

Dulcinéia Gonçalves Ferreira Pires

*Armazenamento e Recuperação de Marca
D'água Digital em Imagens Compactadas
pelo Padrão JPEG Utilizando Redundância
de Informações nas Sub-bandas Obtidas da
Decomposição Wavelet da Imagem*

Goiânia - GO

Abril/2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Dulcinéia Gonçalves Ferreira Pires

*Armazenamento e Recuperação de Marca
D'água Digital em Imagens Compactadas
pelo Padrão JPEG Utilizando Redundância
de Informações nas Sub-bandas Obtidas da
Decomposição Wavelet da Imagem*

Dissertação apresentada à Coordenação do
Mestrado em Engenharia Elétrica e de Com-
putação da Universidade Federal de Goiás
para a obtenção do título de Mestre em En-
genharia Elétrica e de Computação.

Orientador:

Prof.Dr.Rodrigo Pinto Lemos

MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE PÓS GRADUAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

Goiânia - GO

Abril/2006

*Dedico esta dissertação ao meu esposo e a meus filhos,
que sempre demonstraram interesse pelo meu
bom desempenho me incentivando assim a superar
sempre os meus limites.*

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos para:

- o professor Dr. Rodrigo Pinto Lemos e ao professor Msc. Sandrerley Ramos Pires pela orientação e incentivo;
- a equipe do Instituto de Informática da UFG;
- ao meu esposo Sandrerley, pela revisão deste trabalho;
- aos meus filhos Kênia, Tobias e Bianca pela compreensão da privação da minha presença durante este período de pesquisa e escrita desta dissertação;
- ao CAPES pela bolsa de estudo a mim concedida e;
- a todos os colegas do Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação da UFG.

*“A arte de descobrir a verdade é mais preciosa
que a maioria das verdades que se descobrem.”*

Fontenelle

Resumo

O armazenamento de marca d'água digital em imagens digital tem-se tornado uma área de estudo em evolução. A quantidade de aplicações em que as marcas d'águas digitais podem ser empregadas estimula os estudos na área. Entre as aplicações podem-se citar as autenticações de imagens, a ocultação de informações nas imagens entre outras. Um dos problemas enfrentados atualmente na área é o armazenamento e a recuperação de marcas d'água em imagens compactadas, pois o processo de compactação tende a deteriorar a marca d'água armazenada, dificultando a sua recuperação. Este trabalho se propõe a apresentar uma melhoria em um algoritmo já existente que trata o problema descrito anteriormente. A melhoria consiste em aumentar o nível de redundância de informações da marca d'água na imagem hospedeira, utilizando teoria das *wavelets*, sem prejudicar a qualidade dela. Para tanto, o trabalho apresenta a marca d'água digital, um estudo teórico sobre *wavelet*, mostra e analisa o algoritmo a ser melhorado e, finalmente, propõe a melhoria ao algoritmo. Testes, análises e comentários são feitos a respeito das melhorias implementadas, demonstrando que o trabalho atingiu o objetivo proposto.

Palavras-chave: Marca d'água digital, *Wavelet*, Árvore de zeros.

Abstract

The storage process of digital watermarking in digital image is to become a study area in high evolution. The several kinds of digital watermarking application aid the increase of researches in this area. One can cite image authentication, information hide in digital image and others like example of digital watermarking application. Currently, the problem of saving and recovering information of digital watermarking in compacted image is very studied. The recovering of digital watermark is difficult because the compaction process of the host image can damage the digital watermark stored in its. This work propose to present a improvement in a already existing algorithm that manipulate the problem before described. The improvement is based in increase the level of digital watermarking information redundance in host image, preserving the quality of this image. This redundance is obtained through the use of wavelet theory. Thus, this work presents the digital watermarking, a theoretical study about wavelet, presents and analises the original algorithm to be improved and, finally, propose de improvement in presented algorithm. Tests, analises and comments about the results of improvements are presented to demonstrate the success of this work.

Keywords: Digital watermarking, Wavelets, Zerotrees.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1	Introdução	p. 1
1.1	Introdução	p. 1
1.2	Objetivos Gerais	p. 2
1.3	Objetivos Específicos	p. 3
1.4	Justificativa	p. 3
1.5	Motivação	p. 3
1.6	O Problema	p. 4
1.7	Hipóteses	p. 5
1.7.1	Hipótese Básica	p. 5
1.7.2	Hipótese Secundária	p. 5
1.8	Metodologia	p. 5
1.9	Estrutura da Dissertação	p. 6
1.10	Considerações Finais deste Capítulo	p. 7
2	Marca D'água Digital	p. 8
2.1	Introdução	p. 8
2.2	Marca D'água	p. 8
2.3	Marca D'água Digital	p. 9
2.4	Propósito da Marca D'água Digital	p. 9

2.4.1	Esteganografia	p. 10
2.5	Classificação das Marcas D'água Digitais	p. 11
2.5.1	Marcas d'água digitais robustas	p. 12
2.5.2	Marcas d'água digitais frágeis	p. 12
2.6	Marca D'água em Imagens Cotonos e Binárias	p. 13
2.7	Exemplo de Utilização de Marca D'água	p. 13
2.8	Inserção/Extração da Marca D'água Digital	p. 14
2.8.1	Inserção	p. 14
2.8.2	Extração	p. 15
2.9	Abordagens Utilizadas para Inserção/Extração da Marca D'água Digital	p. 17
2.10	Considerações Finais do Capítulo	p. 20
3	Wavelets e Processamento de Imagens	p. 21
3.1	Introdução	p. 21
3.2	Transformada de Fourier	p. 21
3.2.1	Transformada de Fourier de Tempo-Curto	p. 23
3.2.2	Fourier x <i>Wavelet</i>	p. 24
3.3	<i>Wavelet</i>	p. 25
3.3.1	Transformada discreta <i>wavelet</i>	p. 26
3.4	Representação em Multirresolução	p. 28
3.5	Funções <i>Wavelets</i>	p. 29
3.6	Codificação de Sub-bandas	p. 31
3.7	Transformada <i>Wavelet</i> aplicada a Imagens	p. 34
3.8	Decomposição <i>Wavelet</i> para Imagens Digitais	p. 35
3.9	Árvore de Zeros(<i>Zerotrees</i>)	p. 40
3.10	Considerações Finais do Capítulo	p. 41

4	Manipulação de Marca D'água em Imagem Digital Utilizando Wavelet	p. 43
4.1	Introdução	p. 43
4.2	QSWT	p. 44
4.3	O algoritmo de inserção de Hsieh	p. 44
4.4	Resultados e Análise da Aplicação do Algoritmo de Hsieh	p. 46
4.4.1	Bitmap	p. 46
4.4.2	Joint Photographic Experts Group (JPEG):	p. 48
4.4.3	Conclusões dos testes utilizando o algoritmo de Hsieh e outros	p. 61
5	Uma Nova Abordagem	p. 62
5.1	Introdução	p. 62
5.2	O Algoritmo Proposto	p. 62
5.3	Resultados Obtidos dos Testes Utilizando o Algoritmo Proposto	p. 64
5.3.1	Conclusões dos testes utilizando o algoritmo proposto	p. 101
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	p. 102
6.1	Introdução	p. 102
6.2	Objetivos Gerais, Específicos e Hipóteses	p. 102
6.3	Considerações Finais	p. 103
6.4	Sugestão de Trabalhos Futuros	p. 104
	Referências	p. 105

Lista de Figuras

1.1	Resultados da extração da marca d'água	p. 4
2.1	Taxonomia do uso de marca d'água	p. 11
2.2	Processo de inserção de marca d'água	p. 15
2.3	Processo de inserção de marca d'água com compactação	p. 16
2.4	Processo de extração de marca d'água	p. 17
2.5	Resultados da extração da marca d'água	p. 17
3.1	Diagrama do plano tempo-freqüência	p. 24
3.2	Grade discreta e domínio contínuo para <i>wavelet</i>	p. 27
3.3	Árvore de decomposição da transformada <i>wavelet</i>	p. 30
3.4	Codificação por sub-bandas de análise	p. 31
3.5	Banco de filtros de análise hierárquico	p. 32
3.6	Decomposição do espectro em oitavas	p. 33
3.7	Codificação sub-banda de síntese	p. 33
3.8	Banco de filtros de síntese hierárquico	p. 33
3.9	Banco de filtros com dois canais	p. 34
3.10	Diagrama de blocos do processo de compressão/descompressão de imagens.	p. 35
3.11	Decomposição <i>wavelet</i> unidimensional padrão	p. 36
3.12	Esquema da decomposição <i>wavelet</i> padrão da Imagem	p. 36
3.13	Esquema da decomposição <i>wavelet</i> padrão da Imagem	p. 36
3.14	Decomposição <i>wavelet</i> unidimensional padrão	p. 37
3.15	Decomposição <i>wavelet</i> bidimensional	p. 37
3.16	Decomposição <i>wavelet</i> bidimensional não padrão	p. 38

3.17	Esquema da decomposição <i>wavelet</i> não padrão de uma imagem	p. 39
3.18	Decomposição não padrão da Imagem	p. 39
3.19	Árvore de zeros de uma decomposição <i>wavelet</i>	p. 41
4.1	Imagem hospedeira bitmap após extração - 1	p. 47
4.2	Imagem hospedeira bitmap após extração - 2	p. 48
4.3	Imagem JPEG 100% da rosa após extração da marca - 1	p. 50
4.4	Imagem JPEG 100% da rosa após extração da marca - 2	p. 50
4.5	Imagem JPEG 92% da rosa após extração - 1	p. 52
4.6	Imagem JPEG 92% da rosa após extração - 2	p. 52
4.7	Imagem JPEG 62% da rosa após extração da marca - 1	p. 54
4.8	Imagem JPEG 62% da rosa após extração da marca - 2	p. 54
4.9	Imagem JPEG 35% da rosa após extração da marca - 1	p. 56
4.10	Imagem JPEG 35% da rosa após extração da marca - 2	p. 56
4.11	Imagem JPEG 19% da rosa após extração da marca - 1	p. 58
4.12	Imagem JPEG 19% da rosa após extração da marca - 2	p. 58
4.13	Imagem JPEG 10% da rosa após extração da marca - 1	p. 60
4.14	Imagem JPEG 10% da rosa após extração da marca - 2	p. 60
5.1	Gráfico das correlações das imagens hospedeiras - Bitmap	p. 66
5.2	Gráfico das correlações das marcas d'água - Bitmap	p. 66
5.3	Comparação de imagens bitmap - melhores resultados	p. 67
5.4	Gráfico das correlações das imagens hospedeiras - JPEG 100%	p. 69
5.5	Gráfico das correlações das marcas d'água - JPEG 100%	p. 69
5.6	Comparação de resultados - JPEG 100% - 1	p. 70
5.7	Comparação de resultados - JPEG 100% - 2	p. 71
5.8	Gráfico das correlações das imagens hospedeiras - JPEG 92%	p. 73
5.9	Gráfico das correlações das marcas d'água - JPEG 92%	p. 73

5.10	Comparação de resultados - JPEG 92% - 1	p. 74
5.11	Comparação de resultados - JPEG 92% - 2	p. 75
5.12	Comparação de resultados - JPEG 92% - 3	p. 76
5.13	Gráfico das correlações das imagens hospedeiras - JPEG 62%	p. 78
5.14	Gráfico das correlações das marcas d'águas - JPEG 62%	p. 78
5.15	Comparação de resultados - JPEG 62% - 1	p. 79
5.16	Comparação de resultados - JPEG 62% - 2	p. 80
5.17	Gráfico das correlações das imagens hospedeiras - JPEG 35%	p. 82
5.18	Gráfico das correlações das marcas d'águas - JPEG 35%	p. 82
5.19	Comparação de resultados - JPEG 35% - 1	p. 83
5.20	Comparação de resultados - JPEG 35% - 2	p. 84
5.21	Comparação de resultados - JPEG 35% - 3	p. 85
5.22	Gráfico das correlações das imagens hospedeiras - JPEG 19%	p. 87
5.23	Gráfico das correlações das marcas d'águas - JPEG 19%	p. 87
5.24	Comparação de resultados - JPEG 19% - 1	p. 88
5.25	Comparação de resultados - JPEG 19% - 2	p. 89
5.26	Gráfico das correlações das imagens hospedeiras - JPEG 10%	p. 91
5.27	Gráfico das correlações das marcas d'águas - JPEG 10%	p. 91
5.28	Comparação de resultados - JPEG 10% - 1	p. 92
5.29	Comparação de resultados - JPEG 10% - 2	p. 93
5.30	Comparação de resultados - JPEG 10% - 3	p. 94
5.31	Comparação de resultados - JPEG 10% - 4	p. 95
5.32	Comparação de resultados - JPEG 10% - 5	p. 96
5.33	Comparação de resultados - JPEG 10% - 6	p. 97
5.34	Comparação de resultados - JPEG 10% - 7	p. 98
5.35	Comparação de resultados - JPEG 10% - 8	p. 99

5.36	Comparação de resultados - JPEG 10% - 9	p.100
------	---	-------

Lista de Tabelas

4.1	Correlação das imagens no formato bitmap	p. 47
4.2	Correlação das imagens no formato JPEG 100% de qualidade	p. 49
4.3	Correlação das imagens no formato JPEG 92% de qualidade	p. 51
4.4	Correlação das imagens no formato JPEG 62% de qualidade	p. 53
4.5	Correlação das imagens no formato JPEG 35% de qualidade	p. 55
4.6	Correlação das imagens no formato JPEG 19% de qualidade	p. 57
4.7	Correlação das imagens no formato JPEG 10% de qualidade	p. 59
5.1	Correlação das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e outros e pelo algoritmo proposto no formato BITMAP.	p. 65
5.2	Correlação das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e outros e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 100%.	p. 68
5.3	Correlação das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e outros e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 92%.	p. 72
5.4	Correlação das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 62%.	p. 77
5.5	Correlação das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 35%.	p. 81
5.6	Correlação das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 19%.	p. 86
5.7	Correlação das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 10%.	p. 90

1 *Introdução*

1.1 *Introdução*



Ao lado uma foto publicada no jornal Los Angeles Times em 31 de março de 2003, onde sob fogo hostil, um soldado britânico armado pairava sobre um homem iraquiano carregando um bebê e o orientava para que se abrigasse. Essa parecia muito oportuna no sentido de criar uma visão mais favorável da atuação americana e inglesa no Iraque. Contudo, o que não se verificou antes da publicação foi a veracidade da imagem recebida pelo jornal, sendo que mais tarde constatou-se que se tratava de uma imagem criada artificialmente por uma das milhares formas de se produzir isto atualmente.

Diante de tal fato nota-se que, não só no Brasil, mas em todo o mundo, existe uma fragilidade da sociedade quanto ao reconhecimento da veracidade de uma imagem digital, criando assim uma nova demanda para a tecnologia de imagens digitais que é a garantia da veracidade do conteúdo de uma imagem.

A tecnologia de marca d'água digital (Langelaar; Setyawan; Lagendijk, 1999; Podilchuk; Delp, 2001; Schyndel; Tirkel; Osborne, 1994) se propõe, entre outras aplicações, a garantir a veracidade de uma imagem digital. Pela inserção de uma marca d'água na imagem original é possível posteriormente verificar se a imagem foi corrompida, pois se isso ocorreu a recuperação total da marca digital não será mais possível. Entretanto, marcas d'água digitais podem ser corrompidas caso as imagens que as hospedam passem por processos de compactação¹.

Formatos diversos como o jpeg, gif, tif (Gonzalez; Woods, 2000) e outros foram pro-

¹Processo pelo qual a representação da imagem é reduzida a um mínimo possível de informação com a finalidade de tornar menor a quantidade de dados para a sua representação

postos para representar imagens digitais com uma quantidade mínima de informações. A linguagem html (Marcondes, 2005), utilizada atualmente na construção de páginas da Internet, utiliza os formatos jpeg e gif para o transporte e a apresentação de imagens, tornando esses formatos, particularmente o jpeg, como um padrão de fato para as imagens digitais.

Considerando que os formatos existentes utilizam diferentes técnicas para o processo de compactação, torna-se necessária a busca de técnicas que sejam capazes de inserir uma marca d'água em uma imagem compactada, independente do processo de compactação utilizado para o seu armazenamento e sua transmissão. Nesse contexto, o uso da teoria de *wavelets* (Gomes; Velho; Goldenstein, 1997) pode ser uma boa opção para tratar o armazenamento de marcas d'água digitais em imagens digitais (Cohen; Daubechies; Feauveau, 2000; Deepthi; Nirajan, 1998). Trabalhos como o de Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001) demonstram que o uso da decomposição em *wavelet*, para o armazenamento da marca d'água permite a posterior recuperação da mesma com alto valor de correlação estatística com a marca armazenada.

Este trabalho propõe um melhoramento no algoritmo proposto por Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001) com a finalidade de obter melhores valores de correlação estatística que os já obtidos.

Este capítulo mostra os objetivos gerais e específicos, a justificativa e motivação para desenvolver este trabalho. Detalha o problema de recuperação de marca d'água em imagens compactadas; as hipóteses consideradas nesta dissertação e o processo metodológico seguido em sua realização. E, finalmente, é apresentada a estrutura deste trabalho e as considerações finais deste capítulo.

1.2 **Objetivos Gerais**

Estudos de técnicas de armazenamento de marcas d'água digitais em imagem digital com o intuito de propor um método de armazenamento dessas marcas pelo processo de redundância de informações com a finalidade de recuperar a marca d'água digital com um nível de qualidade superior às técnicas atuais.

1.3 Objetivos Específicos

- Estudar e apresentar o que é marca d'água digital e o estado da arte das técnicas de armazenamento delas em imagens digitais;
- Estudar a teoria de *wavelets* e as aplicações utilizando a análise de multirresolução para o armazenamento da marca d'água digital em imagens digitais;
- Implementar uma técnica de armazenamento de marca d'água digital, utilizando decomposição em *wavelet*;
- Propor o aprimoramento da técnica estudadas pelo aumento de informações redundantes nas várias sub-bandas *wavelets*, e;
- Construir uma aplicação com a finalidade de testar e analisar os aprimoramentos da técnica proposta.

1.4 Justificativa

O aprimoramento de processos para a inserção de marca d'água digital em imagens compactadas, particularmente no formato JPEG, pode tornar mais difundidas e confiáveis as aplicações que se utilizam desse recurso como proteção de direitos autorais, autenticação de documentos, controle de movimentação de documentos digitais, controle de cópias de documentos, entre outros.

O uso da teoria de *wavelet* permitirá que a solução proposta seja computacionalmente simples, pois os processos de decomposição e recomposição de *wavelets* são processos rápidos e de baixa complexidade computacional (Prasad; Iyengar, 1997). Esta eficiência computacional pode tornar, pela técnica proposta, as aplicações mais seguras, sem o acréscimo significativo da sua complexidade computacional.

1.5 Motivação

A realização deste trabalho permitirá o aumento do domínio de conhecimento em áreas tais como:

- Fundamentação matemática da teoria de *wavelet*, bem como as suas aplicações em Processamento de Sinais e Imagens. Particularmente, o entendimento da análise em

multirresolução de sinais;

- Ter conhecimento do estado da arte da utilização das marcas d'água digitais e suas diversas aplicações, podendo assim atuar nessa área de conhecimento, e;
- Abrir espaço, através deste trabalho, para a realização de projetos de pesquisa que permitam um aprofundamento maior no escopo dos conhecimentos adquiridos.

1.6 O Problema

Quando uma marca d'água é inserida indiscriminadamente em uma imagem, percebe-se que existe uma degradação dessa marca quando a imagem é compactada (Ramaswamy, 1998). A Figura 1.1 mostra um exemplo da marca d'água extraída após a inserção indiscriminada dessa marca em uma imagem digital e o quanto essa marca é degradada em consequência do processo de compactação. A figura mostra no item (a) a marca d'água original. Essa marca d'água foi inserida e extraída de uma imagem hospedeira que foi armazenada no formato JPEG com dois níveis distintos de compactação. O item (b) e (c) da 1.1 mostra a marca d'água resultante de uma compactação que manteve 95% e 90% da qualidade, respectivamente.

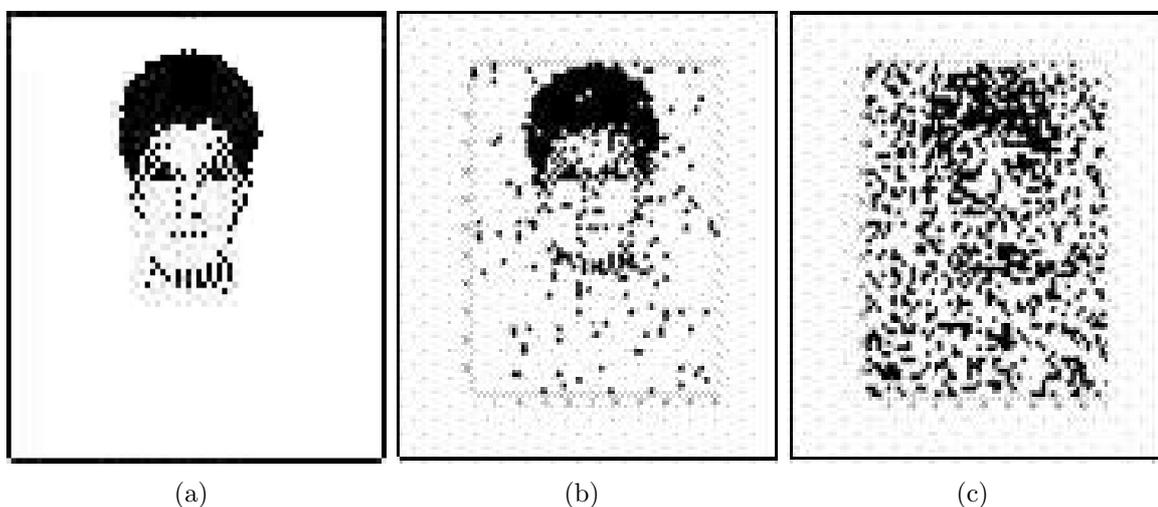


Figura 1.1: Resultados da extração da marca d'água com diversos níveis de compactação.

Outro problema de degradação da marca d'água digital surge em algumas técnicas de inserção, onde o conteúdo da marca é atenuado antes de ser adicionado à imagem hospedeira (Hsieh; Tseng; Huang, 2001). Essa atenuação pode, por um lado levar a marca d'água a se tornar mais imperceptível, mas por outro lado, ocorrerão problemas de quantização

no armazenamento da marca d'água que leva também à degradação dela, prejudicando a sua recuperação da marca d'água.

O problema desta dissertação é analisar os processos de inserção/remoção de marca d'água digital em imagens que visam minimizar os problemas de deterioração da marca d'água digital provenientes de erros de quantização e de compactação da marca.

Busca-se neste trabalho, contribuir com algum melhoramento a ser aplicado nos processos analisados visando reduzir a degradação que uma marca d'água possa sofrer.

1.7 Hipóteses

1.7.1 Hipótese Básica

O aumento da redundância das informações da marca d'água nas sub-bandas *wavelet* permite a recuperação de uma marca d'água mais semelhante com a original inserida.

1.7.2 Hipótese Secundária

A redundância da marca d'água nas sub-bandas *wavelet* permite que ela possa ser mais fortemente atenuada antes de seu armazenamento na imagem hospedeira, tornando essa imagem menos degradada.

1.8 Metodologia

O processo de desenvolvimento do trabalho consiste em três etapas principais: um levantamento bibliográfico buscando um embasamento teórico para a realização do trabalho; um levantamento de trabalhos de manipulação de marca d'água digital, visando escolher uma técnica que possa ser aprimorada pelo embasamento teórico realizado; e finalmente, a proposta de melhoramento no algoritmo escolhido, seguido da construção de um experimento com a finalidade de testar a efetividade dos melhoramentos propostos.

Detalhadamente, os passos planejados para a execução do trabalho são:

1. Levantamento bibliográfico com a finalidade de aumentar o conhecimento sobre marca d'água digital. Cada fonte selecionada contribuirá para a construção do capítulo 2 desta dissertação;

2. Levantamento bibliográfico com a finalidade de aumentar o conhecimento sobre a teoria de *wavelets*, a sua aplicação em processamento de imagens e a análise *wavelet* em multirresolução. Cada fonte selecionada contribuirá para a construção do capítulo 3 desta dissertação;
3. Levantamento bibliográfico em trabalhos que utilizam inserção de marca d'água digital utilizando *wavelets* com a finalidade de escolher um algoritmo que possa ser aprimorado por este trabalho;
4. Propor o aprimoramento do algoritmo escolhido, apresentando o novo algoritmo modificado.
5. Realizar testes, análise dos resultados, enfatizando a comparação dos resultados entre o algoritmo original e a sua versão melhorada, demonstrando que os objetivos do trabalho foram alcançados.
6. Concluir o trabalho, posicionando-se a respeito dos objetivos inicialmente propostos, enumerando as contribuições e sugerindo trabalhos futuros a serem desenvolvidos a respeito do trabalho realizado.

1.9 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: primeiro desenvolve-se uma exploração teórica do que é a marca d'água digital, suas aplicações e um experimento introdutório demonstrando as técnicas básicas de manipulação de marca d'água em imagens. Em seguida são introduzidos os conceitos de *wavelets*. Finalmente, são apresentados e analisados os resultados obtidos pelo algoritmo proposto, comparando à técnica de Hsieh e outros.

O Capítulo 2 mostra uma visão geral do que é marca d'água digital, suas aplicações usuais e problemas atualmente existentes para seu uso. Também são apresentados trabalhos anteriores que contribuíram para a realização desta dissertação.

O Capítulo 3 descreve uma visão geral da teoria de *wavelets*, a aplicação dessa teoria em processamento de imagens e a decomposição em *wavelets* na análise de multirresolução. Também é detalhado nesse capítulo o conceito de árvore de zeros (*zerotrees*).

O Capítulo 4 descreve o conceito da *Qualified Significant Wavelet Tree* (QSWT) e mostra a implementação feita para o trabalho de Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang, 2001). Apresenta os resultados da correlação estatística e das imagens obtidas da reprodução do experimento, bem como os comentários a respeito desses resultados.

O Capítulo 5 mostra a proposta deste trabalho de melhorar o algoritmo de Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001) implementado no capítulo 4 deste trabalho. Os resultados obtidos com essa proposta são analisados e comparados àqueles obtidos pelo algoritmo de Hsieh.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões, resume as contribuições deste trabalho e estabelece as sugestões para os futuros trabalhos.

1.10 Considerações Finais deste Capítulo

Este capítulo mostrou os objetivos gerais, os objetivos específicos, a justificativa e a motivação para desenvolver este trabalho. Apresentou o problema de armazenamento de marca d'água digital, as hipóteses consideradas e o processo metodológico utilizado na realização desta dissertação.

2 Marca D'água Digital

2.1 Introdução

O espetacular crescimento dos sistemas de multimídia interligados pelas redes de computadores nos últimos anos (particularmente com o advento da Internet) tem apresentado um enorme desafio no que tange a aspectos como propriedade, integridade e autenticação dos dados digitais (áudio, vídeo e imagens estáticas). Para enfrentar tal desafio uma antiga idéia para garantir a autenticidade de documentos está sendo utilizada no mundo digital: as marcas d'águas, sendo que no contexto atual elas são chamadas de marca d'água digital (Langelaar; Setyawan; Lagendijk, 2000).

