Pacitti**

**Influência da Codificação em Marcas  
D'Água Digitais**

**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. Weiler Alves Finamore

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2006



**Marcos de Castro Pacitti**

**Influência da Codificação em Marcas  
D'Água Digitais**

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. Weiler Alves Finamore**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. José Mauro Pedro Fortes**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Raimundo Sampaio Neto**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Eduardo Antonio Barros da Silva**

UFRJ

**Prof. Marcelo da Silva Pinho**

ITA

**Prof. Pedro Henrique Gouvêa Coelho**

UERJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de Dezembro de 2006

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

### **Marcos de Castro Pacitti**

Graduou-se no Instituto Tecnológico da Aeronáutica, cursando Engenharia Eletrônica, no ano de 1990, e obteve o título de Mestre em Ciências, especialidade Engenharia Eletrônica, em 1994

#### Ficha Catalográfica

Pacitti, Marcos de Castro

Influência da Codificação em Marcas D'Água Digitais/ Marcos de Castro Pacitti; orientador: Weiler Alves Finamore. — 2006.

80 f.: il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Marca d'água digital. 3. Códigos corretores de erro. 4. Código turbo. 5. Comunicação digital. 6. Modulação. 7. Teoria da informação. I. Finamore, Weiler Alves. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para minha esposa Patrícia e minha filha Júlia.

# Agradecimentos

A minha família, pela motivação e compreensão.

Ao meu orientador, Professor Weiler Alves Finamore, pelo constante apoio e companheirismo.

À CISCEA, pelo suporte e pela flexibilidade que me permitiram desenvolver as atividades do programa de doutoramento.

## Resumo

Pacitti, Marcos de Castro; Finamore, Weiler Alves. **Influência da Codificação em Marcas D'Água Digitais**. Rio de Janeiro, 2006. 80p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese pode ser segmentada em duas partes distintas, porém complementares. A primeira parte trata do problema que tange ao desenvolvimento da maioria dos sistemas de marcação d'água digital: a necessidade de primeiramente selecionar a técnica de modulação não codificada que fará parte de uma arquitetura codificada. Assim, para proceder adequada seleção, os limitantes de desempenho das técnicas não codificadas são ferramentas importantes para otimização de sistemas codificados, objetivando operação próximo à capacidade. Esta parte da tese introduz um novo limitante inferior para técnicas binárias de marcação d'água digital, fundamentado em uma simples equivalência com um sistema de comunicação binário.

A segunda parte desta tese introduz uma nova metodologia para o projeto e análise de sistemas de marcação d'água digital que, sob o ponto de vista da teoria da informação, incorpora a fragilidade e a robustez. A metodologia proposta é desenvolvida com foco no comportamento da curva de desempenho em sistemas codificados, e considera não somente o ganho de codificação, mas também a robustez e a fragilidade do sistema. Este novo conceito introduz a necessidade de revisitar o projeto de sistemas codificados de marcação digital para incorporar também os requisitos de robustez e/ou de fragilidade. Neste contexto, o código turbo atende de imediato aos requisitos para implementação de um sistema de marcação d'água digital robusto, e um sistema frágil pode também ser implementado através da introdução de um esquema de polarização. Este novo esquema de polarização, com o emprego da codificação turbo, também permite a implementação de técnicas semi-frágeis e híbridas, alcançando a robustez e a fragilidade do sistema com apenas uma marcação d'água. Resultados de simulação experimental apóiam a metodologia proposta, e possibilita o aprofundamento da discussão do proposto esquema de polarização em sistemas de marcação d'água digital.

## Palavras-chave

Marca d'água digital, códigos corretores de erro, código turbo, comunicação digital, modulação, teoria da informação, marcas frágeis, marcas robustas, marcas semi-frágeis e híbridas.

## Abstract

Pacitti, Marcos de Castro; Finamore, Weiler Alves. **Coding Influence on Digital Watermarking**. Rio de Janeiro, 2006. 80p.  
PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis can be segmented in two distinct but complementary parts. The first part addresses the problem pertinent to coded digital watermarking systems development require namely the selection of a (uncoded) modulation technique to be part of a coded architecture. Therefore, performance bounds for uncoded techniques are an important tool for coded system optimization, aiming at operation close to capacity. This part introduces a new performance lower bound for uncoded binary watermarking modulation techniques, based on a simple equivalence with a binary communication system, considering an additive gaussian attack model. New  $M$ -ary unidimensional and multidimensional Spread Spectrum based modulation techniques are introduced, including their improved versions. The performances of the proposed techniques are determined, and the performance lower bounds for the corresponding techniques classes are determined as well.

The second part of this thesis, introduces a new methodology for the design and analysis of digital watermarking systems which, from an information theoretic point of view, incorporates robustness and fragility. The proposed methodology is developed by focusing on the probability of error versus watermark-to-noise ratio curve, describing the technique performance, and a scenario for coded techniques which takes into account not only the coding gain, but also the robustness or fragility of the system. This new concept requires that coded digital watermarking systems design be revisited to also include the robustness and fragility requirements. Turbo codes, which appropriately meet these requirements, can be used straightforwardly to construct robust watermarking systems. Fragile systems can also be constructed by introducing the idea of polarization scheme. This new idea has allowed the implementation of hybrid techniques achieving fragility and robustness with a single watermark embedding. Simulation results supports the introduced methodology and allowed us to enhance the discussion on the polarization scheme.