Este capítulo descreve o que é uma marca d'água, os propósitos para os quais elas podem ser utilizadas e o processo básico de inserção e remoção de marca d'água digital em uma imagem hospedeira. O capítulo descreve também o estado da arte das técnicas de inclusão e remoção de marca d'água digital, bem como alguns problemas enfrentados por tais técnicas, particularmente quando se trata de imagens digitais armazenadas em formatos que promovem a sua compactação para o armazenamento.

2.2 Marca D'água

Uma marca d'água é um sinal portador de informação, visualmente imperceptível, que é embutido a um documento físico com o objetivo de garantir a sua autenticidade. A entidade autenticadora é, em teoria, a única entidade capaz de produzir aquele determinado tipo de marca no documento.

A aplicação da marca d'água cria uma espécie de relevo no documento físico que irá representar o conjunto de informações que a marca d'água contém. Os relevos da marca d'água não atrapalham na percepção das informações contidas no documento marcado, proporcionando uma característica de transparência à marca d'água.

A autenticação utilizando desse processo impõe uma relativa segurança ao documento devido às dificuldades de se reproduzir tal marca em um documento falso.

2.3 Marca D'água Digital

Marca d'água digital, a exemplo do original conceito de marca d'água, é um sinal digital, secreto e imperceptível, inserido diretamente em um conjunto de dados digitais destino (Langelaar; Setyawan; Lagendijk, 1999; Podilchuk; Delp, 2001; Schyndel; Tirkel; Osborne, 1994). O conjunto de dados digitais que recebe a marca d'água digital é dito marcado, envelope ou hospedeiro. Existem atualmente diversas técnicas de inserção e remoção de marca d'água digital.

No contexto deste trabalho o conjunto de dados digitais destino, bem como o sinal digital a ser inserido serão imagens digitais (Gonzalez; Woods, 2000) em duas dimensões.

As marcas d'água digital podem ser analisadas e escolhidas por algumas de suas características, onde dependendo da aplicação, podem ser mais ou menos importantes. Algumas dessas características estão citadas a seguir (Yang, 2003):

- **Transparência:** após inserção de marca d'água as características da imagem hospedeira devem ser preservadas de modo que esse procedimento seja imperceptível aos olhos humanos;
- **Payload da marca d'água:** a quantidade de informação (*payload*) que pode ser armazenado na marca d'água depende da aplicação. Para o propósito de proteção de cópia, por exemplo, um *payload* de um bit é suficiente, e;
- **Segurança:** a segurança na técnica de marca d'água pode ser interpretada da mesma forma que a segurança em técnica de criptografia.

2.4 Propósito da Marca D'água Digital

A técnica de inserção e remoção de marca d'água digital em imagens digitais pode ser usada para diversos propósitos. Alguns propósitos de segurança são:

- **Proteção de direitos autorais:** a inserção de uma marca d'água digital no corpo de uma imagem pode garantir a autenticidade de uma imagem, garantindo sempre a quem interessar, a informação de que o conteúdo foi ou não corrompido;

- **Impressão digital:** o proprietário pode inserir diversas marcas d'águas nas cópias de dados que são fornecidas aos usuários, onde a impressão digital adquirida previamente pode ser comparada com a marca inserida pelo proprietário;
- **Proteção de cópias:** a informação armazenada na marca d'água pode controlar diretamente o dispositivo de gravação digital, com o propósito de proteção da gravação. Neste caso, a marca d'água pode ser representada como um bit que proíbe a cópia, onde o detector de marca d'água no gravador determina se os dados oferecidos podem ou não serem armazenados, e;
- **Autenticação de dados:** marca d'água frágil pode ser usada para verificar a autenticidade dos dados. Ela indica se os dados têm sido alterados e fornece informação da localização onde eles foram alterados.

Além dos propósitos de segurança citados acima, a técnica pode ser usada para diversos outros fins, como:

- **Indexação:** comentários podem ser inseridos em imagens com a finalidade de tornar mais claras as informações apresentadas nelas. Um exemplo clássico é a inserção de legendas em um filme;
- **Segurança médica:** inserir os dados e os nomes dos pacientes nas imagens médicas pode ser uma medida útil e segura (Deepthi; Nirajan, 1998), (Kong; Feng, 2001), (Coatrieux; Sankur; Rolland,);
- **Ocultação de dados:** a técnica da marca d'água pode ser usada para a transmissão de mensagem secreta.

O primeiro passo no estudo das marcas d'água é o estudo das técnicas utilizadas para embutir a informação em uma imagem, conhecidas como esteganografia (*information hiding* ou *steganography*, em inglês) (Fridrich; M.; Du, 2001).

2.4.1 Esteganografia

A esteganografia é a área de pesquisa que estuda como inserir a maior quantidade possível de informações com uma mínima deterioração na qualidade da imagem hospedeira, sem se preocupar com a utilidade da informação escondida ou se a informação escondida é fácil ou difícil de ser removida.

A Figura 2.1 apresenta as diversas aplicação para o uso de marca d'água. Essa classificação apresentada em (Vleeschouwer; Delaigle, 2002) mostra que as marcas podem ser robustas, semi-robustas e até frágeis, dependendo da aplicação que será construída.

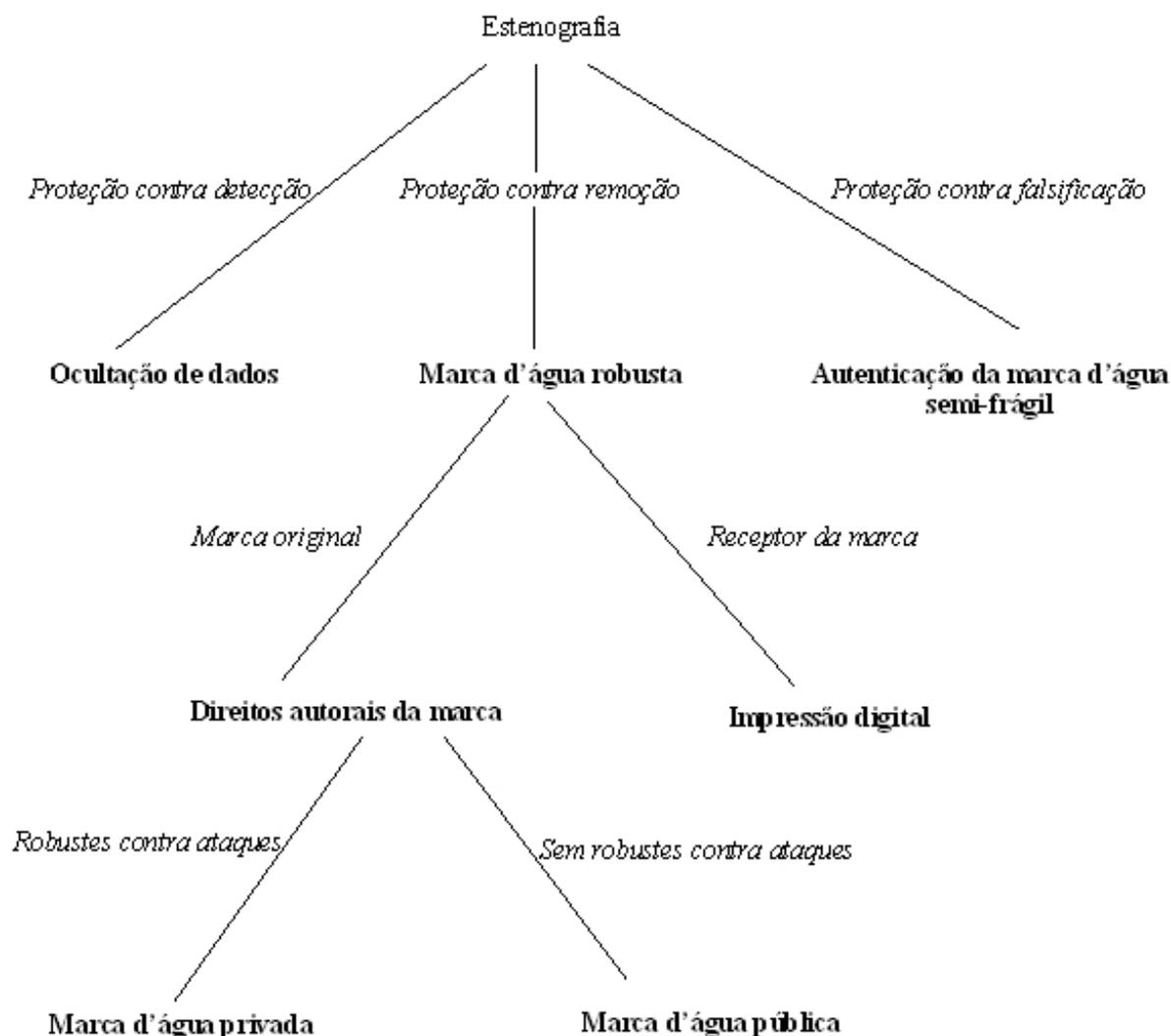


Figura 2.1: Taxonomia do uso das técnicas de manipulação de marca d'água.

2.5 Classificação das Marcas D'água Digitais

As marcas d'água digitais podem ser classificadas de acordo com a dificuldade delas serem removidas da imagem hospedeira. Elas podem ser robustas, frágeis e semi-frágeis (Vleeschouwer; Delaigle, 2002). Esta classificação também determina a finalidade para a qual a marca será utilizada.

2.5.1 Marcas d'água digitais robustas

As marcas robustas são projetadas para resistirem à maioria dos procedimentos de manipulação de imagens. A informação embutida em uma imagem através de uma marca robusta deve ser possível de ser extraída mesmo que a imagem hospedeira sofra rotação, mudança de escala, mudança de brilho/contraste, compactação com perdas com diferentes níveis de compressão, corte das bordas e outros. Devido a essas características, as marcas d'água robustas são normalmente utilizadas para a verificação da propriedade (copyright) das imagens.

Uma boa marca d'água robusta deve ser impossível de ser removida sem que a qualidade da imagem resultante se deteriore a ponto de destruir o seu conteúdo visual. Isto é, a correlação entre uma imagem marcada e a marca robusta nela inserida deve permanecer detectável mesmo após um processamento digital, enquanto a imagem resultante do processamento continuar visualmente reconhecível e identificável como a imagem original.

2.5.2 Marcas d'água digitais frágeis

As marcas frágeis são facilmente removíveis e corrompidas por qualquer processamento na imagem (Yeung; Mintzer, 1997; Wong, 1997; Wu; Liu, 2000). Esse tipo de marca d'água é útil para verificar a integridade e a autenticidade, pois possibilita detectar alterações na imagem. O termo “frágil” não é completamente correto para qualificar esses tipos de marcas d'água, sendo que o termo “marca d'água de autenticação” é mais adequado. Contudo, por razões históricas o termo frágil é mantido nos trabalhos da área, inclusive neste.

As marcas frágeis de autenticação detectam qualquer alteração na imagem. O processamento da imagem com o objetivo de promover ajustes como brilho/contraste, equalização e outros, visando melhorar a qualidade da imagem, é interpretado pelos algoritmos desse tipo de marca d'água digital como uma tentativa de adulteração maliciosa.

Compactar uma imagem com perdas (como JPEG ou JPEG2000) em diferentes níveis de compressão deve ser uma operação permitida. Ainda, imprimir e escanear uma imagem não deve levar à perda da autenticação. Assim, visando tratar esse tipo de problema, foram propostas as marcas d'água semi-frágeis (Vleeschouwer; Delaigle, 2002). Uma marca semi-frágil serve para autenticar imagens. Contudo, os algoritmos que manipulam esse tipo de marca d'água digital procuram distinguir as alterações que modificam uma imagem substancialmente daquelas que não modificam o conteúdo visual da imagem.

Uma marca semi-frágil normalmente extrai algumas características da imagem que permanecem invariantes através das operações “permitidas” e as insere de volta na imagem de forma que a alteração de uma dessas características possa ser detectada (Vleeschouwer; Delaigle, 2002).

2.6 Marca D'água em Imagens Cotonas e Binárias

Existe uma forma “natural” de embutir as marcas de autenticação em imagens de tonalidade contínua (contone) não compactadas: é inserir os dados nos bits menos significativos (LSBs). Alterar os LSBs afeta muito pouco a qualidade da imagem, ao mesmo tempo em que se conhece exatamente os bits que serão afetados pela inserção da marca.

Não ocorre o mesmo com as imagens binárias. Em uma imagem binária, cada *pixel* consiste de um único bit, de forma que não existe LSB. Isto traz dificuldades especiais para projetar marcas de autenticação para este tipo de imagem.

Nesta dissertação não serão usadas imagens binárias para a recepção de marcas d'água, motivo pelo qual não será discutido neste trabalho os problemas pertinentes à manipulação de imagens binárias. Quanto às imagens em tons de cinza, serão utilizadas imagens com 256 tons, sendo que elas serão compactadas, dificultando a aplicação de técnicas como a de LSBs citada acima.

2.7 Exemplo de Utilização de Marca D'água

As técnicas de manipulação de marca d'água podem ser aplicadas em diversas áreas do conhecimento, propiciando melhorias em processos de automação, artefatos industriais e outros (Kim, 2002). Algumas dessas diversas aplicações estão enumeradas a seguir.

1. *Câmera digital segura*: o artigo de Friedman (Friedman, 1993) é tido como o trabalho que inspirou os primeiros trabalhos de marca d'água de autenticação. Na câmera digital proposta, ela produz dois arquivos de saída para cada imagem capturada: a primeira é a própria imagem digital capturada pela câmera em algum formato; e a segunda é uma assinatura digital produzida aplicando a chave privada da câmera. Deve-se guardar os dois arquivos, para que se possa autenticar a imagem mais tarde. Uma vez que a imagem digital e a assinatura digital são geradas pela câmera e armazenadas no computador, a integridade e a autenticidade da imagem pode ser

verificada usando um programa para decodificar a assinatura digital, que pode ser distribuído livremente aos usuários;

2. *Autenticação de imagens distribuídas pela rede:* a inserção de uma marca d'água em uma imagem pode permitir a divulgação dessa imagem pela WEB e ao mesmo tempo garantir que ela contém as informações originais e que ninguém adulterou o seu conteúdo. Da mesma forma que em aplicações onde utiliza-se a criptografia assimétrica (Burnett, 2002), pode-se aplicar semelhantes técnicas aos processos de inserção e remoção de marca d'água digital;
3. *Fax confiável:* uma “máquina de fax confiável” contendo internamente uma chave privada pode inserir uma marca d'água digital em todos os documentos transmitidos por ela. O receptor de fax, usando a chave pública da máquina transmissora, pode verificar se o documento foi originado de uma máquina específica e se ele foi ou não manipulado durante a transmissão (Kim, 2002).

2.8 Inserção/Extração da Marca D'água Digital

Os vários processos de inserção/extração da marca d'água em imagens digitais envolvem uma grande quantidade de abordagens (Langelaar; Setyawan; Lagendijk, 1999). Nesta seção tem-se o objetivo restrito de apresentar um processo simplificado de inserção e remoção de marca d'água digital, visando apresentar a fragilidade do método quando a imagem detentora da marca d'água for armazenada de forma compactada, como ocorre no formato JPEG. Na seqüência do capítulo, mais abordagens contemplando aspectos mais abrangentes são apresentadas.

2.8.1 Inserção

Uma aplicação, desenvolvida em MATLAB (MathWorks, 2004), para a inserção de uma marca d'água digital foi feita da seguinte forma:

1. Seja uma imagem considerada como original, denotada por **Io** e uma imagem binária que é a marca d'água denominada **Mdag**;
2. A aplicação adiciona à imagem original **Io**, por um processo de inserção, a imagem **Mdag**, gerando como resultado uma nova imagem com a marca d'água, denominada **Iw**, e;

3. A imagem resultante será armazenada no formato JPEG com compactação com nível de qualidade de 100%, 95% e 90%.

A Figura 2.2 mostra o esquema da aplicação. Pode-se observar nessa figura que a imagem com marca d'água inserida é visualmente idêntica à imagem original.

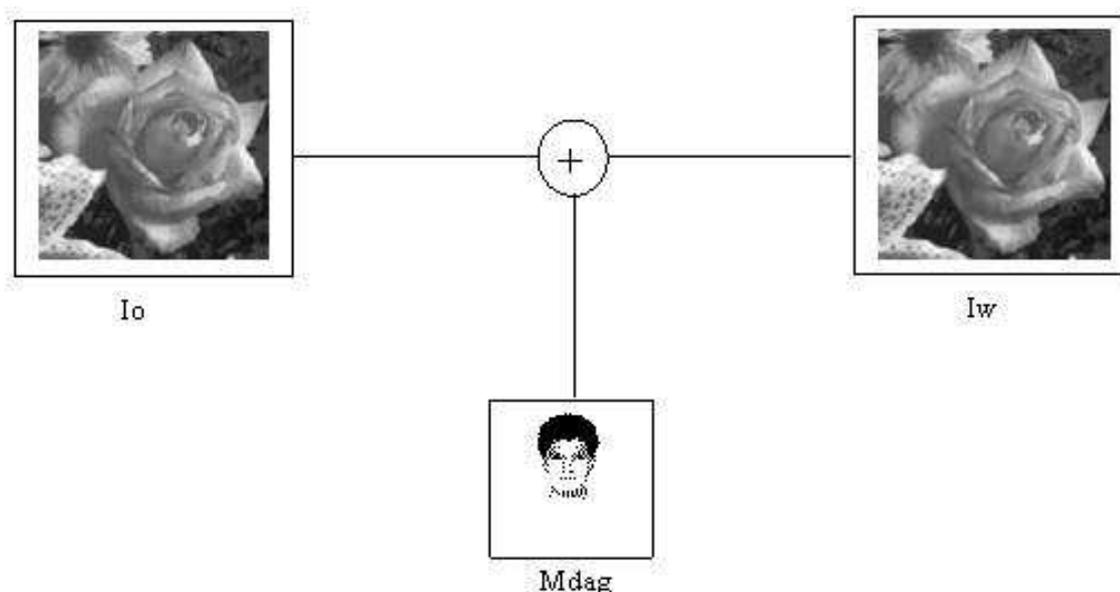


Figura 2.2: Inserção da marca d'água em uma imagem.

A Figura 2.3 mostra o processo de inserção da marca d'água nos níveis de qualidade citados acima. As imagens são salvas como 100%, 95% e 90% de qualidade no formato JPEG.

Da mesma forma que mostrado na Figura 2.2, as imagens hospedeiras da marca permanecem visualmente inalteradas, apesar da redução do nível de qualidade na gravação das informações.

Embora a imagem hospedeira não tenha sofrido grandes alterações visuais, o processo utilizado de simplesmente adicionar a marca d'água na imagem hospedeira, pode levar à degradação da marca d'água. A próxima seção detalha essa situação.

2.8.2 Extração

A aplicação irá fazer a extração da marca d'água digital após o armazenamento da imagem hospedeira em três níveis distintos de qualidade. A aplicação de extração está estruturada da seguinte forma:

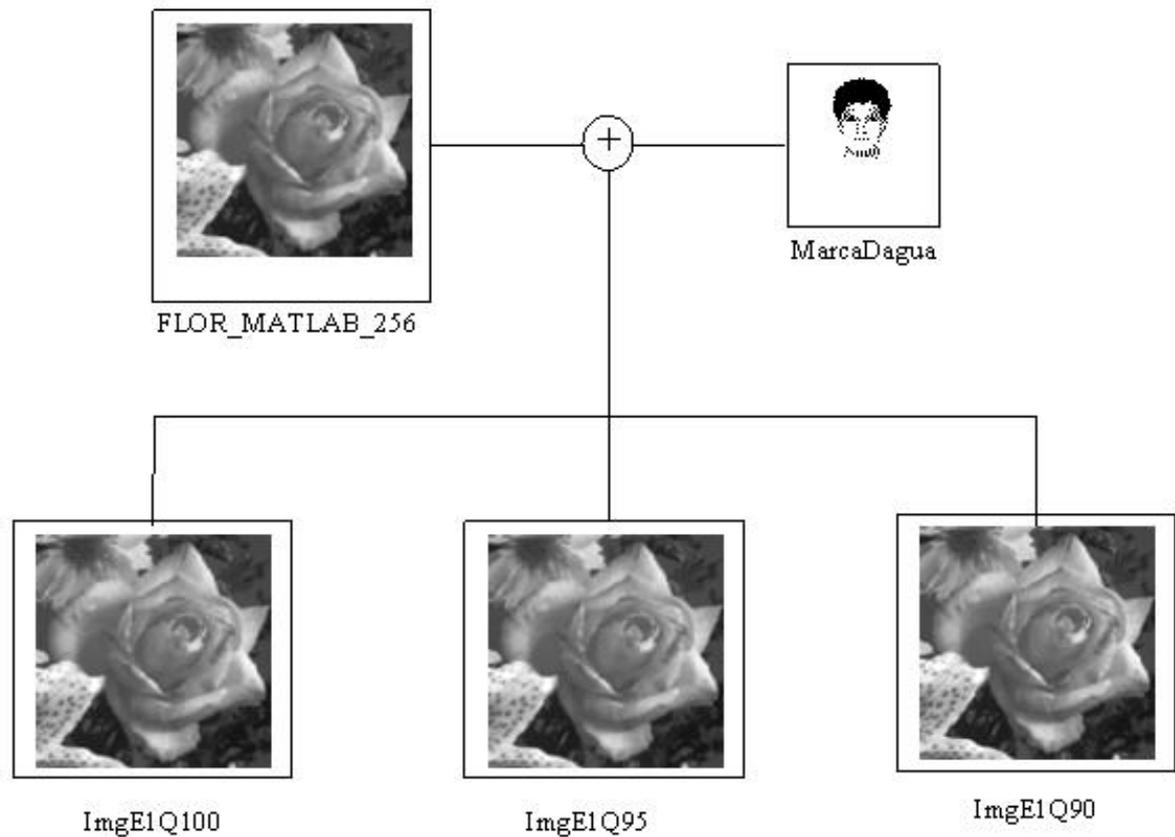


Figura 2.3: Inserção da marca d'água em uma imagem, armazenando a imagem resultante em um formato compactado.

1. Dada a imagem I_w , com seu respectivo nível de compressão, será feita a subtração da imagem I_o , obtendo-se a marca d'água M_{dag} .
2. Após a subtração é feita a recomposição das diferenças obtidas nos *pixels* da marca d'água, e;
3. O mesmo processo é repetido para cada imagem hospedeira armazenada, obtendo assim as marcas d'água para cada um dos níveis de qualidade gerado.

A Figura 2.4 mostra o esquema da aplicação que faz a extração da marca d'água, ilustrando o processo descrito acima.

A Figura 2.5 mostra as marcas d'água extraídas a partir da inserção e armazenamento em três níveis de compressão. Nota-se que a marca d'água recuperada sofre uma deterioração no processo à medida que o nível de compressão aumenta. Na Figura 2.5 (a) a marca foi recuperada no nível de qualidade de 90%, na 2.5 (b) a marca foi recuperada no nível de qualidade de 95% e 2.5 (c) a marca foi recuperada no nível de qualidade de 100%. Nota-se que quando uma marca d'água é inserida em uma imagem, sem que se

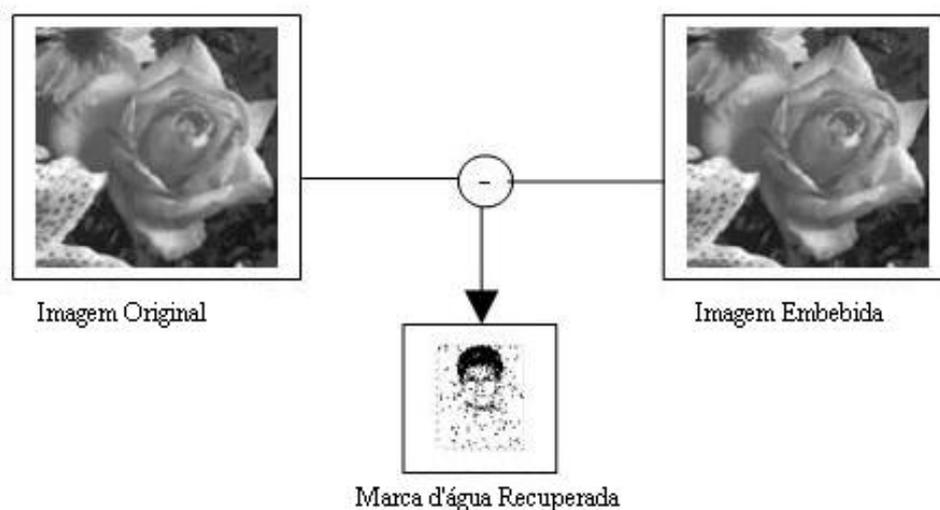


Figura 2.4: Extração da marca d'água da imagem hospedeira.

estabeleça um critério que defina quais as regiões da imagem devem ser alteradas com o conteúdo da marca d'água, percebe-se que existe uma degradação dessa marca quando a imagem é armazenada de forma compactada (Ramaswamy, 1998).

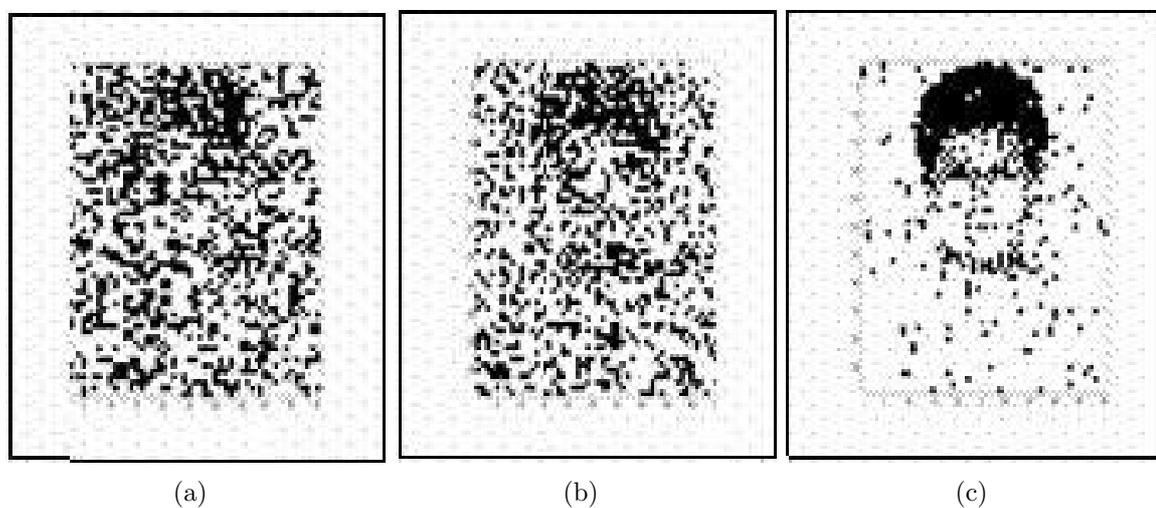


Figura 2.5: Resultados da extração da marca d'água.

2.9 Abordagens Utilizadas para Inserção/Extração da Marca D'água Digital

Na literatura atual existem diversos trabalhos propondo técnicas diferentes para os processos de inserção e remoção de marca d'água para os diversos propósitos e aplicações

já citados anteriormente neste capítulo.

Buscando a satisfação dos objetivos deste trabalho, são detalhados a seguir alguns trabalhos que visam o armazenamento e a remoção de marca d'água, particularmente considerando condições de que mesmo em caso de compactação da imagem, a marca d'água não sofrerá impactos significativos.

Observa-se nos trabalhos avaliados o emprego de teoria das *wavelets* (Gomes; Velho; Goldenstein, 1997) como recurso para tornar a marca d'água mais robusta aos processos de compactação. O capítulo 3 desta dissertação apresenta com detalhes a teoria de *wavelets*, bem como a aplicabilidade desta teoria ao processamento de imagens.

Alguns trabalhos correlatos que amparam o desenvolvimento desta dissertação são:

1. Uma abordagem para inserção e extração da marca d'água digital no domínio espacial é apresentado em Langelaar e outros (Langelaar; Setyawan; Lagendijk, 2000). O objetivo do método proposto por eles é o de autenticação de uma imagem, isto é, garantir que não houve alteração no conteúdo de uma determinada imagem. No trabalho é proposto que a marca d'água, W , seja composta por ruídos com valores -1, 0, 1 podendo ter um tamanho menor, mas múltiplo do tamanho da imagem a ser autenticada, I . A inserção de W em I é feita da seguinte forma:

$$I_W(x, y) = T(x, y) + k.W(x, y) \quad (2.1)$$

onde k é um fator de escala para a inserção da marca d'água, buscando uma maior robustez para a mesma.

Não existe um processo de recuperação da marca d'água, existe apenas a aplicação de um método estatístico de correlações para verificar a autenticidade da imagem. Visto que a marca d'água é um ruído conhecido, faz-se um cálculo de correlação entre a imagem hospedeira e o padrão de ruído da marca d'água. Se o valor de correlação ficar abaixo de um determinado limiar T , considera-se que a imagem foi adulterada.

A utilização de processos como esse no domínio espacial pode causar dificuldades ao processo, pois para alterações localizadas, por se tratar de valores estatísticos de correlação, pode ocorrer a não captação da adulteração. O uso de outros domínios pode ser mais adequado devido ao fato de que o ruído inserido, quando retornado ao espacial, ficará "espalhado" na imagem (Gonzalez; Woods, 2000). Como as adulterações ocorrem sempre no domínio do tempo, pequenas alterações da imagem pode

influir em grandes porções de ruído, facilitando a detecção.

- Um método proposto por Shapiro (Jerome, 1993) utiliza a teoria de *wavelets* (Gomes; Velho; Goldenstein, 1997) para a compressão de uma imagem digital. O processo consiste em fazer a decomposição em *wavelet* da imagem original em três níveis e a partir desta decomposição localizar as árvores de zeros (*zerotrees*). O conjunto de árvores de zeros mais significativas de uma imagem possui informações suficientes para recompor a imagem. Dependendo da qualidade escolhida para a recomposição da imagem, escolhe-se um limiar que irá determinar no terceiro nível de decomposição, se uma árvore de zeros é significativa para a formação da imagem. Todos os coeficientes da raiz de árvore de zeros que forem maiores que o valor do limiar define essas árvores de zeros como importantes para o contexto.

A proposta de Shapiro é conhecida atualmente como o algoritmo de compactação EZW. Ele pode ser dito como um algoritmo sem ou com reduzida perda, sendo isso definido pelo valor do limiar.

O processo de Shapiro permite determinar quais as estruturas de uma imagem permanecem intactas no caso de compactação. Para este trabalho, que visa a inserção de informações de uma marca d'água em uma imagem que será armazenada de forma compactada, o uso de árvores de zeros pode ser útil ao desenvolvimento de um processo de inserção.

- Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang, 2001) inseriram o conceito de *Qualified Significant Wavelet Tree* QSWT, que consiste na determinação de um subconjunto de árvores de zeros que são as mais significativas. O objetivo do trabalho de Hsieh é inserir e extrair uma marca d'água em uma imagem hospedeira, sem danificá-la e ainda armazená-la compactada no formato jpeg. O método proposto determina a QSWT, classificando as árvores de zeros pela significância de seus coeficientes. Da mesma forma, classifica-se também a marca d'água e, finalmente, armazena o seu conteúdo na QSWT, de maneira redundante em cada uma das sub-bandas da decomposição *wavelet*. Assim os valores mais altos da marca d'água serão armazenados nos valores mais significativos da QSWT, reduzindo o impacto de degradação da imagem.

Os resultados obtidos no trabalho demonstraram que o processo é robusto o suficiente para armazenar marcas d'água em imagens armazenadas no formato jpeg e com alto nível de compactação.

4. A partir do trabalho de Hsieh, surgiram algumas variações para esse método proposto. Temi e outros (Temi; Choomchuay; Lasakul, 2005) propuseram alguma abordagem em que a QSWT é obtida das sub-bandas de aproximação (LL) da decomposição *wavelet*. Essa abordagem permite que a marca d'água armazenada se torne mais resistente a alterações na imagem hospedeira, tais como compactação, rotação, mudança de escala e outras.

Como contribuição para esta dissertação, o trabalho de Temi e outros (Temi; Choomchuay; Lasakul, 2005) demonstra que apesar dos bons resultados obtidos por Hsieh e outros, algumas variações devem ser tentadas no algoritmo proposto por eles, buscando maior efetividade para a abordagem.

2.10 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou o que é marca d'água digital aplicada a imagens digital, detalhou suas características, os propósitos e os problemas de seu uso e algumas aplicações onde o emprego desse conhecimento é útil.

O capítulo apresentou também um processo básico de inserção e extração de marca d'água digital, elucidando o problema do armazenamento delas em imagens hospedeiras que serão armazenadas de maneira compactada.

Finalmente, o capítulo apresentou algumas abordagens existentes na literatura que buscam tratar os problemas de armazenamento e recuperação de marca d'água digital em imagens que serão armazenadas de forma compactada. O uso da teoria de *wavelets* foi a ferramenta principal utilizada nos trabalhos apresentados.

3 *Wavelets e Processamento de Imagens*

3.1 Introdução

As transformadas matemáticas são empregadas para mapear funções de um domínio, domínio original, para outro, domínio da transformada. O uso de transformadas são importantes em processamento e análise de sinais porque no domínio transformado algumas propriedades relevantes do sinal ficam mais evidentes (Gonzalez; Woods , 2000).

O uso de transformadas é muito comum em compressão de imagens (Gonzalez; Woods , 2000), pois o emprego dessa ferramenta permite produzir um conjunto de valores, representando os *pixels* reordenados no novo domínio, que evidenciam a maior concentração de energia em um menor número de coeficientes.

Dentre as várias transformadas existentes atualmente, as transformadas *wavelets* (Gomes; Velho; Goldenstein, 1997) se tornaram uma das mais utilizadas em processamento de imagem, devido às suas características que as tornam mais simples e rápidas que diversas técnicas da área.

Este capítulo apresenta a fundamentação matemática das transformada de Fourier e da transformada *Wavelet*, o uso de *wavelet* em domínios discretos e algumas aplicações dessa transformada em processamento de imagem.

3.2 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier foi descoberta no início do século XIX, pelo matemático francês Joseph Fourier, que mostrou que qualquer função aperiódica pode ser representada como uma soma infinita de funções exponenciais complexas. Atualmente, a transformada de Fourier tem sido utilizada em inúmeras aplicações em processamento de sinais.

Na transformada de Fourier uma função no domínio do tempo é mapeada em uma função no domínio da frequência, onde o seu conteúdo pode ser analisado. Esta transposição ocorre porque a transformada de Fourier expande a função original em termos de um somatório de funções senos e cossenos de duração infinita e com várias frequências de períodos. A transformação inversa de Fourier transforma o sinal do domínio da frequência para o domínio do tempo.

Seja $x(t)$ uma função contínua da variável real t . A transformada de Fourier de $x(t)$, denotado por $\mathfrak{S}\{x(t)\}$, é definida pela Equação (3.1):

$$\mathfrak{S}\{x(t)\} = X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

Obtém-se a transformada a partir do produto interno do sinal $x(t)$ com um conjunto de exponenciais complexas, que constituem uma base ortonormal. Na Equação (3.1), t é usado para representar o tempo, f a frequência e j é igual a $\sqrt{-1}$.

Dado $X(f)$, $x(t)$ pode ser obtido usando a transformada inversa de Fourier (*inverse Fourier transform* - IFT) definida pela equação:

$$\mathfrak{S}^{-1}\{X(f)\} = x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (3.2)$$

As Equações (3.1) e (3.2) existem se $x(t)$ é contínua e integrável e $X(f)$ é integrável. Na transformada de Fourier o X denota o sinal no domínio da frequência e na transformada inversa de Fourier e x denota o sinal no domínio do tempo.

A transformada de Fourier pode ser facilmente estendida para uma função de duas variáveis $f(x, y)$. Se $f(x, y)$ é contínua e integrável e $F(u, v)$ é integrável, a transformada de Fourier é definida pela equação:

$$\mathfrak{S}\{f(x, y)\} = F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y)e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (3.3)$$

e a transformada inversa de Fourier é definida por:

$$\mathfrak{S}^{-1}\{F(u, v)\} = f(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v)e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (3.4)$$

onde u e v são variáveis de frequência.

Para uma seqüência de duração finita, é possível desenvolver uma representação alternativa da transformada de Fourier, referida como transformada discreta de Fourier (*discrete Fourier transform* - DFT). Uma vez que a transformada de Fourier não pode ser computada por se tratar de uma série infinita, a DFT, que é uma versão amostrada, isto é, finita e discreta, permite o seu cálculo computacional, e para sinais de tempo finito a DFT é uma completa representação de Fourier do sinal. Mais informações descrevendo a DFT e a transformada rápida de Fourier (*fast Fourier transform* - FFT) podem ser obtidas em (Gonzalez; Woods, 2000).

3.2.1 Transformada de Fourier de Tempo-Curto

As funções senos e cossenos têm um suporte infinito e são bem adaptadas para analisar sinais estacionários (sinais cujo conteúdo de freqüência não varia no tempo), porém não são apropriados para descrever sinais não-estacionários (transientes), isto é, aqueles nos quais a resposta em freqüência varia no tempo. Nenhuma informação de freqüência do sinal está disponível no domínio do tempo e nenhuma informação de tempo está disponível no sinal transformado (domínio da freqüência).

A transformada de Fourier possui resolução máxima em freqüência mas nenhuma resolução no tempo. Isto significa que pode-se determinar todas as freqüências presentes em um sinal, porém não se pode saber quando elas estão presentes.

A transformada de Fourier de tempo-curto (*short-time Fourier transform* - STFT) é uma solução para obter melhor localização no tempo e freqüência na decomposição de um sinal (Cohen et al., 1995). A STFT é uma versão da transformada de Fourier que utiliza janelas no tempo, e seus respectivos deslocamentos, como bases para a transformada. Em análise de sinais, existem várias escolhas possíveis para a função janela $g(t)$, sendo as principais as que possuem suporte compacto e regularidade razoável. Quando a janela selecionada é Gaussiana, a STFT é conhecida também como transformada de Gabor.

A STFT de um sinal $x(t)$ é definida por:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(t)g(t - \tau)]e^{j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

onde $x(t)$ é o sinal, $g(t - \tau)$ é a função janela centrada em τ .

Quando baixas freqüências são observadas em um sinal é necessário uma longa observação no tempo. Ao contrário, quando altas freqüências são observadas, somente uma curta observação no tempo é necessária. O princípio da incerteza de Heisenberg, da física

quântica, estabelece que não se pode obter a informação exata da frequência de um sinal e o instante/local exato no tempo/espaco onde essa frequência ocorreu. O que se pode saber é o intervalo de tempo que certas bandas de frequência existem. Com isso, não é possível obter alta resolução em tempo e frequência simultaneamente. Em outras palavras, um sinal não pode ser representado como um ponto no espaço tempo-frequência.

Pelo fato de na STFT uma simples janela no domínio do tempo ser usada para todas as frequências, a resolução da análise é a mesma em todas as localizações do plano tempo-frequência. Uma vantagem da transformada *wavelet* é que a janela varia, com isso têm-se funções bases curtas para alta frequência e longas para baixa frequência. A Figura 3.1 mostra na letra (a) a representação de bases de Fourier e na letra (b) a representação de bases *wavelets*, no plano tempo-frequência (Graps, 1995).

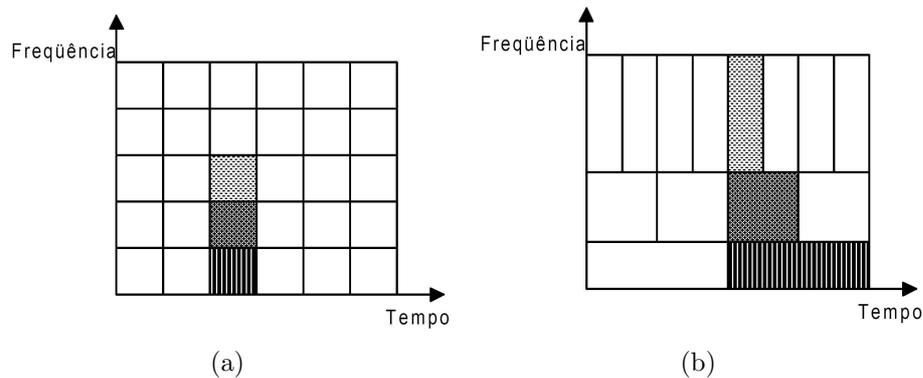


Figura 3.1: Diagrama do plano tempo-frequência.

Pode-se observar na Figura 3.1 (a) que baixas frequências possuem a altura dos retângulos mais baixos (que correspondem melhor resolução em frequência), porém o comprimento é mais longo (“pobre” resolução no tempo). Para altas frequências ocorre o contrário. Este fato é importante na análise de sinais já que geralmente são os componentes de baixa frequência que caracterizam o comportamento de um determinado sinal, enquanto que os componentes de alta frequência nos fornecem os detalhes desse sinal.

3.2.2 Fourier x *Wavelet*

A transformada de Fourier de tempo-curto permite a análise de um sinal em tempo e frequência. Já a transformada *wavelet*, apresentada a seguir, permite decompor um sinal em componentes que são bem localizadas em tempo (via translação) e escala (via dilatação/contração), introduzindo assim a análise em tempo-escala. No caso de *wavelets*, normalmente não se fala em representação tempo-frequência mas em representação tempo-escala, porque o termo frequência é reservado à transformada de Fourier. Devido às

propriedades de localização em tempo e escala, a transformada *wavelet* pode facilmente detectar informação local em um sinal.

Ao contrário da transformada de Fourier, a transformada *wavelet* não possui um único conjunto de funções base, mas sim vários conjuntos de funções bases (*wavelets*) possíveis.

Uma *wavelet* no contexto da transformada discreta *wavelet* (*discrete wavelet transform* - DWT) (Edwards, 1991) é uma função ortogonal que pode ser aplicada a um conjunto finito de dados. Ao contrário das funções senos e cossenos da transformada de Fourier, as *wavelets* não precisam ter duração infinita. Este suporte compacto permite a transformada *wavelet* transladar uma função no domínio do tempo em uma representação que não é localizada somente em frequência (como a transformada de Fourier) mas também no domínio do tempo (Cody, 1992). O termo translação é usado no mesmo sentido como ele é usado na STFT. Ele está relacionado à localização da janela, quando a janela é deslocada (*shifted*) no sinal.

3.3 Wavelet

Wavelets são funções de bases compactas que são utilizadas para representar sinais em múltiplos níveis de detalhe. As funções *wavelets* ($\Psi_{a,b}$) são geradas a partir de uma única função $\Psi(t)$, de suporte compacto e denominadas de *wavelets* mãe (*mother wavelet*), pela de operações de dilatações e translações definidas como (Daubechies, 1988; Prasad; Iyengar, 1997):

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.6)$$

onde $a, b \in \mathbb{R}$, $a > 0$, b representa o deslocamento no espaço e a é o fator de escala, sendo que para $a > 1$ tem-se uma dilatação e para $1 > a > 0$ uma contração de $\Psi(t)$. O fator de multiplicação $\frac{1}{\sqrt{a}}$ é uma normalização da energia pelas diferentes escalas. Além disso, $\Psi \in L^2(\mathbb{R})$, deve satisfazer à condição descrita na Equação (3.7).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (3.7)$$

Para a transformada *wavelet* ser inversível, a função $\Psi(t)$ deve satisfazer à condição de admissibilidade descrita pela Equação (3.8).

$$\mathbf{C}_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\xi)|^2}{\xi} d\xi < \infty \quad (3.8)$$

onde $\hat{\Psi}$ é a transformada de Fourier de $\Psi(t)$, conforme descrito na Equação (3.9).

$$\hat{\Psi}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) e^{-i\xi t} dt \quad (3.9)$$

3.3.1 Transformada discreta *wavelet*

A transformada *wavelet* é uma ferramenta que permite decompor um sinal em diferentes níveis de escala, permitindo assim, estudar cada componente e sinais de uma determinada frequência, separadamente em sua escala correspondente.

Para o estudo de sinais, particularmente imagens, é necessário que a teoria de *wavelets* seja aplicada a domínios discretos. As imagens são representadas pelo posicionamento dos *pixels* que possuem sempre uma coordenada inteira e um valor de intensidade também inteiro, sendo portanto inerentes a um domínio discreto (Gonzalez; Woods , 2000).

Na transformada discreta *wavelet* (DWT) os parâmetros de dilatação a_0 e translação b_0 variam discretamente e, tipicamente, restritos a uma grade com um passo de dilatação $a_0 > 1$ e um passo de translação $b_0 \neq 0$. Assim a família de *wavelets* de interesse, para $j \in \mathbb{Z}$, onde j é um parâmetro de escala, torna-os então descritos pelas Equações (3.10) e (3.11) (Daubechies, 1988):

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \Psi\left(\frac{t - kb_0 a_0^j}{a_0^j}\right) \quad (3.10)$$

ou

$$\Psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (3.11)$$

Correspondendo a

$$a = a_0^j \quad (3.12)$$

e

$$b = kb_0 a_0^j \quad (3.13)$$

Pode-se perceber na Equação (3.13) que o parâmetro de translação b depende da taxa de dilatação escolhida. Para j grande e positivo, a função $\Psi_{j,1}$ é bem dilatada e os passos de translação são grandes ($b_0 a_0^j$) e são adaptados a esta grande largura. Para j grande e negativo ocorre o contrário, a função $\Psi_{j,0}$ é bastante contraída e os passos de translação pequenos, ($b_0 a_0^j$) são necessários para ainda cobrir toda a extensão.

Para efeito de simplicidade na implementação computacional da transformada, assume-se dilatações binárias e translações unitárias, isto é, $a_0 = 2$ e $b_0 = 1$ a função *wavelet*

torna-se a Equação (3.14).

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\Psi(2^{-j}t - k) \quad (3.14)$$

Constituindo uma base ortogonal para $L^2(\mathbb{R})$. Assim, tem-se uma amostragem diádica que é mais adequada para processos computacionais. Portanto, a técnica de *wavelet* baseia-se na utilização de longos intervalos de tempo, onde as informações de baixa frequência são disponíveis e de curtos intervalos de tempo, onde as informações de alta frequência estão mais evidentes. Deste modo, surge a teoria da análise de multiresolução (Mallat, 1989), que se baseia na utilização de banco de filtros em quadratura (*quadrature mirror filters* – QMF).

A Figura 3.2 mostra que no caso da *wavelet* discreta, o domínio é visto como uma grade, ao contrário da *wavelet* contínua, onde o domínio possui limites bem mais suaves.

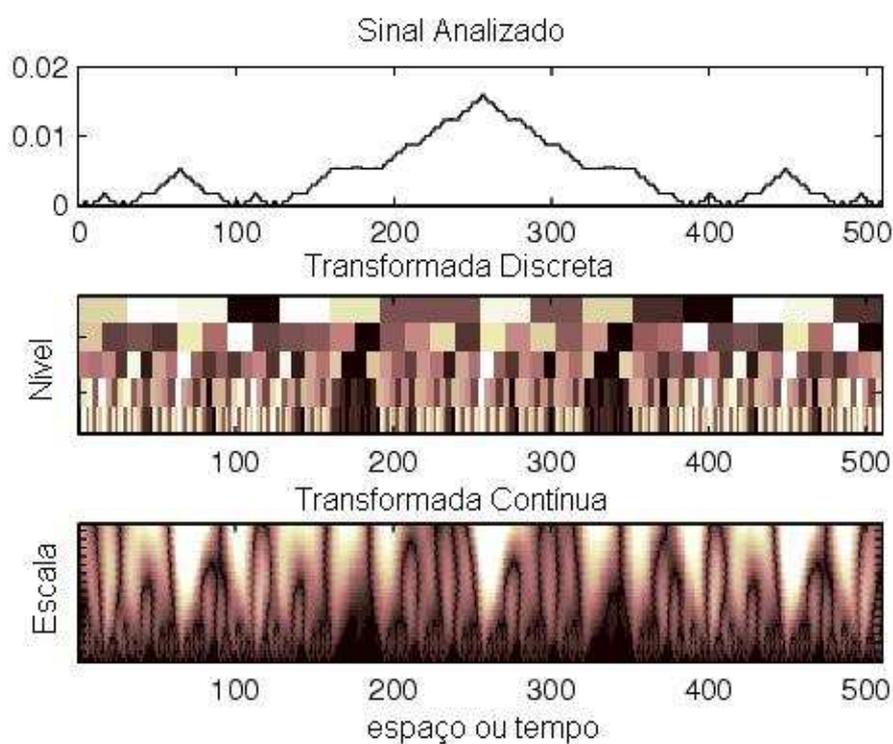


Figura 3.2: Domínio discreto e contínuo para um determinado sinal decomposto nas duas formas.

3.4 Representação em Multirresolução

O conceito de análise em multirresolução, desenvolvido por Mallat (Mallat, 1989), permite analisar um sinal com diferentes frequências em diferentes escalas. O uso da teoria de *wavelets* por Mallat levou ao desenvolvimento de uma técnica de decomposição *wavelet* em um domínio discreto que tem a possibilidade de ser inversível. No caso de uma imagem é possível decompô-la em vários níveis de resolução e depois recompô-la ao nível original de resolução.

Uma análise em multirresolução de $L^2(\mathbb{R})$ é definida por uma seqüência de sub-espacos fechados $V_j \subset L^2(\mathbb{R})$, onde $j \in \mathbb{Z}$ e satisfaz às seguintes propriedades (Mallat, 1989; Cohen; Daubechies; Feauveau, 2000; Prasad; Iyengar, 1997; Jawerth; Sweldens, 1994):

- Aninhamento:

$$\cdots \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \cdots$$

- Densidade da união em $L^2(\mathbb{R})$:

$$\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j \text{ é denso em } L^2(\mathbb{R}) \text{ e } \bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = 0$$

- Escala:

$$f(t) \in V_j \iff f(2t) \iff V_{j+1} \forall_n \in \mathbb{Z}$$

- Invariância ao deslocamento:

$$f(t) \in V_0 \implies f(t - n) \in V_0 \iff \forall_n \in \mathbb{Z}$$

- Existência de uma função de escala:

$$\exists \varphi \in V_0 \text{ tal que } \{\varphi(t - k) \mid k \in \mathbb{Z}\} \text{ é uma base de Riesz }^1$$

Se $\{\varphi(t - k) \mid k \in \mathbb{Z}\}$ é uma base ortogonal para V_0 , tem-se uma análise em multirresolução e as bases *wavelet* construídas de $\varphi(t)$ são chamadas *wavelets* ortonormais. A análise em multirresolução requer uma base para cada espaço V_j . Para os outros sub-espacos V_j , $j \neq 0$ define-se a Equação (3.15) onde o índice j denota a escala e k indica o deslocamento inteiro.

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (3.15)$$

Como $\varphi \in V_0 \subset V_1$, então existe um conjunto finito de coeficientes h_k tal que a função de

¹ $\{\varphi_{0,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$ é uma base de Riesz de V_0 se e somente se $\exists A > 0$ e $B < 1$, tais que $\forall (c_k)_{k \in \mathbb{Z}} \in L^2(\mathbb{R})$ e: $A (\sum_{k \in \mathbb{Z}} |c_k|^2) \leq \| \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k \varphi_{0,k} \|^2 \leq B (\sum_{k \in \mathbb{Z}} |c_k|^2)$

escala satisfaz a Equação (3.16).

$$\varphi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \Psi_{l,k}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \Psi(2t - k) \quad (3.16)$$

A Equação (3.16) é conhecida por vários nomes diferentes: equação de refinamento (*refinement equation*), equação de dilatação (*dilation equation*) ou equação da diferença de escala-dois (*two-scale difference equation*) (Mallat, 1989; Cohen; Daubechies; Feauveau, 2000; Prasad; Iyengar, 1997; Jawerth; Sweldens, 1994).

A função $\varphi(t)$ é usualmente normalizada, isto é, $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 1$.

3.5 Funções *Wavelets*

Sabe-se que o subespaço $V_j \subset V_{j+1}$, então pode-se definir $W_j, \forall j \in \mathbb{Z}$, como o complemento ortogonal de V_j em V_{j+1} , isto é, um espaço que satisfaz (Cohen; Daubechies; Feauveau, 2000; Jawerth; Sweldens, 1994; Prasad; Iyengar, 1997)

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j \quad W_j \perp V_j \quad (3.17)$$

onde o símbolo \oplus é a soma direta, e $\forall u \in V_{j+1}, u = v + w$, de modo que $v \in V_j$ e $w \in W_j$, com $v, w = 0$, ou seja, cada elemento de V_{j+1} pode ser escrito, de maneira única, como uma soma de um elemento de W_j com um elemento de V_j .

O espaço W_j contém as informações detalhe, necessárias para ir de V_j a V_{j+1} . Essas informações detalhe são extraídas do sinal original usando a função *wavelet* (t). Conseqüentemente a Equação (3.18).

$$V_{j+1} = \bigoplus_{-\infty}^j W_j, \quad (3.18)$$

e $L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j$

onde todos os subespaços W_j são mutuamente ortogonais, isto é

$$W_j \perp W_k, j \neq k. \quad (3.19)$$

A função Ψ é uma *wavelet* se o conjunto de funções $\{\Psi(t - k) | k \in \mathbb{Z}\}$ é uma base de *Riesz* de W_0 (Sweldens; Piessens, 1993). A coleção de funções *wavelet* $\{\Psi_{j,k} | j, k \in \mathbb{Z}\}$ é então uma base de *Riesz* de $L^2(\mathbb{R})$.

Uma função $\Psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ tal que $\{\Psi(t-k) | k \in \mathbb{Z}\}$ é dita ser ortonormal se as funções $\Psi_{j,k}$ formarem uma base ortonormal para W_0 . Para os outros subespaços W_j (para $j \neq 0$) e $k \in \mathbb{Z}$, define-se

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \Psi(2^j t - k). \quad (3.20)$$

A função *wavelets* diádica da Equação (3.20) é um tipo particular de transformada *wavelet* (outras dilatações são possíveis, porém dilatações diádicas são mais práticas computacionalmente). Para a transformada unidimensional, *wavelets* $\Psi(j,k)$, são geradas por escalonamento binário (contraído por um fator de 2) e translações diádicas de uma *wavelet* $\Psi(t)$. A Figura 3.3 mostra o esquema resultante desse tipo de decomposição.