## Keywords

Digital watermarking, error correcting codes, turbo codes, communications theory; modulation; information theory.

# Conteúdo

1	Introdução	13
---	------------	----

## I Modelos, Desempenhos e Técnicas de Marcação D'Água Digital 16

2	Modelo do Problema de Marcação D'Água Digital	17
2.1	Modelo Básico	17
2.2	Modelo Super-Canal	20
2.3	Modelo com Codificação	21
2.4	Análise de Capacidades	22
3	Técnicas e Desempenho da Marcação D'Água Digital	27
3.1	Abordagem Tradicional para a Marcação Binária por Espalhamento Espectral	27
3.2	Espalhamento Espectral Otimizado	28
3.3	Outras Técnicas	30
3.4	Modulação SS Unidimensional M-Ária	30
3.5	Modulação SS Unidimensional M-Ária Otimizada	32
3.6	Modulação SS M-Ária Multidimensional	33
3.7	Modulação SS M-Ária Multidimensional Otimizada	35
3.8	Comentários	36
4	Limitante Inferior de Desempenho de Técnicas não Codificadas	37
4.1	Limitante Inferior da Modulação Binária	37
4.2	Limitante Inferior da Modulação M-Ária não Codificada	43
4.3	Comentários	46

## II Influência da Codificação na Marcação D'Água Digital 47

5	Modelamento da Fragilidade e Robustez de Marcas D'Água digital e a Influência da Codificação	48
5.1	Modelo de Projeto e Análise para as características de Robustez e Fragilidade de Marcas D'Água Digitais	48
5.2	Influência da Codificação na Robustez e na Fragilidade da Marcação D'Água Digital	52
6	Esquema de Polarização do Detetor para Técnicas Frágeis, Semi-frágeis e Híbridas	55
6.1	Polarização do Detetor em Técnicas de Marcação D'Água Digital	55
6.2	Implementações de Técnicas de Marcação D'Água Codificadas Semi-Frágeis	57

6.3	Resultados de Simulações Experimentais	60
6.4	Comentários	66
7	Conclusões	<b>67</b>
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	68
	Bibliografia	<b>68</b>
A	Codificador Turbo	<b>71</b>
A.1	Codificação Turbo	71

## Lista de Figuras

2.1	Modelo do problema da marcação d'água binária não codificada .	18
2.2	Modelo alternativo "super-canal" equivalente ao problema de marcação d'água digital.	20
2.3	Modelo do problema de marcação d'água digital codificada.	22
2.4	Capacidades do problema de marcação d'água como função do fator de robustez, parametrizada com o fator de distorção $\psi = 0, 1$ .	24
2.5	Taxa excedente em função do fator de robustez, parametrizado com o fator de distorção $\psi = 0.1$ .	26
3.1	Modelo da técnica de marcação por Espalhamento Espectral.	27
4.1	Modelo super-canal equivalente.	38
4.2	Desempenho de técnicas de marcação binária não codificada e o limitante inferior.	40
4.3	Curvas de desempenho para as técnicas tipo SS unidimensional M-árias, com $M = 4$ , incluindo o limitante inferior para a corresponde classe de técnicas.	44
4.4	Curvas de desempenho para as técnicas QSS e IQSS, incluindo o limitante inferior para a corresponde classe de técnicas.	45
5.1	Parâmetros de projeto empregando desempenho da técnica STDN de marcação d'água digital.	51
5.2	Desempenho de um codificador turbo típico com taxa 1/2.	53
6.1	Desempenho de um codificador turbo típico com taxa 1/2.	56
6.2	Esquema de marcação d'água digital, com polarização do detector, com opção de seleção de operação robusta ou frágil.	57
6.3	Varição da taxa de erro resultante de ataque para um esquema polarizado codifocado com código turbo.	59
6.4	Média e desvio padrão de $NEB$ para valores de $WNR_N$ que correspondem ataques distintos.	62
6.5	Sintonia da polarização para ampliação da faixa dinâmica da estimativa da intensidade do ataque.	65
A.1	Modelo do codificador turbo.	72
A.2	Codificador RSC.	73
A.3	Modelo do codificador turbo empregando o codificador RSC componente de referência.	74
A.4	Decodificador turbo.	76
A.5	Ganho de codificação para o código turbo em relação ao sistema BPSK.	77
A.6	Efeito do comprimento do interleaver.	78
A.7	Efeito do tipo do interleaver.	79
A.8	Efeito do número de iterações.	79



## Lista de Tabelas

2.1	Notação de Parâmetros	20
4.1	Desempenho de técnicas de marcação d'água digital	39
4.2	Distância do desempenho de cada técnica ao limitante inferior	41