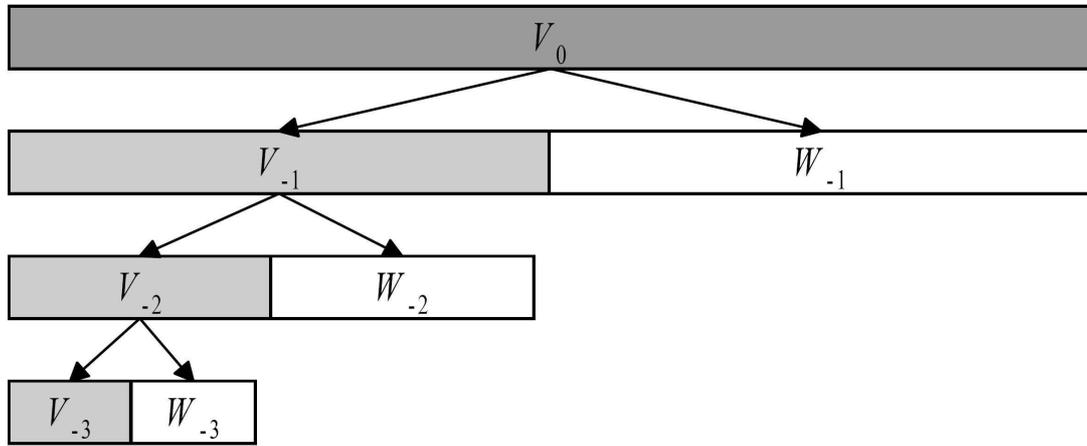


Figura 3.3: Árvore de decomposição da transformada *wavelet*.

Pelo fato que V_0 e W_0 são subespaços de V_1 , $V_0 \subset V_1$ e $W_0 \subset V_1$, pode-se expressar a *wavelet*(x) em termos da função de escala $\varphi(t)$

$$\Psi(t) = \sum_{K \in \mathbb{Z}} g_k \Psi_{1,k}(t) = \sqrt{2} \sum_{K \in \mathbb{Z}} g_k \Psi(2t - k) \quad (3.21)$$

para um conjunto finito de coeficientes g_k , de modo que

$$g_k = (-1)^k h_{1-k}, \quad (3.22)$$

satisfazendo

$$\sum_k g_k = 0 \quad (3.23)$$

Os aspectos teóricos da transformada *wavelet* é de muita importância prática pelo fato de se poder computar eficientemente os coeficientes *wavelets* e reconstruir funções a partir

desses coeficientes. E os algoritmos, conhecidos como transformada *wavelet* rápida (*fast wavelet transform* - FWT), são análogos a transformada rápida de Fourier e seguem da equação de refinamento mostrada na Equação (3.16) deste capítulo.

3.6 Codificação de Sub-bandas

Uma representação em tempo-escala de um sinal digital é obtida usando técnicas de filtragens digitais (Polikar, 1998). Filtrar um sinal corresponde à operação matemática de convoluir o sinal com a resposta ao impulsiva do filtro. Na DWT, filtros de diferentes frequências de corte são usados para analisar o sinal em diferentes escalas. O sinal é passado por uma série de filtros: passa-alta para analisar as altas frequências e passa-baixa para analisar as baixas frequências.

A DWT emprega dois conjuntos de funções chamadas funções de escala e funções *wavelet*, que são associadas com filtros passa-baixa e filtros passa-alta respectivamente. A DWT é computada analisando o sinal em diferentes bandas de frequências com diferentes resoluções pela decomposição do sinal em componentes de aproximação (ou *smooth*) e componentes detalhe. São as componentes detalhe que armazenam as informações necessárias para permitir a reconstrução da imagem a partir das componentes aproximação.

A decomposição do sinal em diferentes bandas de frequências é obtida simplesmente por sucessivas filtragens passa-baixa e passa-alta do sinal no domínio do tempo. Filtros passa-baixa e passa-alta juntos constituem um banco de filtros. O sinal original s_j da Figura 3.4 é primeiro filtrado por um filtro passa-baixa \tilde{H} e um filtro passa-alta \tilde{G} . Depois da filtragem do sinal, a metade das amostras podem ser eliminadas por um subamostrador de fator 2 ($2\downarrow$). O resultado é um sinal passa-baixa (s_{j-1}) e um sinal passa-alta (d_{j-1}), cada um deles contendo a metade das amostras do sinal de entrada s_j .

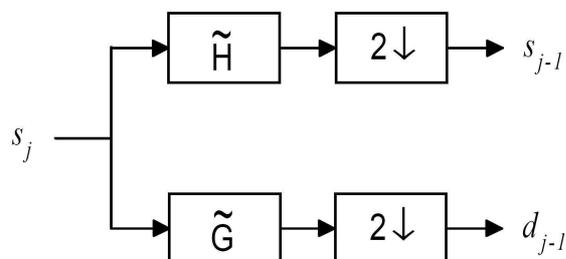


Figura 3.4: Codificação sub-banda de análise.

Em processamento digital de sinais, os filtros \tilde{H} e \tilde{G} são chamados de filtros de qua-

dratura espelhada (*quadrature mirror filters* - QMF).

A decomposição QMF reduz pela metade a resolução no tempo sendo que somente a metade do número de amostras agora caracterizam o sinal de entrada. O procedimento QMF, que também é conhecido como codificação por sub-banda, pode ser repetido para obter uma decomposição adicional (Polikar, 1998).

Pode-se construir uma representação hierárquica de um sinal filtrando recursivamente a saída passa-baixa do banco de filtros. Este processo é ilustrado graficamente na Figura 3.5 para quatro níveis de resolução (os filtros são aplicados quatro vezes), onde s_j é o sinal original que é decomposto (ou transformado) e \tilde{H} e \tilde{G} são filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente. Este esquema é conhecido também como decomposição piramidal.

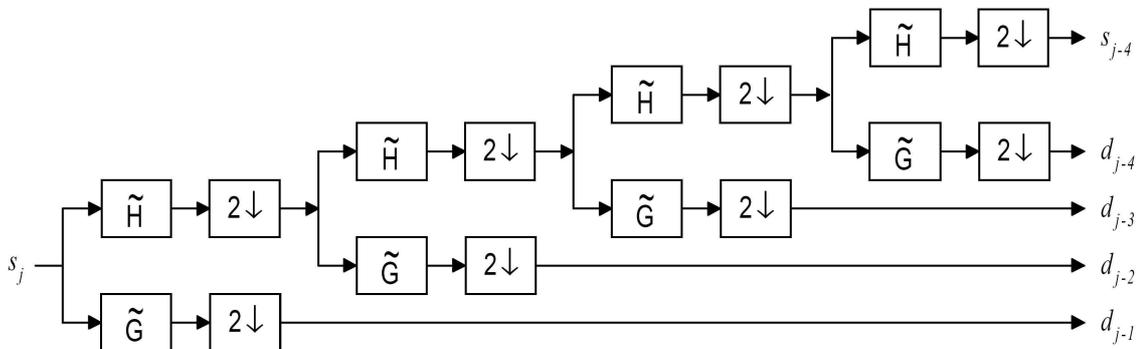


Figura 3.5: Banco de filtros de análise hierárquico.

Na Figura 3.5 a saída s_{j-4} do banco de filtros é uma versão do sinal de entrada em uma resolução dezesseis vezes menor. O filtro passa-alta produz os coeficientes *wavelets* para o nível, e o filtro passa-baixa produz a função escala para o próximo nível da decomposição hierárquica. Os coeficientes da saída s_{j-4} correspondem ao subespaço V_{-4} e os coeficientes d_{j-4} , d_{j-3} , d_{j-2} e d_{j-1} , correspondem aos subespaços W_{-4} , W_{-3} , W_{-2} e W_{-1} respectivamente. O conjunto de aproximações sucessivas (V_j) juntamente com o conjunto de detalhes sucessivos (W_j) forma o que é chamado de decomposição em multiresolução do sinal original.

Nos sistemas ditos de dois canais, o sinal de entrada é transformado em duas bandas, sendo uma de baixa frequência e outra de alta frequência. Quando as bandas de baixa frequência forem entradas para um outro sistema de banco de filtros, idêntico ao primeiro, cria-se uma estrutura do tipo árvore, como na Figura 3.5, que divide o espectro do sinal original em oitavas. A Figura 3.6 ilustra a decomposição do sinal em oitavas, que é o ponto inicial do esquema em multiresolução.

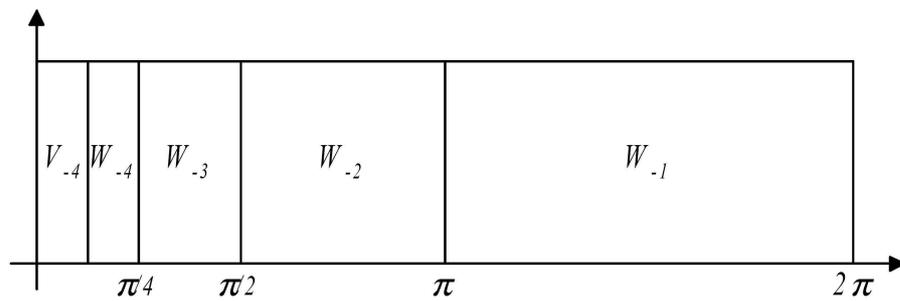


Figura 3.6: Decomposição do espectro em oitavas.

O processo de síntese, ou reconstrução, consiste em colocar zeros entre cada amostra. Em seguida, o sinal é filtrado utilizando um filtro passa baixa H e um filtro passa alta G inversos aos filtros \tilde{H} e \tilde{G} , respectivamente. A Figura 3.7 mostra uma representação do processo de síntese, utilizando um banco de filtros de dois canais e a Figura 3.8 ilustra o processo de reconstrução hierárquica de um sinal que foi transformado em quatro níveis de resolução.

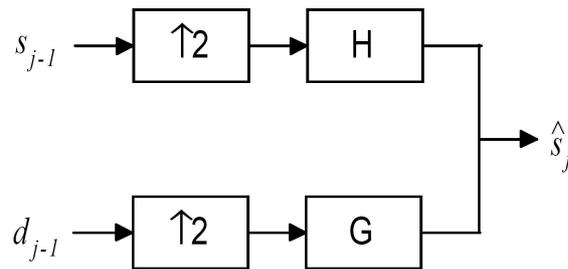


Figura 3.7: Codificação por sub-banda de síntese.

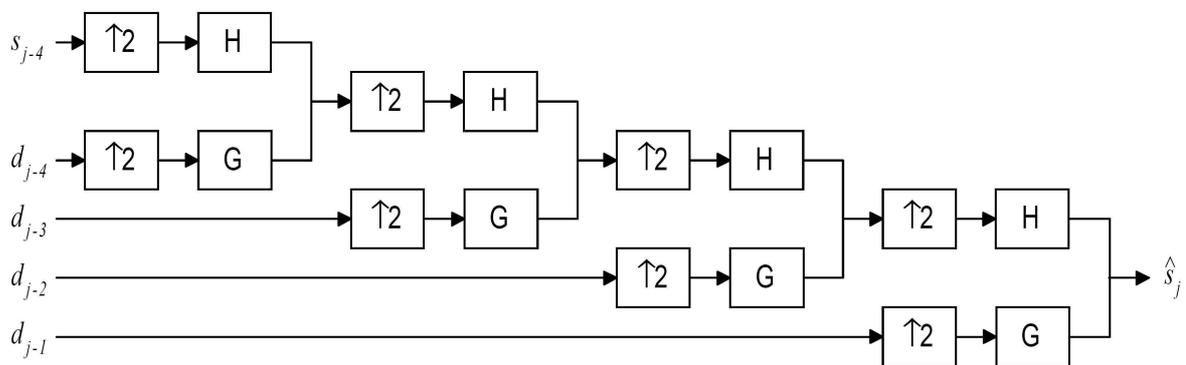


Figura 3.8: Banco de filtros de síntese hierárquico.

Um banco de filtros digitais é uma coleção de filtros digitais, com uma entrada ou uma saída comum. O esquema completo para um banco de filtros com dois canais é mostrado

na Figura 3.9. Ele envolve dois filtros de análise \tilde{H} (passa baixa) e \tilde{G} (passa alta) e dois filtros de síntese H (passa baixa) e G (passa alta).

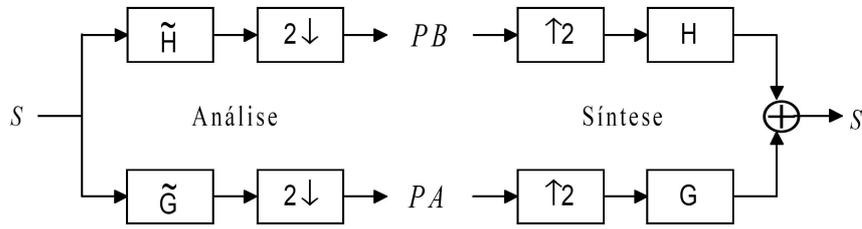


Figura 3.9: Banco de filtros com dois canais.

Uma perfeita reconstrução do sinal de entrada S pode ser obtida caso seja realizado um projeto apropriado dos filtros de análise e de síntese do banco de filtros. Um banco de filtros é dito ser um banco de filtros de reconstrução perfeita (*perfect reconstruction filter bank* - PRFB) se o sinal de saída é igual ao sinal de entrada, como na Figura 3.9 e tem-se, nesse caso, os filtros de análise seguidos pelos filtros de síntese igual a identidade, como na Equação (3.24).

$$H.\tilde{H} + G.\tilde{G} = I \quad (3.24)$$

e os filtros de síntese seguidos pelos filtros de análise é também igual a identidade, ou seja,

$$\tilde{H}.H = I, \tilde{H}.G = 0, \tilde{G}.G = I. \quad (3.25)$$

A teoria de banco de filtros estabelece que para eliminar o *aliasing* as relações (Villasenor; Belzer; Liao, 1995):

$$g_1(n) = (-1)^{n+1}h_0(n) \quad (3.26)$$

e

$$h_1(n) = (-1)^n g_0(n) \quad (3.27)$$

devem ser satisfeitas, onde $g_0(n)$ e $g_1(n)$ são os filtros de síntese e $h_0(n)$ e $h_1(n)$ os filtros de análise. Neste caso, tem-se os filtros de síntese definidos em termos dos filtros de análise.

3.7 Transformada *Wavelet* aplicada a Imagens

A Figura 3.10 mostra os processos de compressão e descompressão aplicados em imagens digitais. As perdas de informações geralmente ocorrem na aplicação da transformada

wavelet (decorrentes dos arredondamentos de valores de ponto flutuante) e na etapa de quantização/limiar (*threshold*) dos coeficientes transformados. Os codificadores de entropia permitem a compressão sem que exista a perda de informações. A Figura 3.10 mostra o diagrama de blocos do processo de compressão/descompressão de imagens.

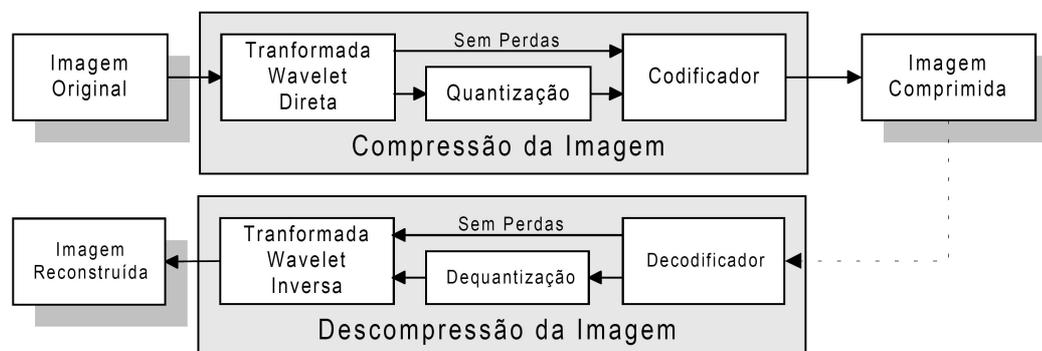


Figura 3.10: Diagrama em blocos do processo de compressão/descompressão de imagens.

A transformada *wavelet* direta mapeia os dados da imagem original para um outro domínio, sem fornecer nenhuma compressão dos dados em relação à imagem original, porém a transformada inversa, em muitos casos, permite uma reconstrução exata das informações anteriores. Nesse novo domínio os dados são caracterizados por uma grande quantidade de valores iguais ou próximos de zero, que torna eficiente o uso de codificadores de entropia. A compressão é realizada pela quantização/limiar e pela codificação dos coeficientes *wavelets*. A reconstrução da imagem é efetuada invertendo as operações do processo de compressão.

3.8 Decomposição *Wavelet* para Imagens Digitais

A aplicação da transformada *wavelets* bidimensional tem uma propriedade conhecida por propriedade de separabilidade, que é uma característica importante, que faz da transformada *wavelet* uma poderosa ferramenta em processamento de sinais em várias dimensões.

Para um sinal com dimensão n maior do que 1, a transformada *wavelet* é realizada pela transformação de cada dimensão do sinal independentemente. A Figura 3.11 mostra o esquema de decomposição unidimensional de uma imagem digital.

Quando aplica-se a transformada *wavelet* unidimensional em cada uma das linhas obtém-se um coeficiente de média e os coeficientes detalhes para cada linha. Em seguida, trata-se essas linhas transformadas como se elas fossem uma nova imagem e aplica-se

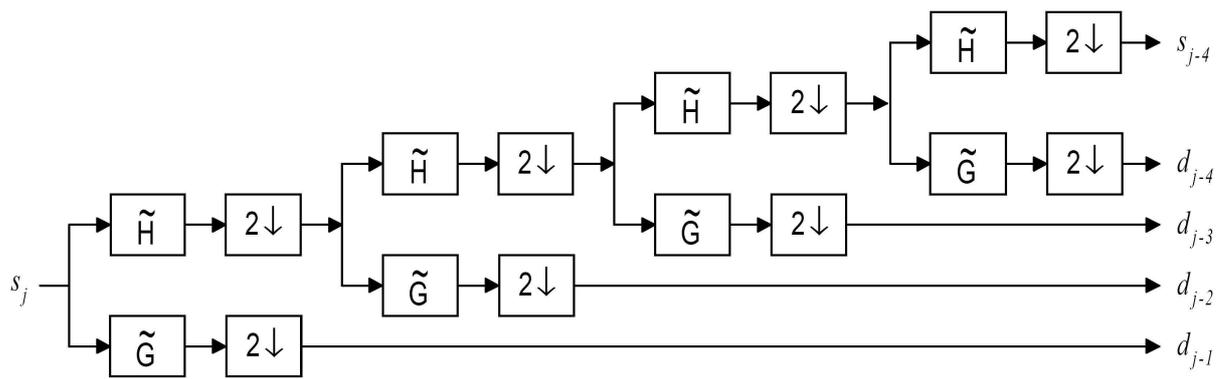


Figura 3.11: Esquema de decomposição *wavelet* unidimensional.

mais uma vez a transformada unidimensional para cada coluna da imagem. A Figura 3.12 mostra os estágios da decomposição *wavelet* unidimensional aplicado nas colunas da imagem: na letra (a) a imagem a ser decomposta; (b) imagem decomposta em um nível, (c) imagem decomposta em dois níveis e (d) imagem decomposta em três níveis e na Figura 3.13, ilustra os estágios da decomposição *wavelet* unidimensional aplicada nas linhas após a decomposição vertical, essa operação resulta em uma imagem decomposta bidimensional, chamada de decomposição *wavelet* bidimensional padrão. A Figura 3.14 mostra o resultado da aplicação da decomposição padrão na imagem da Lena.

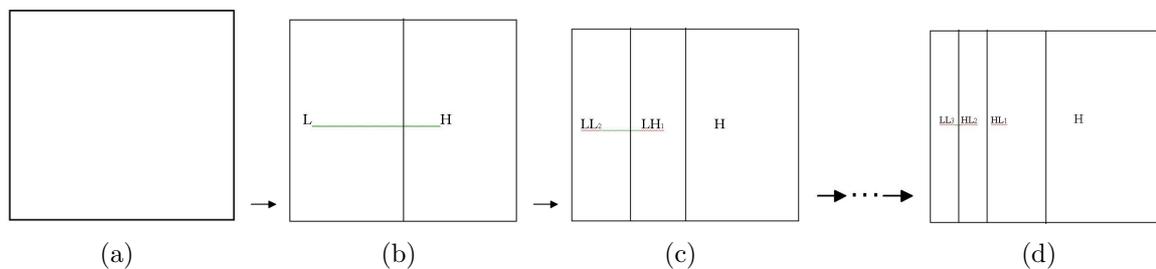


Figura 3.12: Estágios da decomposição *wavelet* unidimensional aplicados nas colunas da imagem.

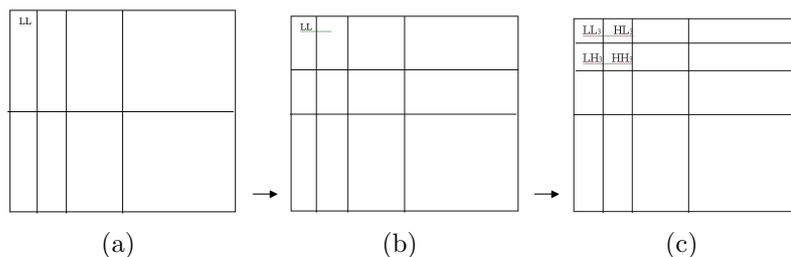


Figura 3.13: Estágios da decomposição *wavelet* unidimensional aplicados nas linhas após a operação de decomposição nas colunas da imagem.

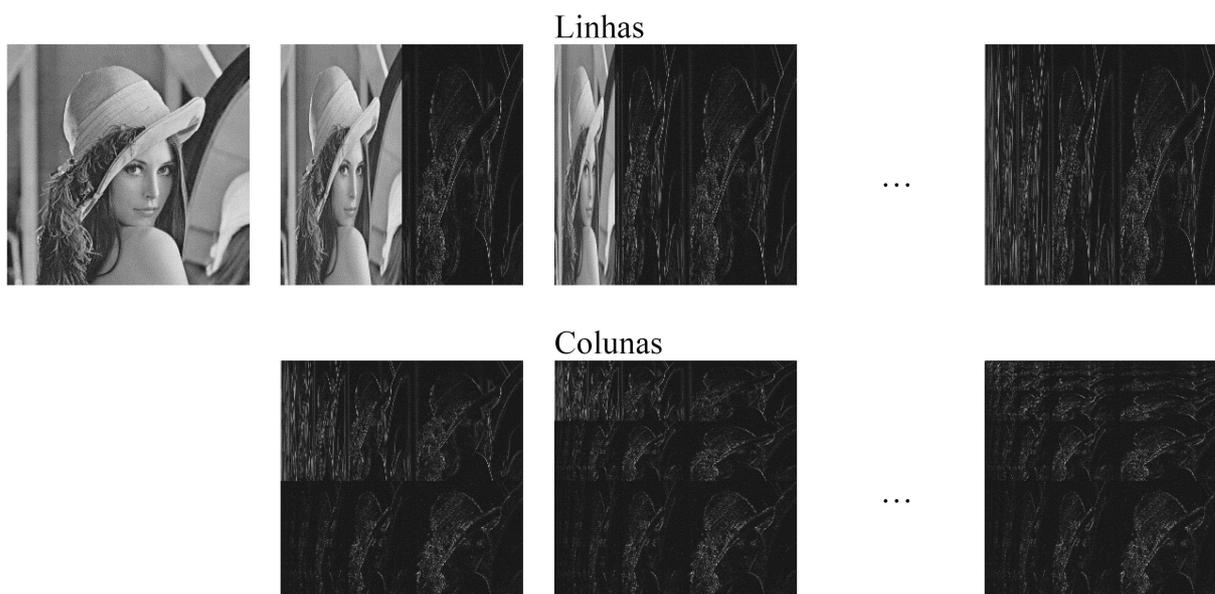


Figura 3.14: Decomposição *wavelet* bidimensional padrão da imagem da Lena.

Considerando uma imagem $x(m, n)$, ela é inicialmente filtrada na direção m (linhas da imagem), resultando em uma imagem passa-baixa L e uma imagem passa-alta H . Após a sub-amostragem, têm-se ambas as imagens reduzidas pela metade em relação à imagem original. Em seguida realiza-se a filtragem na direção n (colunas da imagem) resultando em quatro sub-imagens, como mostra a Figura 3.15.

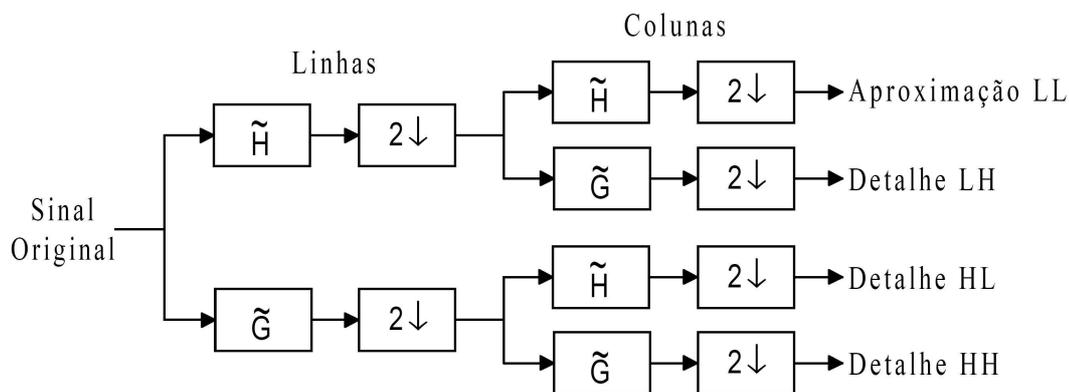


Figura 3.15: Esquema de decomposição *wavelet* bidimensional.

- LL (passa-baixa/passa-baixa) corresponde a banda passa-baixa em ambas as direções, horizontal e vertical, que resulta em uma imagem com a metade da resolução da imagem original;
- LH (passa-baixa/passa-alta) corresponde a banda passa-baixa na direção vertical e passa-alta na direção horizontal, refere-se aos detalhes horizontais;

- HL (passa-alta/passa-baixa) corresponde a banda passa-alta na direção vertical e passa-baixa na direção horizontal, refere-se aos detalhes verticais e;
- HH (passa-alta/passa-alta) corresponde a banda passa-alta em ambas as direções, refere-se aos detalhes diagonais.

A aplicação da transformada *wavelet* em uma imagem resulta em uma imagem com o mesmo tamanho, mas decomposta em três imagens detalhes (HL, LH e HH) e uma imagem aproximação (LL), sendo que todas possuem a metade da resolução da imagem inicial. Esse processo pode ser repetido novamente na sub-imagem LL, resultando em mais quatro sub-imagens, e assim por diante até que tenha-se apenas um único coeficiente aproximação. O menor nível de resolução possível conterá um único coeficiente correspondente a média de todas as amostras do sinal original, isto é, ele é a frequência zero do sinal. A Figura 3.16 mostra como se organiza essas sub-bandas após cinco estágios de decomposição.

O algoritmo da transformada *wavelet* inversa é construído de maneira semelhante aplicando o processo inverso do algoritmo da transformada *wavelet* direta.

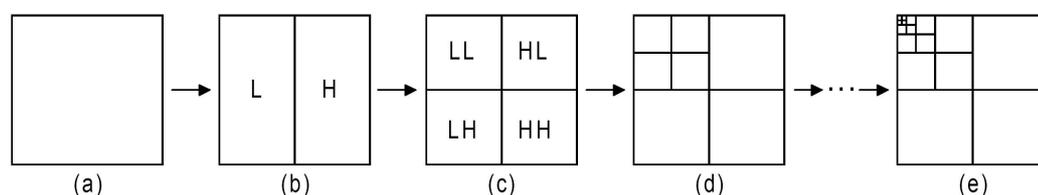


Figura 3.16: Estágios de decomposição *wavelet* bidimensional com 5 níveis de resolução.

Quando a transformada *wavelet* unidimensional é aplicada alternando-se operações nas linhas e nas colunas ela é denominada de transformada *wavelet* bidimensional não-padrão. Primeiro, calcula-se um passo de médias e diferenças no valor dos *pixels* de cada linha da imagem. Em seguida, calculam-se as médias e as diferenças em cada coluna. A imagem do canto superior esquerdo contém os coeficientes de baixa resolução, correspondente à média dos *pixels* da imagem original, enquanto que as três demais imagens contêm os coeficientes de alta resolução, os coeficientes *wavelets*, que irão permitir a reconstrução da imagem (Stollnitz; DeRose ; Salesin , 1995). Para completar a transformação, repete-se esse processo recursivamente, somente nos quadrantes contendo as médias, em ambas direções.

A Figura 3.17 ilustra os estágios da transformada *wavele* bidimensinal não padrão dessa decomposição, onde em (a) imagem a ser decomposta; (b) imagem decomposta

em um nível, (c) imagem decomposta em dois níveis e (d) imagem no quinto nível de decomposição e a Figura 3.18 mostra o resultado dessa operação aplicada na imagem da Lena, onde em (a) imagem a ser decomposta; (b) imagem decomposta em um nível; (c) imagem decomposta em dois níveis e (d) imagem decomposta em três níveis.

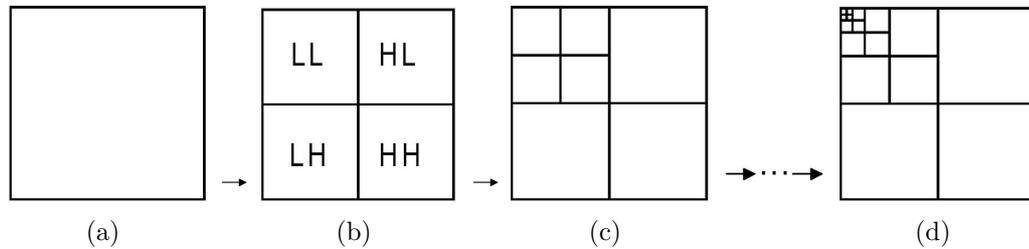


Figura 3.17: Estágios da decomposição *wavelet* bidimensional não padrão da Imagem.

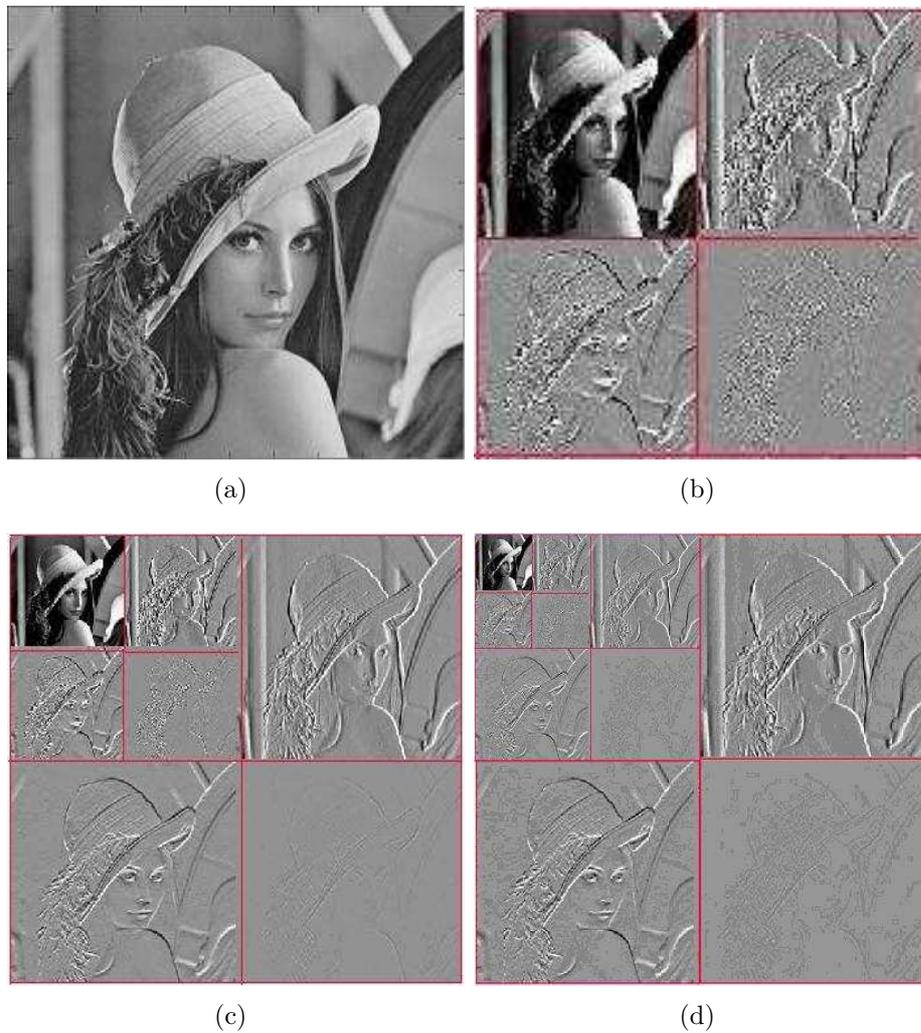


Figura 3.18: Decomposição não padrão da imagem da Lena.

A decomposição *wavelet* padrão de uma imagem é mais utilizada pelo fato de requerer somente operações em uma dimensão, ou seja, primeiro aplica-se a transformada apenas

nas linhas e em seguida apenas nas colunas da imagem. Por outro lado, é um pouco mais eficiente a computação da decomposição não-padrão. Para uma imagem $m \times m$, a decomposição padrão requer o cálculo de $4(m^2 - m)$ operações, enquanto que a decomposição não padrão requer somente $\frac{8}{3}(m^2 - 1)$ operações (Stollnitz; DeRose ; Salesin , 1995).

Pode-se verificar que a transformada *wavelet* permite armazenar uma imagem em diversas resoluções. Dessa forma, pode-se transmitir inicialmente os coeficientes da imagem com menor resolução, permitindo assim a visualização de uma aproximação da imagem e a reconstrução gradual da imagem pelo receptor. Após a transmissão de todos os coeficientes de detalhes, o receptor terá uma cópia completa da imagem. Este tipo de transmissão é conhecido como transmissão progressiva (*progressive transmission*). Para a transmissão progressiva os coeficientes *wavelet* precisam ser arranjados em ordem de importância. A decomposição em multirresolução da transformada torna-se ideal para isso.

3.9 Árvore de Zeros(*Zerotrees*)

Shapiro (Jerome, 1993) apresentou o algoritmo EZW para compressão de imagem usando o conceito de árvore de zeros (*zerotree*) dos coeficientes *wavelet*. Este método permite a localização de estruturas da imagem que não contém informações significativas para a sua representação, permitindo a execução da compressão em uma imagem a partir da eliminação dessas porções não significativas, a árvore de zeros.

Considerando um limiar de amplitude de valor igual a T , se um coeficiente *wavelet* $|x(i, j)|$ satisfaz à condição $|x(i, j)| < T$, então $|x(i, j)|$ é dito insignificante com relação ao limiar de valor igual T . Se um coeficiente e todos os descendentes são insignificantes com relação ao limiar T , então chama-se o conjunto desses coeficientes *wavelet* de árvore de zeros para o limiar T .

A árvore de zeros é baseada na hipótese de que se um coeficiente *wavelet* de uma escala maior é insignificante com respeito a um determinado limiar de valor igual a T , então todos os coeficientes *wavelet* de mesma orientação, na mesma localização espacial da escala menor, são classificados como insignificantes com relação a T (Jerome, 1993). A Figura 3.19 mostra a estrutura da árvore de zeros de uma imagem decomposta por *wavelet*.

Se por um lado a árvore de zeros determina quais são os componentes irrelevantes para a representação de uma imagem, por outro lado, define-se também quais são os coeficientes importantes para a representação dessa imagem. Assim, utilizar as árvores

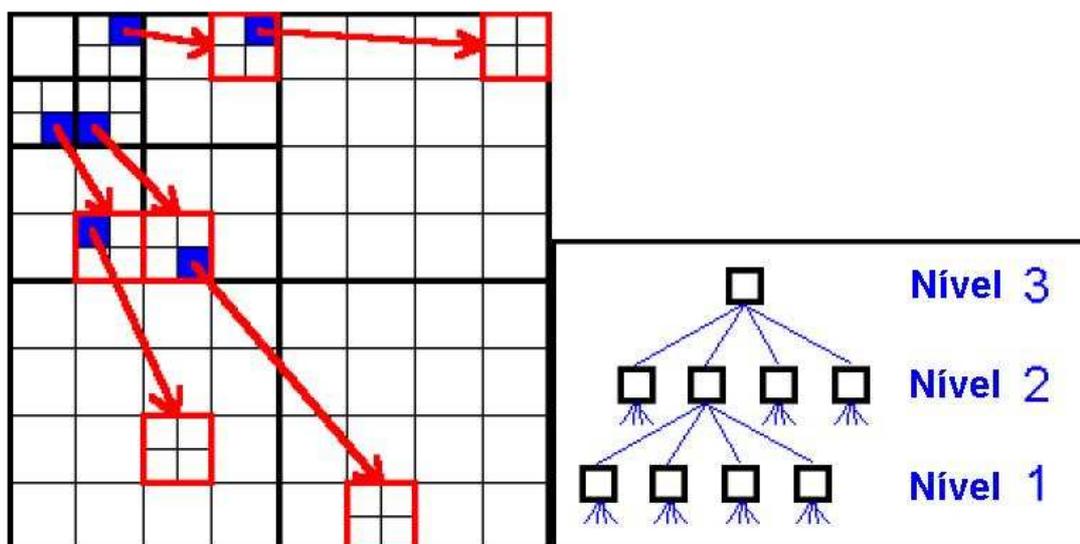


Figura 3.19: Árvore de zeros obtida a partir de uma decomposição *wavelet* em três níveis.

compostas por coeficientes significativos (Jerome, 1993) para armazenar os coeficientes de uma marca d'água configura-se como uma boa abordagem, pois as porções significativas da imagem não serão perdidas quando essa for compactada, permitindo a recuperação dessa em melhores condições de deterioração.

3.10 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou um embasamento teórico sobre *wavelets*. Propositamente foi abordado uma seqüência de conhecimentos que irão amparar na construção do restante deste trabalho. O capítulo contemplou uma definição matemática de *wavelets*, efetuou algumas considerações para elas nos domínios discretos, apresentou a transformada *wavelet* em domínios discretos, a DWT. Também foi apresentado o trabalho de Mallat (Mallat, 1989) sobre a representação de uma imagem em multiresolução, pela decomposição *wavelet* e, finalmente, foi apresentado o conceito proposto por Shapiro (Jerome, 1993) de árvore de zeros (*zerotree*) que permite diferenciar porções significativas de porções irrelevantes de uma imagem representadas em multirresolução por de uma decomposição *wavelet*.

Com o embasamento sobre marcas d'água digital e a utilização da teoria de *wavelets* em processamento de imagem, esta dissertação busca agora detalhar a técnica de armazenamento e recuperação de uma marca d'água digital proposto por Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001) com a finalidade de atingir o objetivo principal deste trabalho que é

acrescentar uma melhoria a esse algoritmo.

4 *Manipulação de Marca D'água em Imagem Digital Utilizando Wavelet*

4.1 Introdução

Alguns métodos de inserção e extração da marca d'água utilizando *wavelet* já propostos diferem principalmente na localização onde é inserida a marca d'água. Tay e outros (Tay; Havlicek, 2002) usaram a DWT para decompor a imagem hospedeira e inseriram a marca d'água no segundo nível de decomposição *wavelet*, pois nesse nível encontram-se os detalhes da imagem representados pelas frequências médias, isso ofereceu robustez e transparência à técnica. Para a extração da marca d'água não é necessária a imagem original hospedeira, ela é recuperada pelas variáveis e parâmetros utilizados no algoritmo de inserção da marca d'água.

Wei e outros (Wei; Qin; Fu, 1998) propuseram a inserção da marca d'água nos coeficientes obtidos de DWT que são os mais visualmente significativos na imagem hospedeira. A vantagem dessa abordagem é a resistência que a marca d'água obtém contra ataques como a compressão da imagem ou a aplicação de filtros. A extração da marca d'água é feita por métodos de detecção da marca a partir do uso de correlação estatística (Wei; Qin; Fu, 1998; Langelaar; Setyawan; Lagendijk, 2000).

Segundo Hsieh e outros (??) o método deles oferece robustez extra contra perda de detalhe da imagens na compactação, comparado aos métodos de Wei e Said, por esse motivo utiliza-se neste trabalho esse primeiro método. O algoritmo de Hsieh é implementado e testado com finalidade de obter informações que ofereçam subsídios para comparação dos resultados com o algoritmo proposto neste trabalho.

4.2 QSWT

QSWT foi um conceito proposto por Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001), onde eles basearam na proposta de Shapiro (Jerome, 1993) de localização das árvores de zeros em uma decomposição em multirresolução *wavelet*. Enquanto no primeiro trabalho o objetivo era encontrar árvores não significativas para a representação da imagem, levando à sua compactação, no trabalho de Hsieh e outros, o objetivo foi localizar árvores significativas dentro da decomposição em multirresolução da imagem, pois essas árvores, denominadas de *Qualified Significant Wavelet Tree* (QSWT), contém energia suficiente para armazenar uma marca d'água sem degradar a imagem e a própria marca d'água.

Formalmente, Hsieh e outros chegaram à formalização matemática da QSWT através de quatro definições que apresenta EZW, onde considera-se uma relação de parentesco de “pai e filho” entre os coeficientes *wavelets* de diferentes escalas correspondentes da mesma localização, com exceção das sub-bandas de alta frequência, isto é, HL_1 , LH_1 e HH_1 . As definições básicas da QSWT (Hsieh; Tseng; Huang , 2001) são as seguintes:

- Definição 1: um coeficiente *wavelet* $x_n(i, j) \in D$ é um “pai” de $x(p, q)$, onde D é uma sub-banda classificada HL_n , LH_n , HH_n , onde $p = i * 2 - 1 | i * 2$, $q = j * 2 - 1 | j * 2$, $n > 1$, $i > 1$ e $j > 1$.
- Definição 2: se um coeficiente *wavelet* $x_n(i, j)$ é um “pai” e os descendentes, “filhos” $x_{n-k}(p, q)$, satisfazem $|x_n(i, j)| < T$ e $|x_{n-k}(p, q)| < T$ para um determinado limiar T , então eles são chamados “árvore de zeros *wavelets*”, onde $1 < k < n$.
- Definição 3: se um coeficiente *wavelet* $x_n(i, j)$ é um “pai” e satisfaz $|x_n(i, j)| > T$ para um determinado limiar T , então $x_n(i, j)$ é chamado um coeficiente significante (Jerome, 1993).
- Definição 4: se um coeficiente *wavelet* $x_n(i, j) \in D$ é um “pai” de $x_{n-1}(p, q)$, onde D é uma sub-banda classificada HL_n , LH_n , HH_n e satisfaz $|x_n(i, j)| > T_1$, $|x_{n-1}(p, q)| > T_2$ para um determinado limiar T_1 , T_2 , então $x_n(i, j)$ e seus descendentes são chamados uma QSTW.

4.3 O algoritmo de inserção de Hsieh

O algoritmo foi implementado utilizando o aplicativo MATLAB Release 12 e suas funções. Os tipos de imagens utilizadas para os testes são as seguintes:

- Imagem hospedeira 256 x 256 *pixels* em tons de cinza, no formato jpeg;
- Imagem da marca d'água 30 x 30 *pixels* binária, no formato bitmap.

O algoritmo apresentado a seguir é descrito seguindo as etapas citadas por Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001).

1. Na parte de inserção, primeiro a imagem é decomposta em três níveis com dez sub-bandas. Supõe-se que o tamanho da imagem hospedeira é p linhas por q colunas e o tamanho da imagem da marca d'água é r linhas por s colunas.
2. As sub-bandas (LH_3 , LH_2) são selecionadas como primeira opção, $[(HL_3, HL_2)]$ é uma opção alternativa, o valor limiar (*threshold*) de cada sub-banda é escolhido pelo algoritmo a seguir:

$$T_1 = \frac{1}{n} \{x_{LH_3} \mid \text{Mediana}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in LH_3\}, \text{ onde } i = 1, 2, \dots, n,$$

$$T_2 = \frac{1}{m} \{x_{LH_2} \mid \text{Mediana}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m), x_i \in LH_2\}, \text{ onde } i = 1, 2, \dots, m.$$
3. A seguir encontra-se a *QSWT* pelo algoritmo, descrito a seguir:

```

Encontra QSWT
k = 0;
Para i de 1 até n faça
  Para j de 1 até m faça
    Se  $x_3(i, j) \geq T_1$  ;  $x_3(i, j) \in LH_3$ 
      Se  $x_2(2 * i - 1, 2 * j - 1) \geq T_2$  e  $x_2(2 * i - 1, 2 * j) \geq T_2$  e
         $x_2(2 * i, 2 * j - 1) \geq T_2$  e  $x_2(2 * i, 2 * j) \geq T_2$  ;  $x_2(p, q) \in LH_2$ 
           $QSWT[k] = \{x_3(i, j), x_2(2 * i - 1, 2 * j - 1), x_2(2 * i - 1, 2 * j), x_2(2 * i, 2 * j - 1), x_2(2 * i, 2 * j)\}$ 
          k = k + 1;
    Fim-se
  Fim-se
Fim-para j
Fim-para i

```

4. Calcula-se o soma dos coeficientes da $QSWT[i]$, para $i = 1$ até k e classifica a $QSWT$ em ordem decrescente;
5. Classifica os níveis de cinza da marca d'água W em ordem decrescente;
6. Na fase de inserção da marca d'água, os níveis de cinza classificados são inseridos de forma redundante nas sub-bandas LH3 e LH2 com a finalidade de obter uma maior robustez no algoritmo.

O nível de cinza $W(k, l)$ é inserido na sub-banda LH3 em $x_3(i, j)$, gerando um elemento x'_3 da seguinte forma: $x'_3(i, j) = x_3(i, j) + \alpha * W(k, l)$, onde α é um parâmetro de escala que altera o percentual de qualidade da imagem hospedeira.

O nível de cinza $W(k, l)$ é inserido na sub-banda LH2 em $x_2(i, j)$, gerando um elemento x'_2 da seguinte forma: $x'_2(i, j) = x_2(i, j) + \alpha * W(k, l)$, onde $x_2(i, j) = \max(x_2(2 * i - 1, 2 * j - 1), x_2(2 * i - 1, 2 * j), x_2(2 * i, 2 * j - 1), x_2(2 * i, 2 * j))$.

O algoritmo, através das duas classificações, *QSWT* e da marca d'água, irá inserir sempre os níveis de cinza menores nos menores coeficientes da *QSWT* e os maiores níveis de cinza da marca d'água nos maiores coeficientes da *QSWT*.

7. Salvam-se as posições onde a marca d'água foi inserida, isto é, a própria *QSWT*, e finalmente executa-se a inversa da decomposição *wavelet* obtendo a imagem embebida, que também é salva.

4.4 Resultados e Análise da Aplicação do Algoritmo de Hsieh

Nesta seção é apresentado os resultados da correlação estatística entre a imagem hospedeira original e imagem após a inserção da marca d'água e, entre a marca d'água inserida e a marca d'água extraída, para os formatos de armazenamento bitmap e Joint Photographic Experts Group (JPEG) com seis níveis de qualidade de armazenamento, com o valor de α a partir de 1 até 100 variando de 5 em 5. Os resultados são mostrados em formas de tabelas e figuras para comparação e análise visual dos mesmos.

4.4.1 Bitmap

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original após a inserção da marca d'água no formato bitmap, apresenta maior resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,9999$ e menor resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9633$. E a correlação estatística entre a marca d'água inserida e a marca d'água extraída, apresenta maior resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9988$ e menor resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,9760$. Esses resultados entre outros estão listados na Tabela 4.1.

Como exemplo para análise visual são mostrados na Figura 4.1 as imagens de menor e maior correlação estatística, e na Figura 4.2 mostra-se as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário, pois ele apresenta o resultado que menos degrada as imagens.

A análise visual das imagens recuperadas apresentam ruídos visíveis nas imagens hospedeira para α maior do que 15 e para a marca d'água α menor do que 5. Apesar dos ruídos devido à quantização, o reconhecimento das imagens não é comprometido.

Tabela 4.1: Correlação estatística das imagens, no formato **bitmap**, após a inserção e a extração da marca d'água com sua respectiva imagem original.

α	Bitmap	
	Imagem	Marca
1	0,9999593	0,9760340
5	0,9999222	0,9733546
10	0,9995462	0,9986935
15	0,9992804	0,9992028
20	0,9984275	0,9999372
25	0,9972304	0,9996876
30	0,9966157	0,9997505
35	0,9950099	0,9995060
40	0,9938164	0,9997707
45	0,9924518	0,9995673
50	0,9901456	0,9996537
55	0,9890318	0,9996207
60	0,9862410	0,9995885
65	0,9831493	0,9994662
70	0,9817267	0,9994123
75	0,9783398	0,9992677
80	0,9760387	0,9992069
85	0,9735301	0,9991396
90	0,9695662	0,9990703
95	0,9677365	0,9989614
100	0,9633334	0,9988227

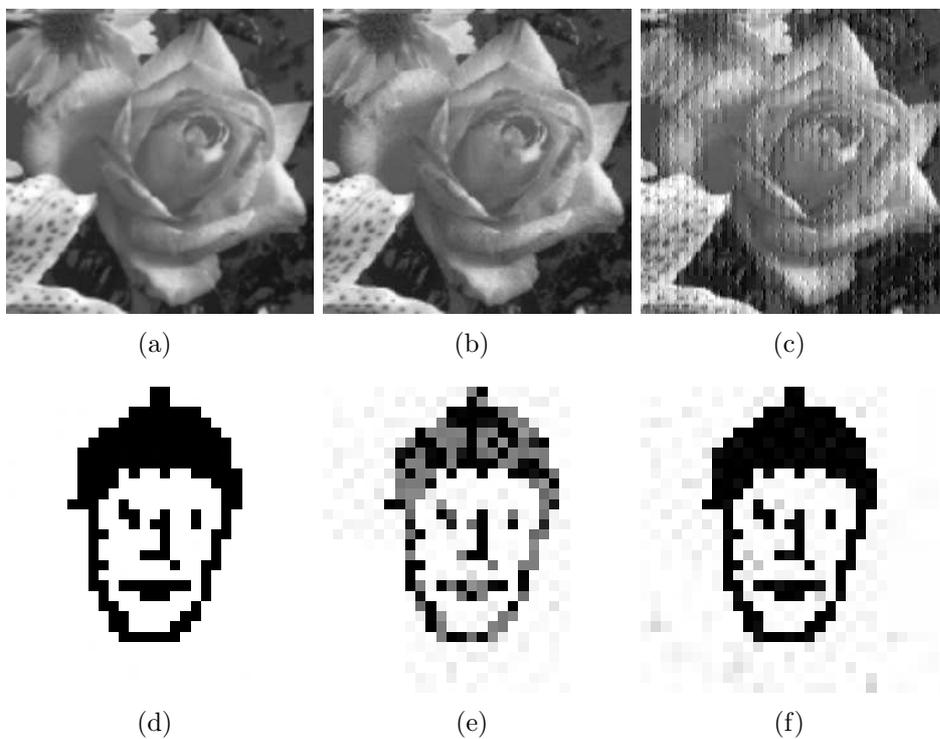


Figura 4.1: Formato bitmap: (a) rosa original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$; (a) marca d'água original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$.

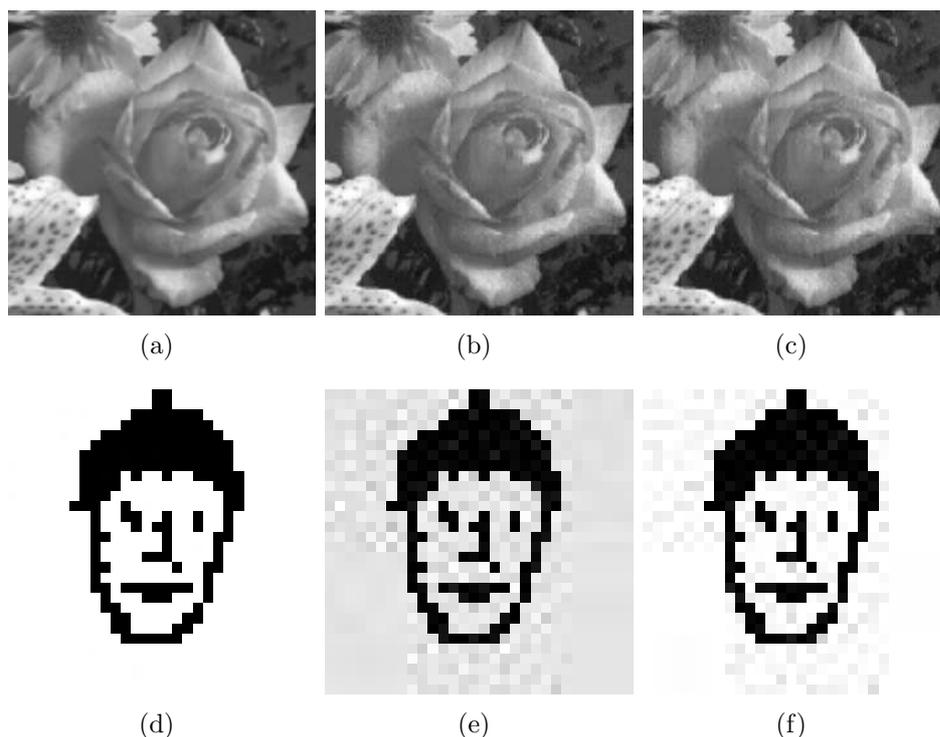


Figura 4.2: Formato bitmap: (a) rosa original; (b) $\alpha = 15$; (c) $\alpha = 20$; (d) marca d'água original; (e) $\alpha = 15$; (f) $\alpha = 20$.

4.4.2 Joint Photographic Experts Group (JPEG):

No formato jpeg fez-se os testes para os valores de α , citados anteriormente neste capítulo, para seis níveis de qualidade (100%, 92%, 62%, 35%, 19% e 10%) para armazenamento das imagens. Esses níveis foram escolhidos, através de tentativas, para se obter os resultados próximos aos obtidos por Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001). A seguir são mostradas as tabelas com resultado da correlação estatística entre as imagens e imagens obtidas para cada um dos seis níveis de qualidade.

- **JPEG 100%:**

Embora a denominação nível de qualidade 100% do jpeg sugere que não existe compactação da imagem, isso não ocorre. Observa-se nas Tabelas 4.1 e 4.2 que existe compactação de aproximadamente 30% da imagem. Apesar disso não existe perda de qualidade visível (Joint Photographic Experts Group,).

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água no formato jpeg, com qualidade de 100% de qualidade, apresenta o maior resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,9999$ e o menor

resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9422$. E a correlação estatística entre a marca d'água inserida e a marca d'água extraída, apresenta maior correlação estatística para $\alpha = 40$ com $\text{corr} = 0,9995$ e menor correlação estatística para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9974$. Esses resultados entre outros estão mostrados na Tabela 4.2.

Como exemplo para análise visual tem-se a Figura 4.3, que mostra as imagens de menor e maior correlação estatística, e a Figura 4.4 que mostra as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário, pois apresenta o resultado que menos degrada as imagens.

Tabela 4.2: Resultados de correlação estatística das imagens, no formato **JPEG 100%**, após a inserção e a extração da marca d'água com sua respectiva imagem original.

α	JPEG 100%	
	Imagem	Marca
1	0,9999481	0,9191401
5	0,9999097	0,9528229
10	0,9995304	0,9960169
15	0,9992627	0,9976452
20	0,9984105	0,9992256
25	0,9972094	0,9992697
30	0,9965924	0,9994551
35	0,9949818	0,9992999
40	0,9937791	0,9995624
45	0,9924229	0,9993833
50	0,9901051	0,9995448
55	0,9889985	0,9995127
60	0,9861935	0,9994802
65	0,9830937	0,9993878
70	0,9816778	0,9993474
75	0,9782941	0,9992301
80	0,9759703	0,9991467
85	0,9734811	0,9990942
90	0,9694926	0,9990198
95	0,9676737	0,9989022
100	0,9422789	0,9974958

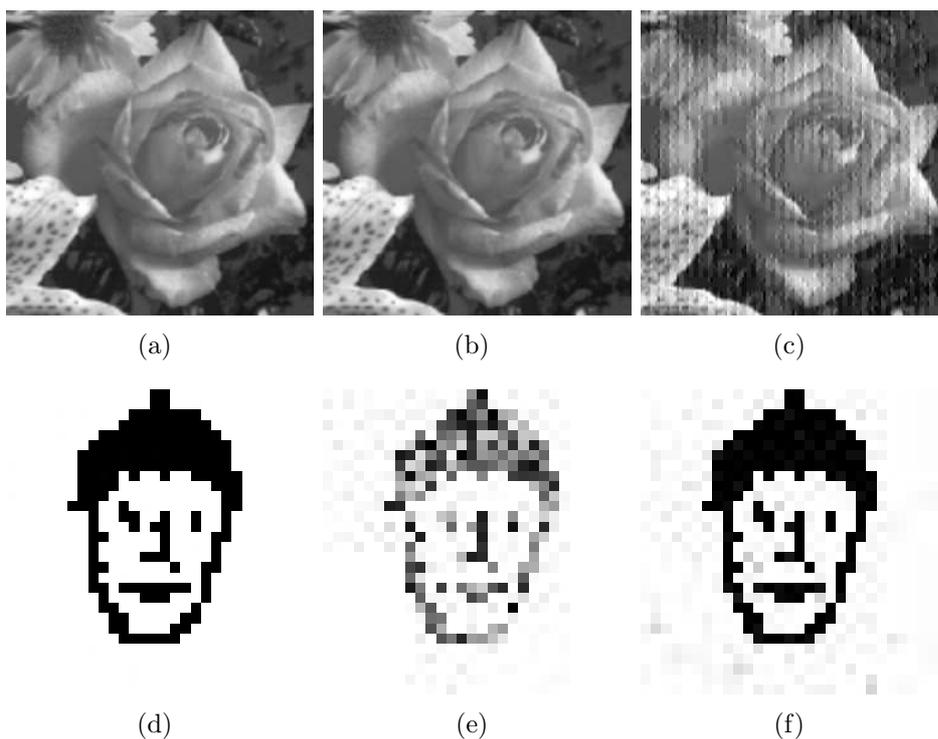


Figura 4.3: Formato JPEG 100%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$; (d) marca d'água original; (e) $\alpha = 1$; (f) $\alpha = 100$.

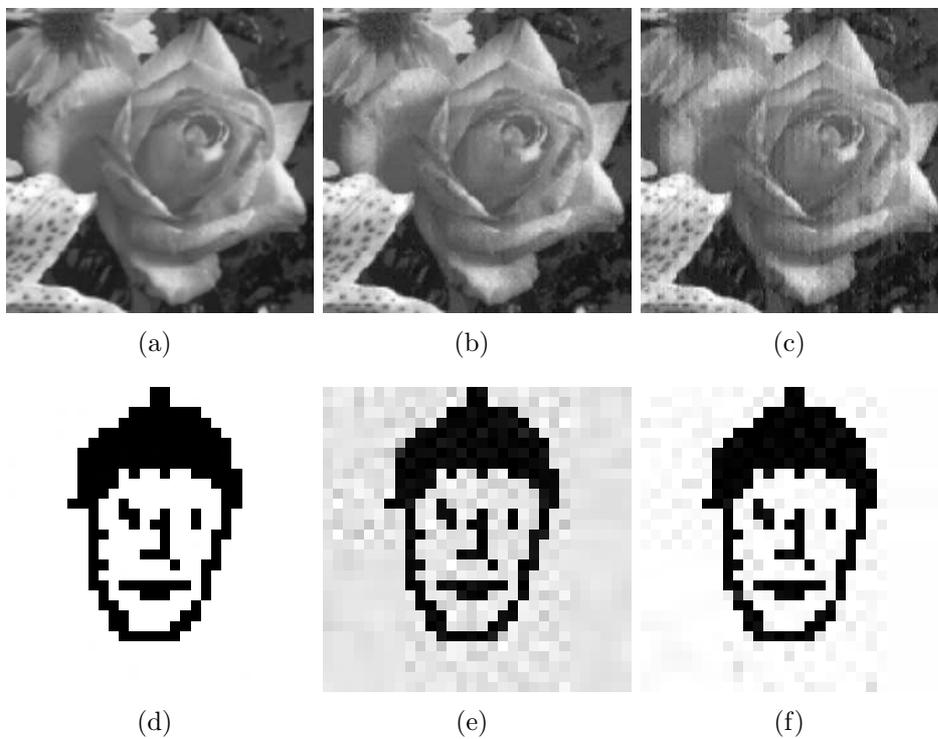


Figura 4.4: Formato JPEG 100%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 15$; (c) $\alpha = 40$; (d) marca d'água original; (e) $\alpha = 15$; (f) $\alpha = 40$.

- **JPEG 92%:** A correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água no formato JPEG 92% de qualidade, apresenta o maior resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,9997$ e o menor resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9416$. Pode-se observar na Tabela 4.3 comparada à Tabela 4.2, que a imagem hospedeira apresenta diminuição da correlação estatística de aproximadamente 1%.

A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, para o formato JPEG 92% de qualidade, para os valores de α igual a 1 e a 5 ($\text{corr} \leq 0,6708$), pode-se observar na Tabela 4.3 uma significativa diminuição da correlação estatística, comparados aos resultados da Tabela 4.2. E a partir de α igual 10 até 100, observa-se a diminuição da correlação estatística de aproximadamente 3% comparados aos resultados da Tabela 4.2 para o formato JPEG 100% de qualidade.

Como exemplo para análise visual tem-se a Figura 4.5, que mostra as imagens de menor e maior correlação estatística, e a Figura 4.6 que mostra as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário, pois apresenta o resultado que menos degrada as imagens.

Tabela 4.3: Correlação estatística das imagens no formato **JPEG 92%**, após a inserção e a extração da marca d'água com sua respectiva imagem original.

JPEG Qualidade 92%		
α	Imagem	Marca
1	0,9997729	0,5551172
5	0,9997397	0,6708764
10	0,9993801	0,9447321
15	0,9991188	0,9678996
20	0,9982508	0,9855697
25	0,9969775	0,9929701
30	0,9963295	0,9940337
35	0,9947608	0,9954985
40	0,9936551	0,9968312
45	0,9922992	0,9971335
50	0,9900794	0,9976052
55	0,9889988	0,9979892
60	0,9862208	0,9982899
65	0,9830586	0,9983382
70	0,9815723	0,9981532
75	0,9781780	0,9982055
80	0,9760163	0,9983331
85	0,9734378	0,9983281
90	0,9691524	0,9983643
95	0,9673115	0,9982262
100	0,9416785	0,9967568

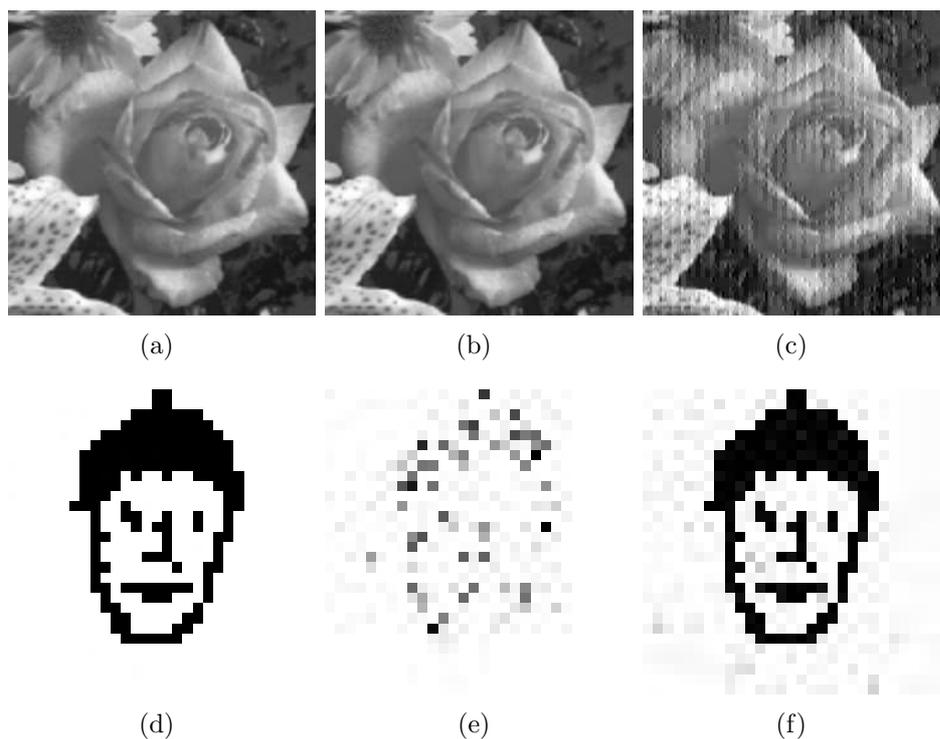


Figura 4.5: Formato JPEG 92%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$; (d) marca d'água original; (e) $\alpha = 1$; (e) $\alpha = 100$.

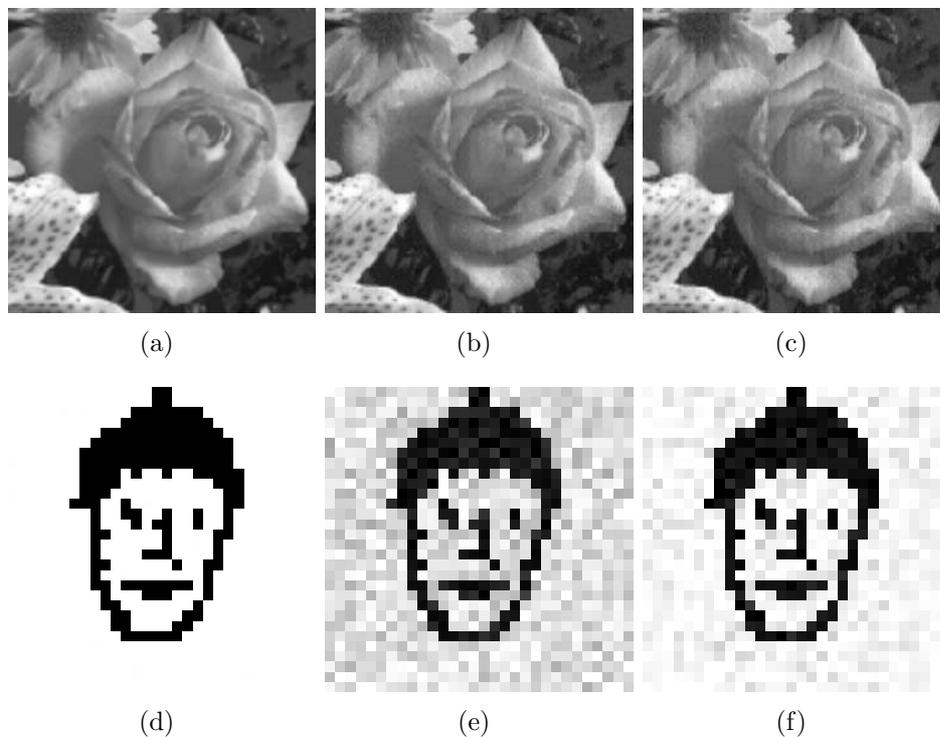


Figura 4.6: Formato JPEG 92%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 15$; (c) $\alpha = 20$; (d) marca d'água original; (e) $\alpha = 15$; (e) $\alpha = 20$.

- **JPEG 62%:**

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água no formato JPEG com 62% de qualidade, mostra o maior resultado para $\alpha = 1$ e $\text{corr} = 0,9991$ e o menor resultado para $\alpha = 100$ e $\text{corr} = 0,9378$. Pode-se observar na Tabela 4.4 comparada à Tabela 4.2, que a imagem hospedeira apresenta diminuição da correlação estatística de aproximadamente 1%.

A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, apresenta o maior resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9940$ e o menor resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,2068$. Pode-se observar na Tabela 4.4 para os valores de α igual 1, 10, 15, 20 e 25, uma significativa diminuição da correlação estatística, de aproximadamente 14%, e a partir de $\alpha = 25$ observa-se uma diminuição da correlação estatística de aproximadamente 8% comparados aos resultados da Tabela 4.2.

Como exemplo para análise visual tem-se a Figura 4.7, que mostra as imagens de menor e maior correlação estatística, e a Figura 4.6 que mostra as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário, pois apresenta o resultado que menos degrada as imagens.

Tabela 4.4: Correlação estatística das imagens no formato **JPEG 62%**, após a inserção e a extração da marca d'água com sua respectiva imagem original.

JPEG Qualidade 62%		
α	Imagem	Marca
1	0,9991690	0,2068152
5	0,9991366	0,2730593
10	0,9988178	0,6163928
15	0,9985788	0,7148786
20	0,9978314	0,8594421
25	0,9967641	0,9191992
30	0,9962116	0,9363382
35	0,9948053	0,9526316
40	0,9937984	0,9570882
45	0,9925276	0,9674537
50	0,9904586	0,9713228
55	0,9894593	0,9725001
60	0,9868299	0,9763550
65	0,9838930	0,9798196
70	0,9826701	0,9805622
75	0,9793792	0,9846474
80	0,9769357	0,9857217
85	0,9746056	0,9860576
90	0,9702705	0,9889755
95	0,9680329	0,9899225
100	0,9378936	0,9940093

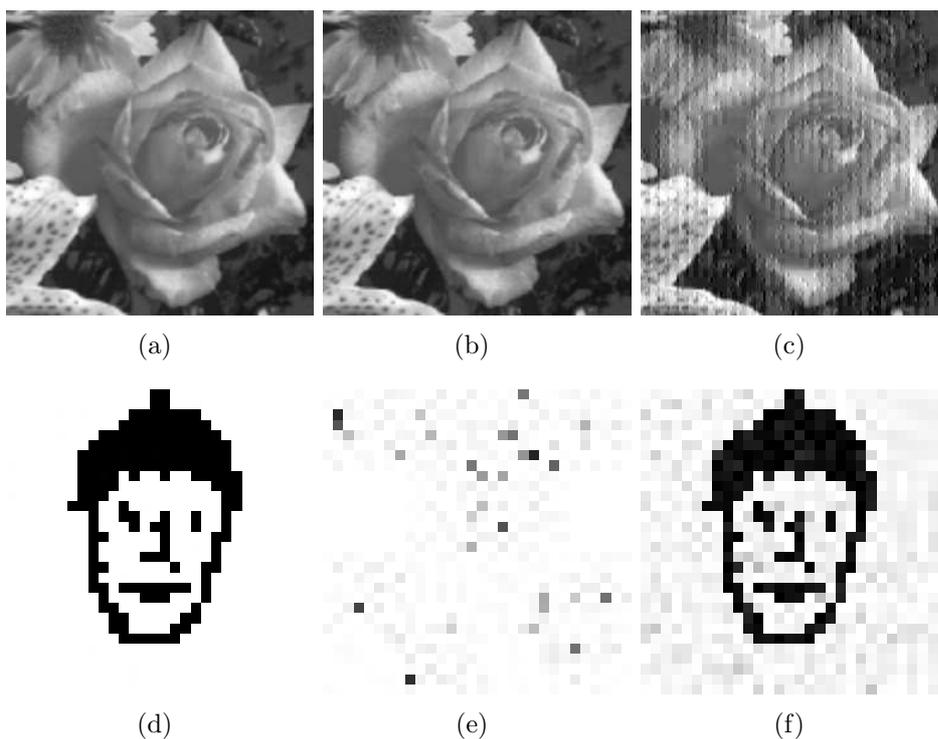


Figura 4.7: Formato JPEG 62%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$; a) marca d'água original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$.

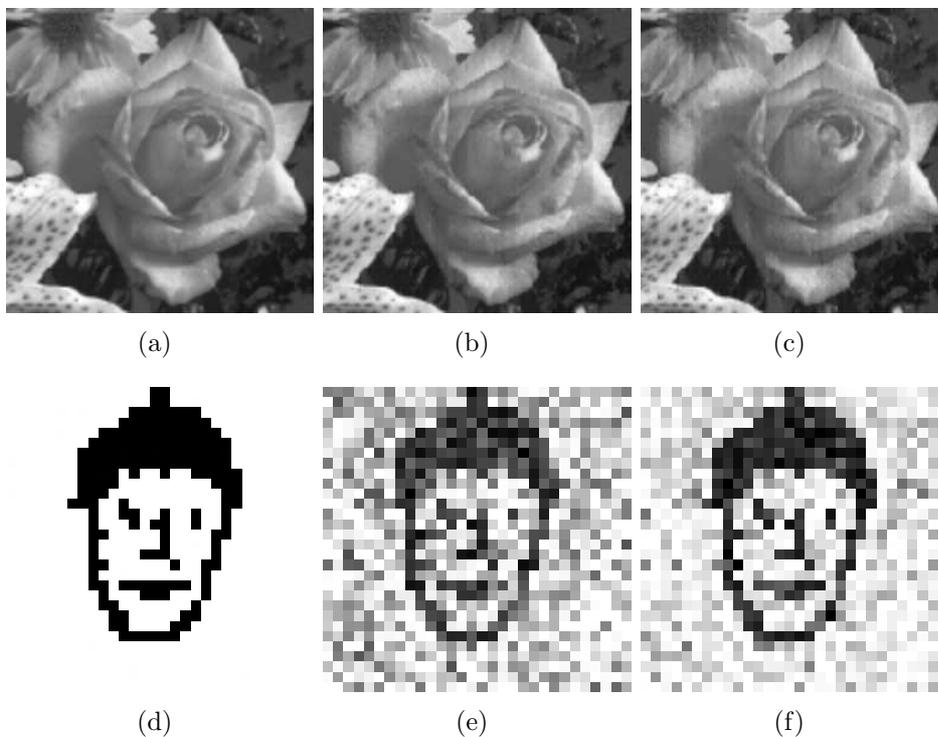


Figura 4.8: Formato JPEG 62%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 15$; (c) $\alpha = 20$; a) marca d'água original; (b) $\alpha = 20$; (c) $\alpha = 25$.

- **JPEG 35%:**

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água no formato JPEG 35% de qualidade, apresenta o maior resultado para $\alpha = 1$ e $\text{corr} = 0,9983$ e o menor resultado para $\alpha = 100$ e $\text{corr} = 0,9455$. Pode-se observar na Tabela 4.5 comparada à Tabela 4.2, que a imagem hospedeira apresenta diminuição da correlação estatística de aproximadamente 1%. A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, apresenta o maior resultado para $\alpha = 100$ e $\text{corr} = 0,9786$ e o menor resultado para $\alpha = 1$ e $\text{corr} = 0,1911$. Pode-se observar na Tabela 4.5 para os valores de α igual 1 até 35, uma significativa diminuição da correlação estatística, de aproximadamente 40%, e a partir de $\alpha = 45$ observa-se uma diminuição da correlação estatística de aproximadamente 5% comparados aos resultados da Tabela 4.2.

Como exemplo para análise visual tem-se a Figura 4.9, que mostra as imagens de menor e maior correlação estatística, e a Figura 4.10 que mostra as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário, pois apresenta o resultado que menos degrada as imagens.

Tabela 4.5: Correlação estatística das imagens no formato **JPEG 35%**, após a inserção e a extração da marca d'água com sua respectiva imagem original.

JPEG Qualidade 35%		
α	Imagem	Marca
1	0,9983539	0,1911206
5	0,9983332	0,2067340
10	0,9980094	0,4232339
15	0,9978256	0,4832835
20	0,9970559	0,6354173
25	0,9959732	0,7560198
30	0,9954648	0,7917179
35	0,9939508	0,8647824
40	0,9927948	0,9002331
45	0,9916775	0,9206055
50	0,9895558	0,9385865
55	0,9885241	0,9438754
60	0,9862308	0,9546377
65	0,9836089	0,9603991
70	0,9823302	0,9615007
75	0,9794800	0,9650962
80	0,9775722	0,9668276
85	0,9751717	0,9675530
90	0,9718518	0,9716199
95	0,9703039	0,9737462
100	0,9455173	0,9786364

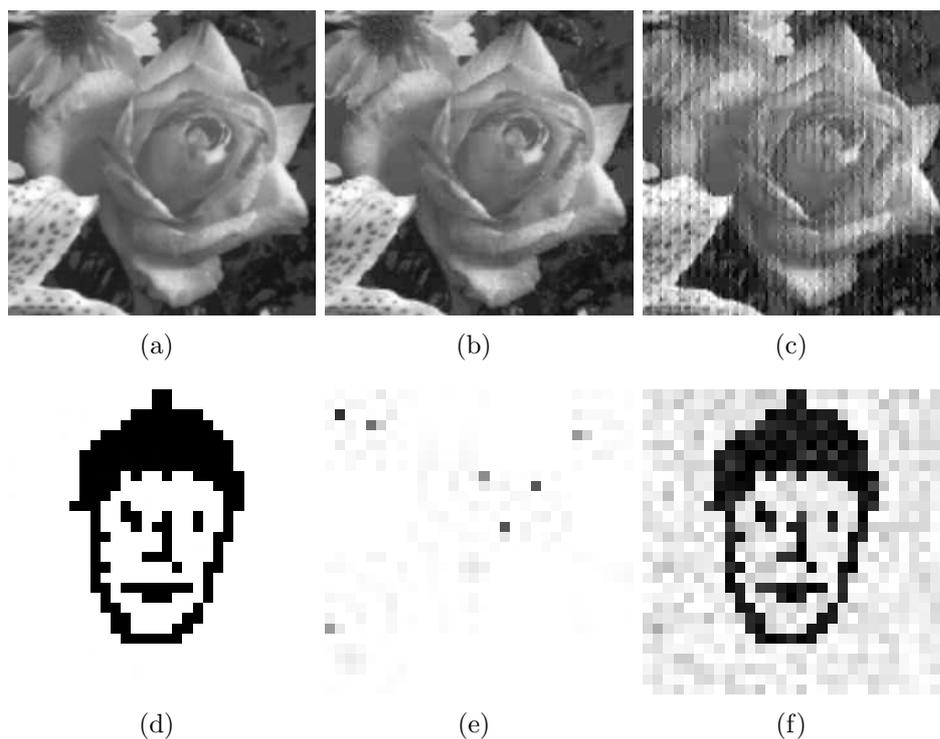


Figura 4.9: Formato JPEG 35%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$; (a) marca d'água original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$.

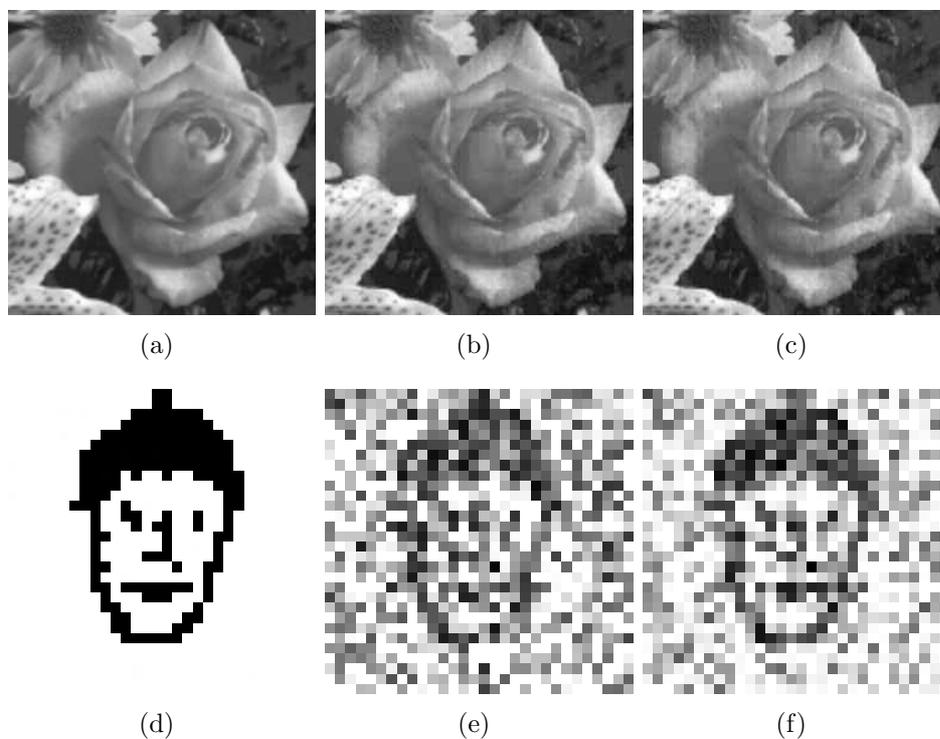


Figura 4.10: Formato JPEG 35%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 15$; (c) $\alpha = 20$; (a) marca d'água original; (b) $\alpha = 15$; (c) $\alpha = 20$.

- **JPEG 19%:**

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original após a inserção da marca d'água no formato JPEG 19% de qualidade, apresenta o maior resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,9965$ e o menor resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9462$. Pode-se observar na Tabela 4.6 comparada à Tabela 4.2, que a imagem hospedeira apresenta diminuição da correlação estatística de aproximadamente 1%.

A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água após a extração, apresenta o maior resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9632$ e o menor resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,2008$. Pode-se observar na Tabela 4.6 para os valores de α igual 1 até 65, uma significativa diminuição da correlação estatística, de aproximadamente 40%, e a partir de $\alpha = 70$ observa-se uma diminuição da correlação estatística de aproximadamente 11% comparados aos resultados da Tabela 4.2.

Como exemplo para análise visual tem-se a Figura 4.11, que mostra as imagens de menor e maior correlação estatística, e a Figura 4.12 que mostra as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário, pois apresenta o resultado que menos degrada as imagens.

Tabela 4.6: Correlação estatística das imagens no formato **JPEG 19%**, após a inserção e a extração da marca d'água com sua respectiva imagem original.

α	JPEG Qualidade 19%	
	Imagem	Marca
1	0,9965122	0,2008192
5	0,9964890	0,2138237
10	0,9961774	0,3063257
15	0,9959919	0,3375536
20	0,9953026	0,4933418
25	0,9943655	0,5691020
30	0,9938980	0,5958893
35	0,9925185	0,6534571
40	0,9915088	0,6899073
45	0,9902607	0,7316877
50	0,9882193	0,7936385
55	0,9872033	0,8145969
60	0,9843862	0,8560029
65	0,9812285	0,8944823
70	0,9797696	0,9036303
75	0,9763202	0,9310669
80	0,9743476	0,9417638
85	0,9720387	0,9468552
90	0,9685930	0,9535018
95	0,9670021	0,9556215
100	0,9462362	0,9632593

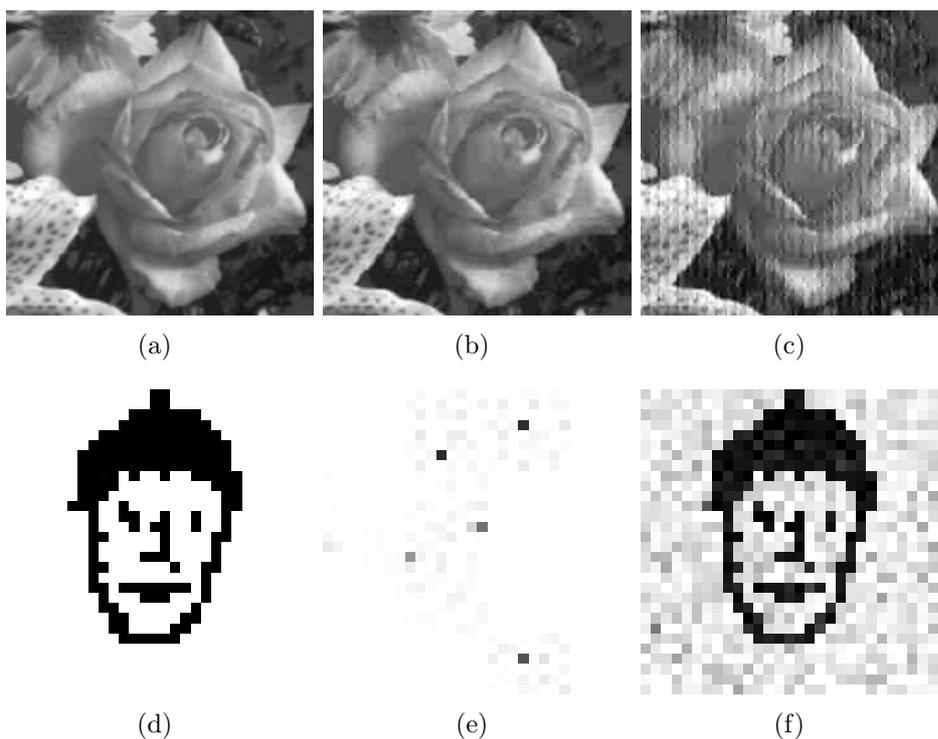


Figura 4.11: Formato JPEG 19%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$; (d) marca d'água original; (e) $\alpha = 1$; (f) $\alpha = 100$.

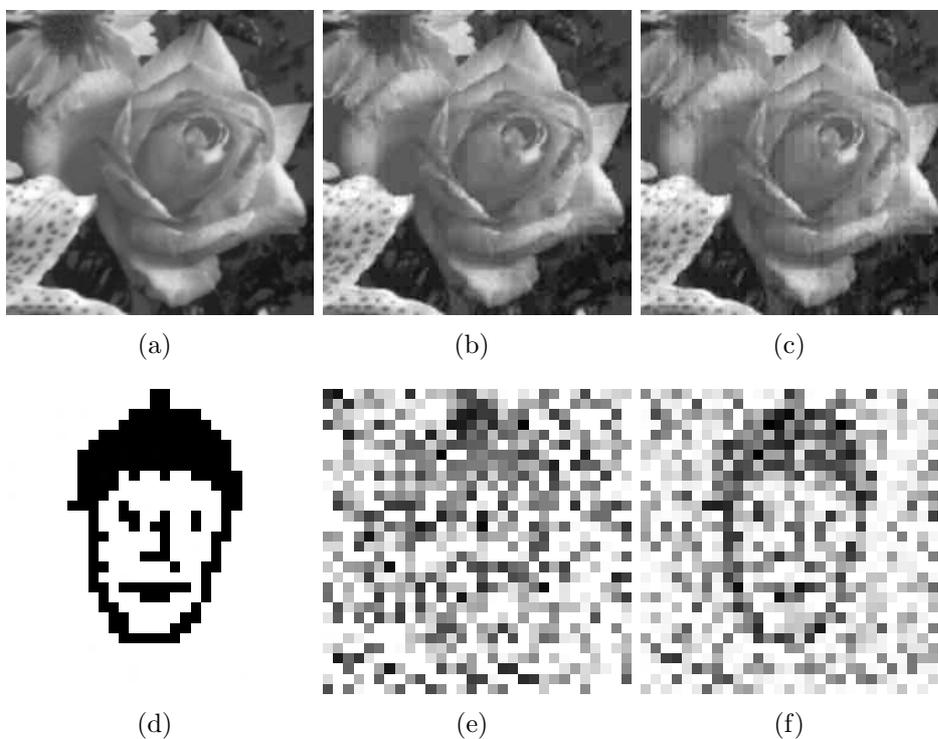


Figura 4.12: Formato JPEG 19%: (a) tosa original; (b) $\alpha = 15$; (c) $\alpha = 25$; (d) marca d'água original; (e) $\alpha = 15$; (f) $\alpha = 25$.

- **JPEG 10%:**

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original após a inserção da marca d'água no formato JPEG com qualidade de 10%, apresenta maior resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,9920$ e menor resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9394$. Pode-se observar na Tabela 4.7 comparada à Tabela 4.2, que a imagem hospedeira apresenta diminuição da correlação estatística de aproximadamente 1%.

A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, apresenta o maior resultado para $\alpha = 100$ com $\text{corr} = 0,9172$ e o menor resultado para $\alpha = 1$ com $\text{corr} = 0,1389$. E observa-se na Tabela 4.7 para os valores de α igual a 1 até 95, uma significativa diminuição da correlação estatística, de aproximadamente 20% a 86% em relação à Tabela 4.2.

Como exemplo para análise visual tem-se a Figura 4.13, que mostra as imagens de menor e maior correlação estatística, e a Figura 4.14 que mostra as imagens para $\alpha = 70$, considerado o α intermediário, pois apresenta o resultado que menos degrada a imagem hospedeira e favorece o reconhecimento da marca.

Tabela 4.7: Correlação estatística das imagens no formato **JPEG 10%**, após a inserção e a extração da marca d'água com sua respectiva imagem original.

α	JPEG Qualidade 10%	
	Imagem	Marca
1	0,9920594	0,1389043
5	0,9920311	0,1460167
10	0,9917366	0,2076243
15	0,9915444	0,2246562
20	0,9909386	0,2667153
25	0,9900634	0,3651769
30	0,9896106	0,3887356
35	0,9884300	0,4611980
40	0,9875107	0,5101583
45	0,9865071	0,5420659
50	0,9847632	0,5863348
55	0,9839290	0,6011548
60	0,9816652	0,6433782
65	0,9792343	0,6735573
70	0,9780381	0,6777334
75	0,9794800	0,7177173
80	0,9727628	0,7317513
85	0,9704148	0,7432627
90	0,9666482	0,7758153
95	0,9647147	0,7804996
100	0,9394237	0,9172772

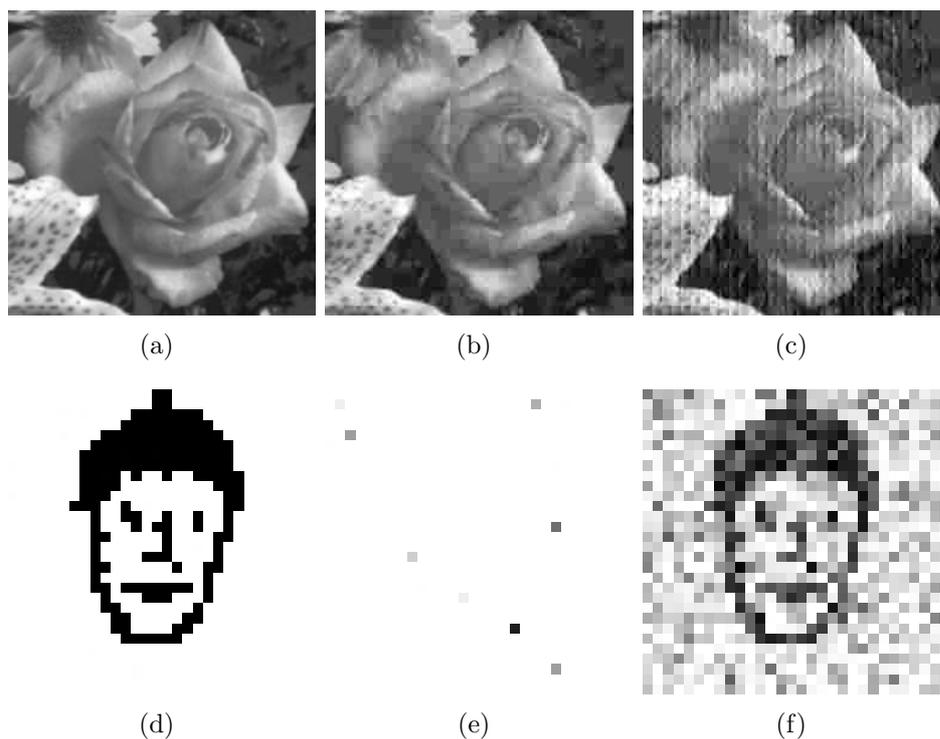


Figura 4.13: Formato JPEG 10%: (a) rosa original; (b) $\alpha = 1$; (c) $\alpha = 100$; (d) marca d'água original; (e) $\alpha = 1$; (f) $\alpha = 100$.

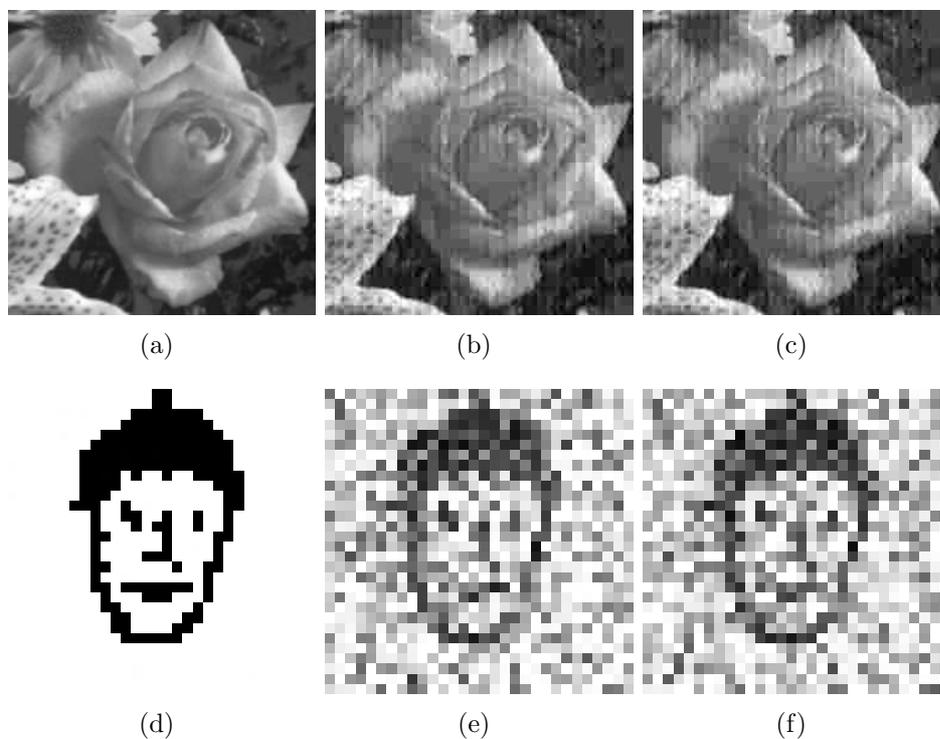


Figura 4.14: Formato JPEG 10%: (a) Rosa original; (b) $\alpha = 60$; (c) $\alpha = 60$; (d) Marca d'água original; (e) $\alpha = 70$; (f) $\alpha = 70$.

4.4.3 Conclusões dos testes utilizando o algoritmo de Hsieh e outros

As imagens obtidas do algoritmo de Hsieh e outros demonstram bem o quanto a compactação de uma imagem pode deteriorar o resultado da imagem recuperada.

A correlação estatística da imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água tanto no formato bitmap quanto no jpeg nos níveis de qualidade (100%, 92%, 62%, 35%, 19% e 10%), apresenta alta correlação estatística, ou seja, maior do que 0,9394 para o todos os α testados. Nota-se uma relação inversa entre o valor de α e o resultado da correlação estatística, isto é: quanto menor o α , maior a correlação estatística e quanto maior o α , menor a correlação estatística. Portanto, pode-se concluir que para a imagem hospedeira é interessante α menor.

Para a marca d'água obteve-se alta correlação estatística para todos os α 's testados apenas no formato bitmap e jpeg 100% de qualidade. Nos níveis de qualidade (100%, 92%, 62%, 35%, 19% e 10%) nota-se uma relação direta entre o valor de α e o resultado da correlação estatística, isto é: quanto menor o α , menor a correlação estatística e quanto maior o α , maior a correlação estatística. Portanto pode-se concluir que para a marca d'água é interessante α maior.

Na análise visual das imagens, para o formato bitmap e jpeg (100%, 92%, e 62%), $\alpha = 15$ satisfaz melhor à propriedade de transparência e robustez. Para jpeg 35% e 19% o $\alpha = 15$ garantiu a transparência da imagem hospedeira, mas a marca d'água apresenta degradação acentuada quase impedindo o reconhecimento da mesma. No caso do jpeg 10%, o menor $\alpha = 1$, não garante a propriedade de transparência na imagem hospedeira.

Apesar de obter-se alta correlação estatística entre as imagens, principalmente nos maiores níveis de qualidade de armazenamento, não assegura ausência de ruídos na análise visual das mesmas.

O importante é obter um α que satisfaça a propriedade de transparência para a imagem hospedeira e a propriedade de robustez na recuperação da marca d'água.

5 *Uma Nova Abordagem*

5.1 Introdução

Com o objetivo de aumentar a medida de correlação estatística entre a marca d'água original e a marca recuperada após o procedimento de inserção e extração na imagem hospedeira, este trabalho propõe inserir de forma redundante a marca d'água nas sub-bandas (LH_3, LH_2) , (HL_3, HL_2) e (HH_3, HH_2) . O algoritmo de Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang, 2001), que insere a marca d'água nas sub-bandas (LH_3, LH_2) ou (HL_3, HL_2) , é utilizado como base para a construção desta proposta, denominada de algoritmo proposto.

Para os testes com o algoritmo proposto, utilizou-se as mesmas imagens nos formatos bitmap e jpeg. Para cada formato foram geradas imagens embebidas com o valor de α a partir de 1 variando de 5 em 5 até 100. As imagens geradas no formato JPEG foram armazenadas com níveis de qualidade de 100%, 92%, 62%, 35%, 19% e 10%.

Após a inserção e a extração da marca d'água, utilizando o algoritmo proposto, para cada um dos valores de α já citados, foram feitas medidas de correlação estatística entre a imagem hospedeira antes da inserção da marca d'água e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água e as medidas de correlação estatística entre a imagem da marca d'água antes da inserção na imagem hospedeira e a marca d'água após a extração dela da imagem hospedeira.

Para cada experimento feito neste capítulo é apresentado uma análise dos resultados obtidos, demonstrando as melhorias propiciadas pelo algoritmo proposto.

5.2 O Algoritmo Proposto

O algoritmo proposto é similar ao algoritmo apresentado por Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang, 2001). O algoritmo foi implementado utilizando o aplicativo MATLAB Release 12 e suas funções. Os tipos de imagens utilizadas para os testes são as:

- Imagem hospedeira 256 x 256 *pixels* em tons de cinza, no formato jpeg;
- Imagem da marca d'água 30 x 30 *pixels* binária, no formato bitmap.

A seguir são descritas as etapas do algoritmo proposto.

1. Na parte de inserção, primeiro a imagem é decomposta em três níveis com dez sub-bandas. Supõe-se que o tamanho da imagem hospedeira é p linhas por q colunas e o tamanho da imagem da marca d'água é r linhas por s colunas.
2. Todas as sub-bandas ($LH_3, HL_3, HH_3, LH_2, HL_2, HH_2$) são utilizadas nesta versão proposta para o algoritmo proposto. Os valores limiares (*threshold*) de cada sub-banda são escolhidos pelo algoritmo a seguir:

$$T_{11} = \frac{1}{n} \{x_{LH_3} | \text{Mediana}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in LH_3\}, \text{ onde } i = 1, 2, \dots, n,$$

$$T_{12} = \frac{1}{n} \{x_{HL_3} | \text{Mediana}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in HL_3\}, \text{ onde } i = 1, 2, \dots, n,$$

$$T_{13} = \frac{1}{n} \{x_{HH_3} | \text{Mediana}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n), x_i \in HH_3\}, \text{ onde } i = 1, 2, \dots, n,$$

$$T_{21} = \frac{1}{m} \{x_{LH_2} | \text{Mediana}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m), x_i \in LH_2\}, \text{ onde } i = 1, 2, \dots, m,$$

$$T_{22} = \frac{1}{m} \{x_{HL_2} | \text{Mediana}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m), x_i \in HL_2\}, \text{ onde } i = 1, 2, \dots, m,$$

$$T_{23} = \frac{1}{m} \{x_{HH_2} | \text{Mediana}(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m), x_i \in HH_2\}, \text{ onde } i = 1, 2, \dots, m,$$

3. A seguir encontra-se a *QSWT* pelo algoritmo, descrito a seguir:

Encontra *QSWT*

$k = 0$;

Para i de 1 até n faça

 Para j de 1 até m faça

 Se $x_{31}(i, j) \geq T_{11}$; $x_{31}(i, j) \in LH_3$

 e $x_{32}(i, j) \geq T_{12}$; $x_{32}(i, j) \in HL_3$

 e $x_{33}(i, j) \geq T_{13}$; $x_{33}(i, j) \in HH_3$

 Se $x_{21}(2 * i - 1, 2 * j - 1) \geq T_{21}$ e $x_{21}(2 * i - 1, 2 * j) \geq T_{21}$ e

$x_{21}(2 * i, 2 * j - 1) \geq T_{21}$ e $x_{21}(2 * i, 2 * j) \geq T_{21}$; $x_{21}(p, q) \in LH_2$

 e $x_{22}(2 * i - 1, 2 * j - 1) \geq T_{22}$ e $x_{22}(2 * i - 1, 2 * j) \geq T_{22}$ e

$x_{22}(2 * i, 2 * j - 1) \geq T_{22}$ e $x_{22}(2 * i, 2 * j) \geq T_{22}$; $x_{22}(p, q) \in HL_2$

 e $x_{23}(2 * i - 1, 2 * j - 1) \geq T_{23}$ e $x_{23}(2 * i - 1, 2 * j) \geq T_{23}$ e

$x_{23}(2 * i, 2 * j - 1) \geq T_{23}$ e $x_{23}(2 * i, 2 * j) \geq T_{23}$; $x_{23}(p, q) \in HH_2$

$QSWT[k] = \{x_{31}(i, j), x_{32}(i, j), x_{33}(i, j),$

$x_{21}(2 * i - 1, 2 * j - 1), x_{21}(2 * i - 1, 2 * j), x_{21}(2 * i, 2 * j - 1), x_{21}(2 * i, 2 * j),$

$x_{22}(2 * i - 1, 2 * j - 1), x_{22}(2 * i - 1, 2 * j), x_{22}(2 * i, 2 * j - 1), x_{22}(2 * i, 2 * j),$

$x_{23}(2 * i - 1, 2 * j - 1), x_{23}(2 * i - 1, 2 * j), x_{23}(2 * i, 2 * j - 1), x_{23}(2 * i, 2 * j)\}$

$k = k + 1$;

 Fim-se

Fim-se

Fim-para j

Fim-para i

4. Calcula-se a soma dos coeficientes da $QSWT[i]$, para $i = 1$ até k e classifica a $QSWT$ em ordem decrescente;
5. Classifica os níveis de cinza da marca d'água W em ordem decrescente;
6. Na fase de inserção da marca d'água, os níveis de cinza classificados são inseridos de forma redundante nas sub-bandas LH3, HL3, HH3, LH2, HL2 e HH2 com a finalidade de obter uma maior robustez no algoritmo.

O nível de cinza $W(k, l)$ é inserido nas sub-bandas LH3, HL3 e HH3 em $x_{3s}(i, j)$, $s = 1...3$, gerando um elemento x'_{3s} da seguinte forma:

$x'_{3s}(i, j) = x_{3s}(i, j) + \alpha * W(k, l)$, $s = 1...3$, onde α é um parâmetro de escala que altera o percentual de qualidade da imagem hospedeira.

O nível de cinza $W(k, l)$ é inserido na sub-banda LH2, HL2 e HH2 em $x_{2s}(i, j)$, $s = 1...3$, gerando um elemento x'_{2s} da seguinte forma:

$x'_{2s}(i, j) = x_{2s}(i, j) + \alpha * W(k, l)$, $s = 1...3$, onde

$x_{2s}(i, j) = \max(x_{2s}(2 * i - 1, 2 * j - 1), x_{2s}(2 * i - 1, 2 * j), x_{2s}(2 * i, 2 * j - 1), x_{2s}(2 * i, 2 * j))$, $s = 1...3$.

O algoritmo, pelas duas classificações, $QSWT$ e da marca d'água, irá inserir sempre os níveis de cinza menores nos menores coeficientes da $QSWT$ e os maiores níveis de cinza da marca d'água nos maiores coeficientes da $QSWT$.

7. Salvam-se as posições onde a marca d'água foi inserida, isto é, a própria $QSWT$, e finalmente executa a inversa da decomposição *wavelet* obtendo-se a imagem embebida, que também é salva.

5.3 Resultados Obtidos dos Testes Utilizando o Algoritmo Proposto

Nesta seção são apresentados os resultados dos experimentos realizados, mostrando a correlação estatística entre as imagens obtidas da aplicação do algoritmo proposto, na forma de tabelas e figuras, juntamente com os resultados obtidos da aplicação do algoritmo de Hsieh, descritos no capítulo 4 deste trabalho, com a finalidade de facilitar a análise e a comparação dos resultados obtidos dos algoritmos.

BITMAP

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira

após a inserção da marca d'água no formato bitmap utilizando o algoritmo proposto demonstra, mostrados na Tabela 5.1 e no gráfico da Figura 5.1, o mesmo comportamento com relação ao algoritmo de Hsieh e outros. Apresenta o maior resultado para $\alpha = 1$ com correlação = 0,9999 e o menor resultado para $\alpha = 100$ com correlação = 0,9018. Observa-se da aplicação do algoritmo proposto uma diminuição da correlação estatística, entre 1% e 6%, para todos os α testados comparados com os resultados da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros.

Assim, os resultados demonstram que, quando ocorre apenas perdas no processo de quantização, o algoritmo de Hsieh e outros apresenta melhores resultados do que o algoritmo proposto. Portanto, para imagens embebidas com marca d'água que não serão compactada, o algoritmo proposto apresenta pior performance.

Tabela 5.1: Correlação estatística das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e outros e pelo algoritmo proposto no formato bitmap.

α	Bitmap			
	Imagem Hsieh	Marca Hsieh	Imagem Proposto	Marca Proposto
1	0,9999593	0,9760340	0,999956	0,890981
5	0,9999222	0,9733546	0,999733	0,984136
10	0,9995462	0,9986935	0,998809	0,99713
15	0,9992804	0,9992028	0,997501	0,998358
20	0,9984275	0,9999372	0,995328	0,999022
25	0,9972304	0,9996876	0,992483	0,998318
30	0,9966157	0,9997505	0,989605	0,998048
35	0,9950099	0,9995060	0,985661	0,997782
40	0,9938164	0,9997707	0,981835	0,997542
45	0,9924518	0,9995673	0,977497	0,997118
50	0,9901456	0,9996537	0,972037	0,996845
55	0,9890318	0,9996207	0,966994	0,996455
60	0,9862410	0,9995885	0,960545	0,996136
65	0,9831493	0,9994662	0,95365	0,995627
70	0,9817267	0,9994123	0,947543	0,995108
75	0,9783398	0,9992677	0,940023	0,994624
80	0,9760387	0,9992069	0,933415	0,99388
85	0,9735301	0,9991396	0,926341	0,993389
90	0,9695662	0,9990703	0,91799	0,992766
95	0,9677365	0,9989614	0,91073	0,99194
100	0,9633334	0,9988227	0,901848	0,991157

Quanto a correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, utilizando o algoritmo proposto, demonstra o mesmo comportamento com relação ao algoritmo de Hsieh e outros, apresenta o maior resultado para $\alpha = 100$ com correlação = 0,9911 e o menor resultado para $\alpha = 1$ com correlação = 0,8909. Pode-se observar na Tabela 5.1 e no gráfico da Figura 5.2 os resultados da aplicação do algoritmo proposto. Percebe-se uma diminuição da correlação estatística de aproximadamente 0,5%, para todos os α testados, comparados com os resultados da aplicação do algoritmo de

Hsieh e outros.

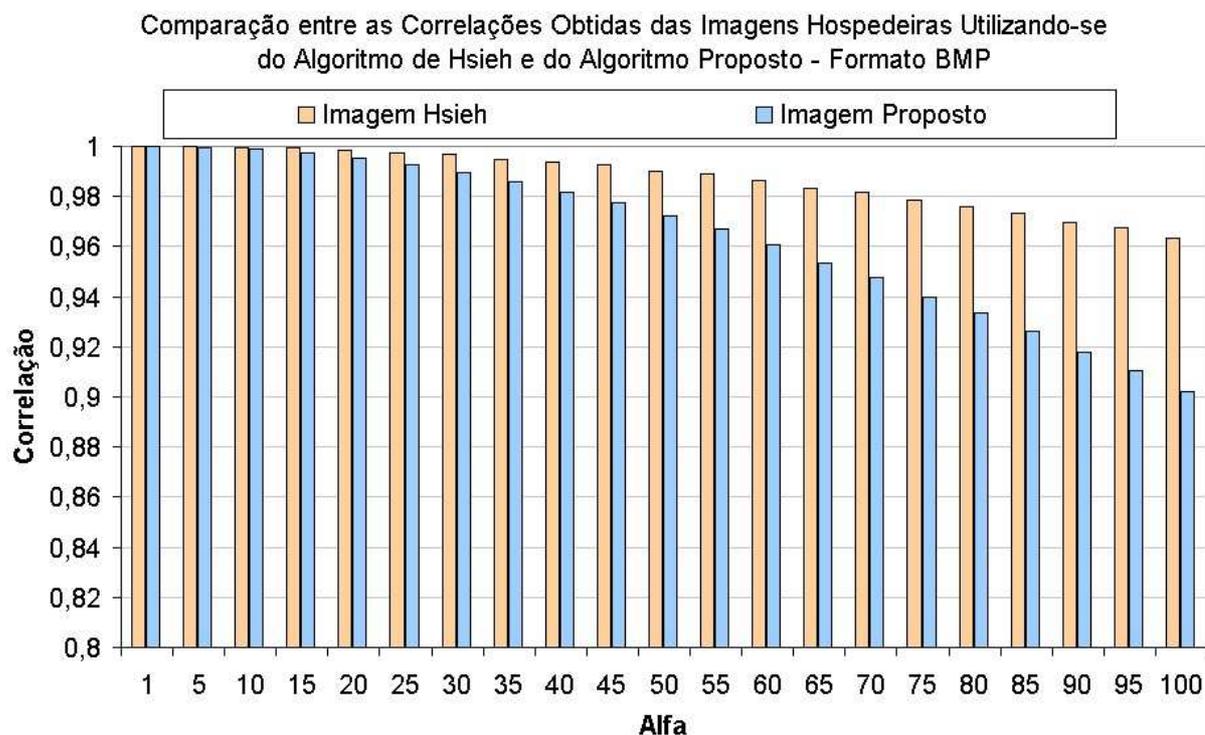


Figura 5.1: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato BITMAP.

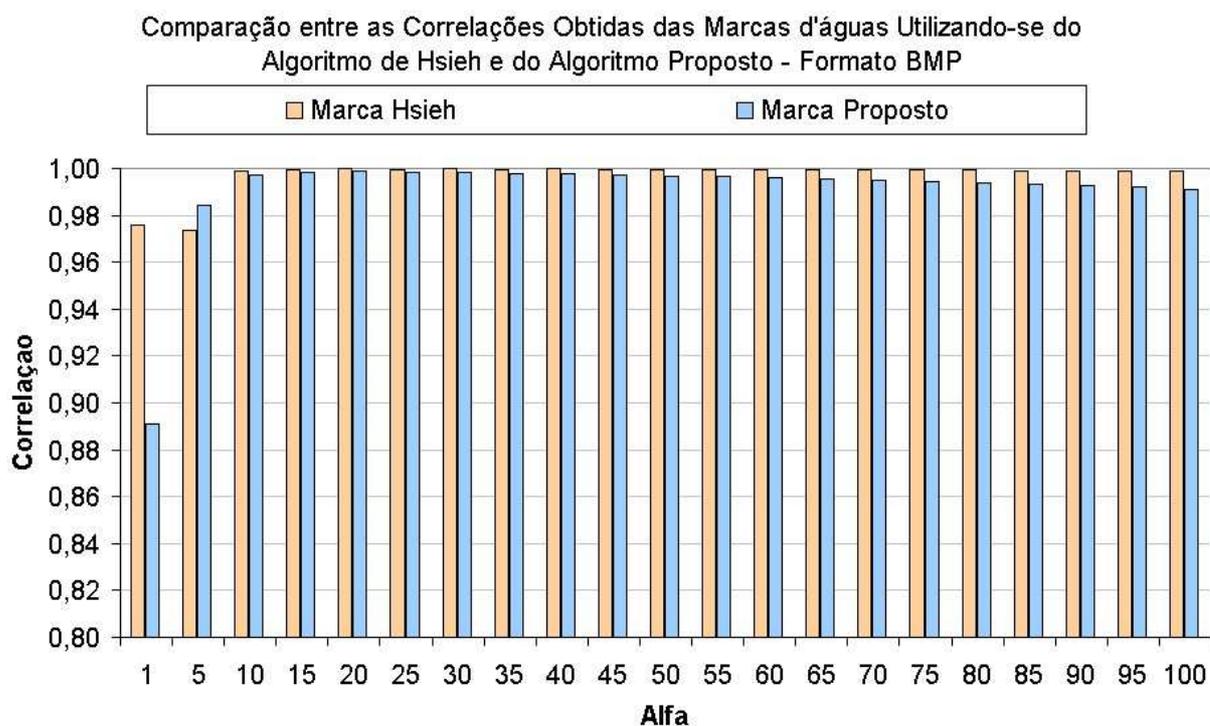


Figura 5.2: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato BITMAP.

Como exemplo para análise visual e comparação entre os algoritmos proposto e de Hsieh, tem-se a Figura 5.3, que mostra as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário para a aplicação de Hsieh, pois apresenta o resultado que menos degrada as imagens. Observa-se que a marca d'água do algoritmo proposto apresenta maior nitidez que a de Hsieh, conservando a transparência da imagem hospedeira.

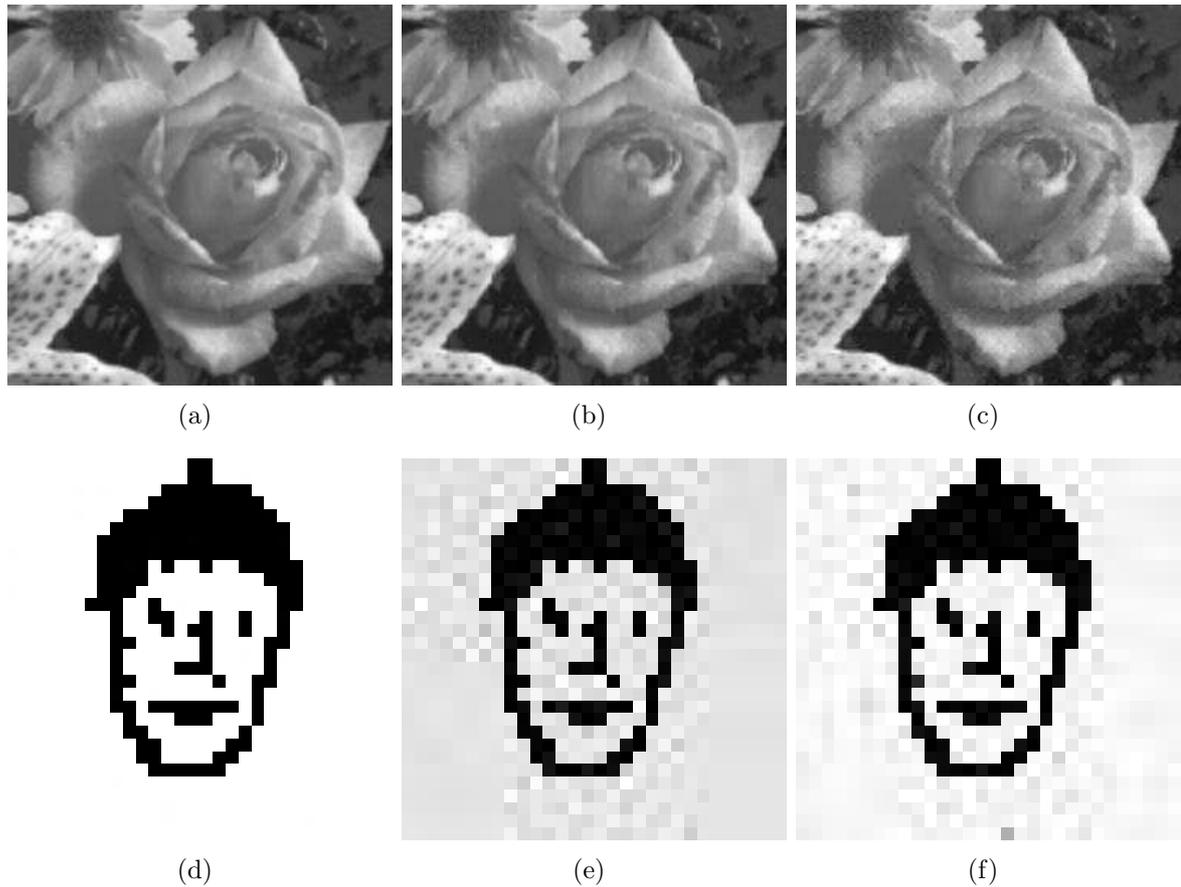


Figura 5.3: Formato bitmap: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 15$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 15$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 15$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 15$).

JPEG - As imagens geradas no formato jpeg foram armazenadas com níveis de qualidade de 100%, 92%, 62%, 35%, 19% e 10%.

Resultados para JPEG 100% de qualidade

A correlação estatística, conforme detalhado na Tabela 5.2 e no gráfico da Figura 5.4, entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após inserção da marca d'água no formato jpeg 100% de qualidade, utilizando o algoritmo proposto, demonstra o mesmo comportamento com relação ao algoritmo de Hsieh e outros. Apresenta o maior resultado para $\alpha = 1$ com correlação = 0,9999 e o menor resultado para $\alpha = 100$ com correlação = 0,9017.

Tabela 5.2: Correlação estatística das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e outros e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 100%.

α	JPEG Qualidade 100%			
	Imagem Hsieh	Marca Hsieh	Imagem Proposto	Marca Proposto
1	0,9999481	0,9191401	0,9999428	0,8161668
5	0,9999097	0,9528229	0,9997170	0,9776192
10	0,9995304	0,9960169	0,9987857	0,9959219
15	0,9992627	0,9976452	0,9974699	0,9978854
20	0,9984105	0,9992256	0,9952866	0,9987599
25	0,9972094	0,9992697	0,9924338	0,9980832
30	0,9965924	0,9994551	0,9895427	0,9979143
35	0,9949818	0,9992999	0,9855975	0,9976420
40	0,9937791	0,9995624	0,9817529	0,9973923
45	0,9924229	0,9993833	0,9774181	0,9969941
50	0,9901051	0,9995448	0,9719566	0,9966943
55	0,9889985	0,9995127	0,9668974	0,9963389
60	0,9861935	0,9994802	0,9604245	0,9960183
65	0,9830937	0,9993878	0,9535422	0,9955044
70	0,9816778	0,9993474	0,9474410	0,9950117
75	0,9782941	0,9992301	0,9398976	0,9945334
80	0,9759703	0,9991467	0,9333089	0,9938079
85	0,9734811	0,9990942	0,9262309	0,9932986
90	0,9694926	0,9990198	0,9178651	0,9926429
95	0,9676737	0,9989022	0,9106059	0,9918771
100	0,9422789	0,9974958	0,9017327	0,9910519

Quanto a correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, utilizando o algoritmo proposto, conforme detalhado na Tabela 5.2 e no gráfico da Figura 5.5, obteve-se o maior resultado para $\alpha = 20$ com correlação = 0,9987 e o menor resultado para $\alpha = 1$ com correlação = 0,8161. Enquanto que o maior resultado para algoritmo de Hsieh é de $\alpha = 40$ com correlação = 0,9995 e observando-se a Figura 5.6, nota-se que as imagens do algoritmo proposto apresenta uma acomodação visual melhor do que as imagens para o melhor resultado da marca d'água do algoritmo de Hsieh.

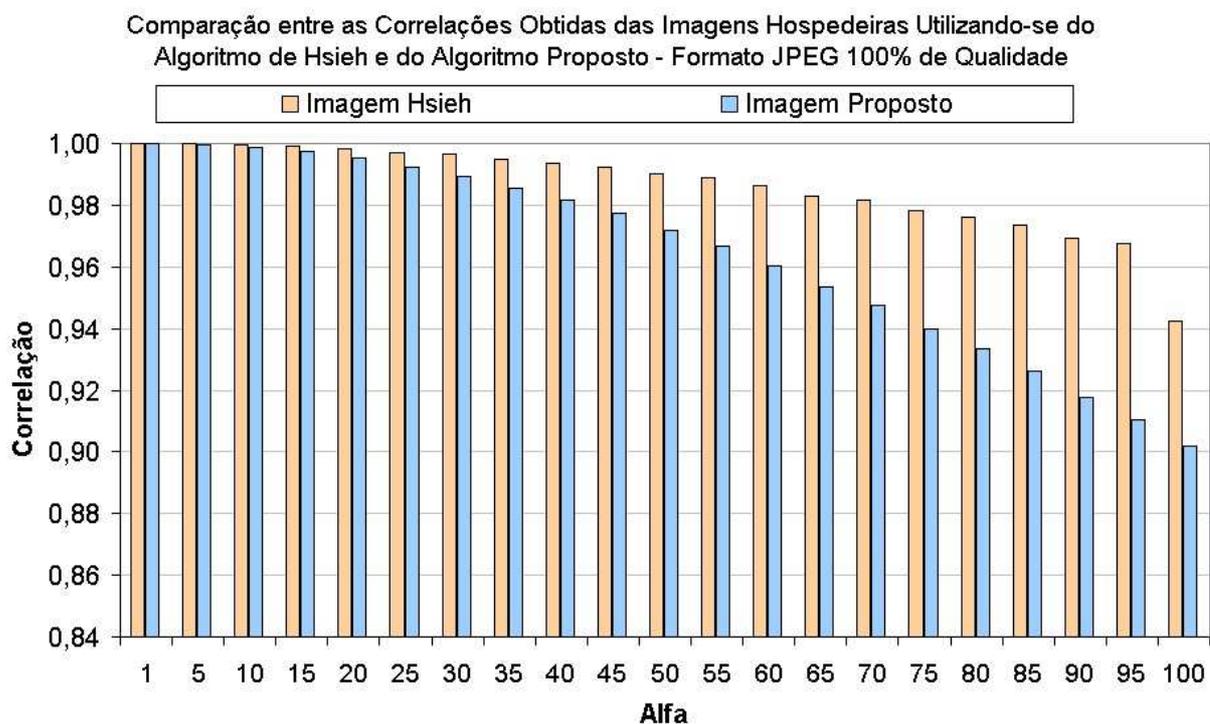


Figura 5.4: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 100% de qualidade.

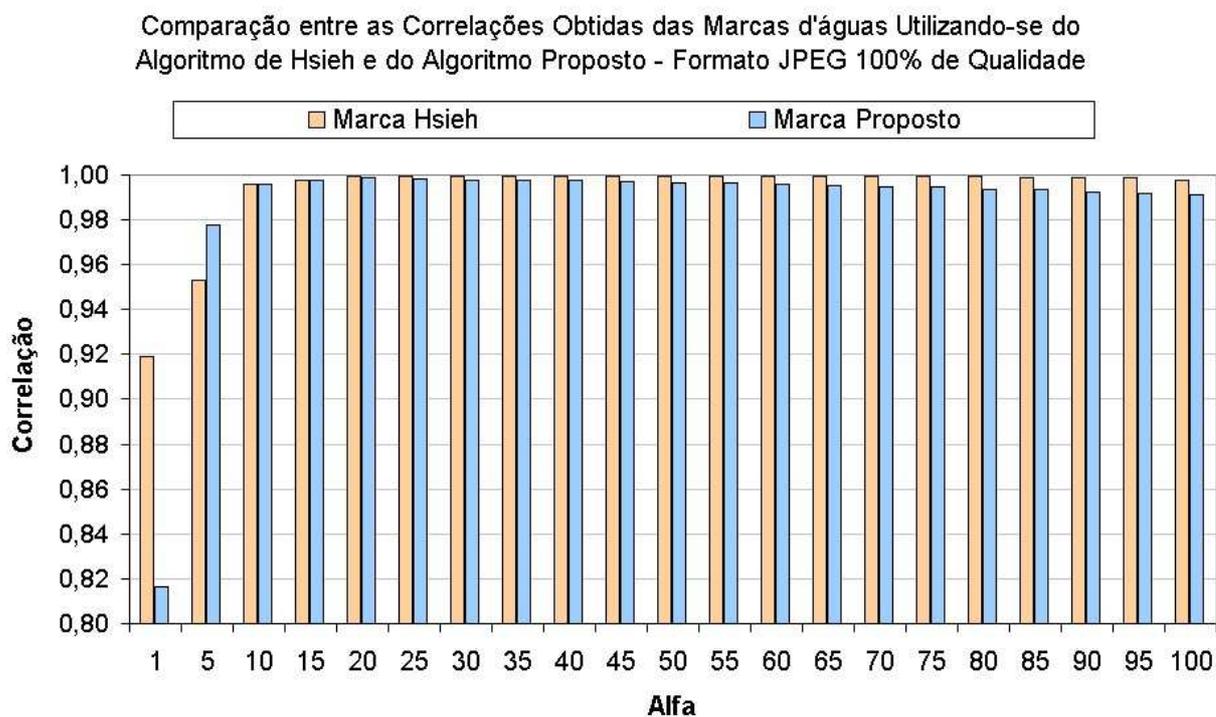


Figura 5.5: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 100% de qualidade.

Pode-se observar na Tabela 5.2 da aplicação do algoritmo proposto, uma diminuição de aproximadamente 0,5% da correlação estatística para os α superiores a 15, quando comparados com os resultados da aplicação do algoritmo de Hsieh.

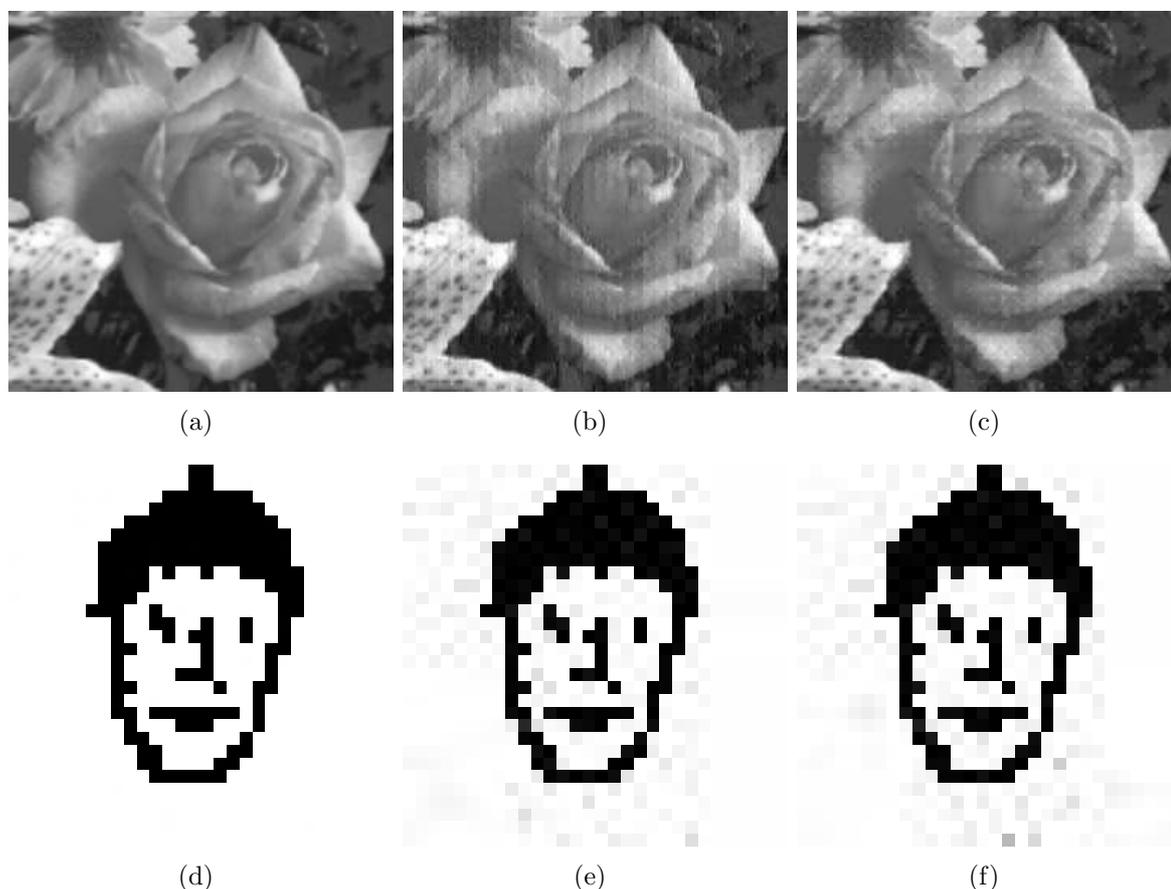


Figura 5.6: Formato JPEG 100%: Melhor resultado da marca recuperada (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 40$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 20$); (d) marca original; (e) Marca de Hsieh ($\alpha = 40$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 20$).

Como exemplo para análise visual e a comparação entre os algoritmos proposto e de Hsieh, tem-se a Figura 5.7, que mostra as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário para a aplicação de Hsieh, pois apresenta o resultado que menos degrada as imagens. Pode-se observar nessa figura que a marca d'água do algoritmo proposto apresenta maior nitidez que a de Hsieh, conservando a transparência da imagem hospedeira.

Assim, para o armazenamento com o formato jpeg com 100% de qualidade, isto é, compactação sem perda, o algoritmo de Hsieh apresenta melhores resultados do que o algoritmo proposto. Para a análise visual, pode-se perceber que o ruído causado pelo algoritmo proposto mantém melhor visibilidade da imagem.

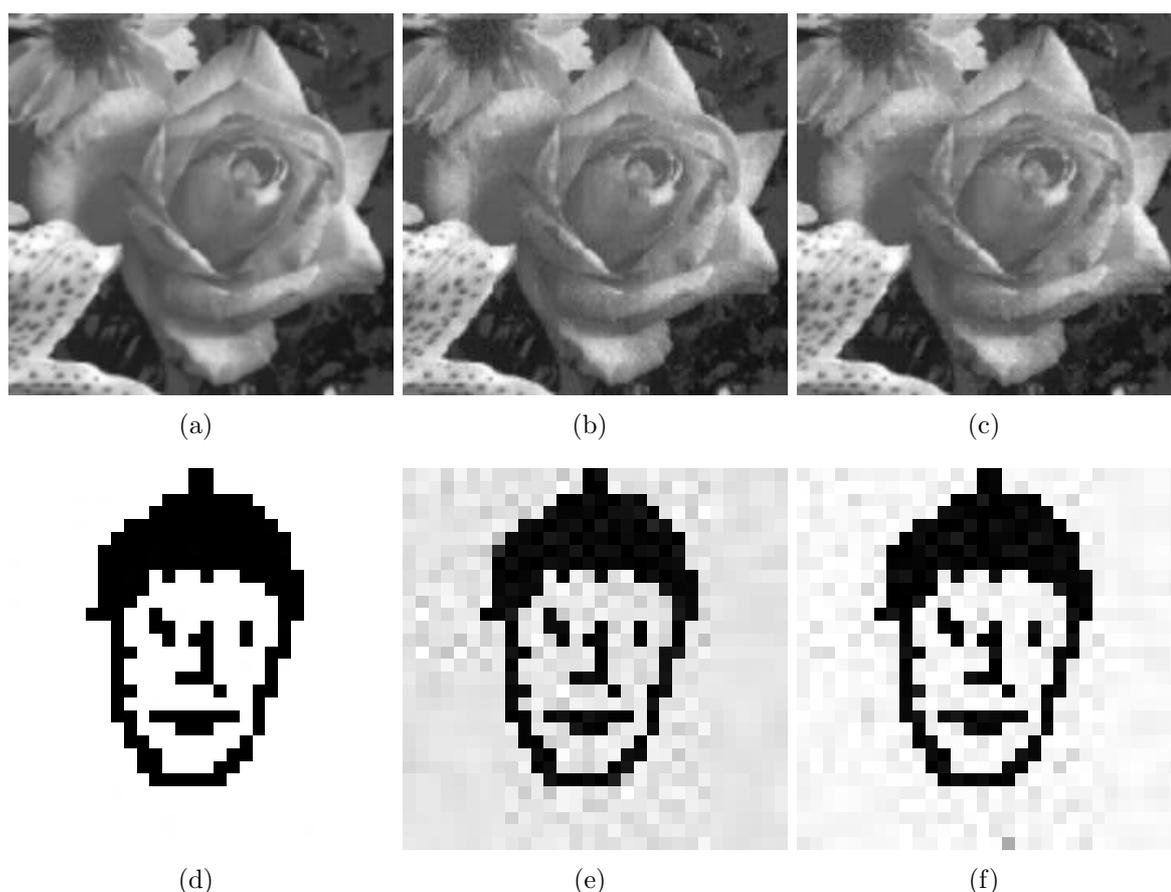


Figura 5.7: Formato JPEG 100%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 15$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 15$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 15$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 15$).

Resultados para JPEG 92% de qualidade

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original após a inserção da marca d'água no formato JPEG 92% de qualidade, utilizando o algoritmo proposto, conforme detalhado na Tabela ?? e no gráfico da Figura 5.8, demonstra o mesmo comportamento com relação ao algoritmo de Hsieh e outros. Apresenta o maior resultado de correlação estatística para o valor de $\alpha = 1$ com correlação = 0,9997 e o menor resultado da correlação estatística para o valor de $\alpha = 100$ com correlação = 0,9009. Pode-se observar nessa tabela que ocorreu uma diminuição, entre 1% e 4%, da correlação estatística para todos os α testados do algoritmo proposto comparados com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros.

Para a correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, utilizando o algoritmo proposto, mostrados na Tabela 5.3 e no gráfico da Figura 5.9, nota-se para α de 5 até 20, um aumento médio superior a 5% dos resultados comparados à aplicação do algoritmo de Hsieh e outros. Obteve-se do algoritmo proposto

Tabela 5.3: Correlação estatística das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 92%.

α	JPEG Qualidade 92%			
	Imagem Hsieh	Marca Hsieh	Imagem Proposto	Marca Proposto
1	0,9997729	0,5551172	0,999772	0,458009
5	0,9997397	0,6708764	0,999576	0,864632
10	0,9993801	0,9447321	0,998723	0,968466
15	0,9991188	0,9678996	0,997400	0,984422
20	0,9982508	0,9855697	0,995148	0,990601
25	0,9969775	0,9929701	0,992282	0,992754
30	0,9963295	0,9940337	0,989213	0,994175
35	0,9947608	0,9954985	0,984750	0,994137
40	0,9936551	0,9968312	0,981062	0,994901
45	0,9922992	0,9971335	0,976793	0,994977
50	0,9900794	0,9976052	0,971273	0,995009
55	0,9889988	0,9979892	0,966573	0,995417
60	0,9862208	0,9982899	0,960339	0,994856
65	0,9830586	0,9983382	0,953279	0,994695
70	0,9815723	0,9981532	0,946830	0,993789
75	0,9781780	0,9982055	0,939497	0,993575
80	0,9760163	0,9983331	0,933050	0,992539
85	0,9734378	0,9983281	0,925694	0,992143
90	0,9691524	0,9983643	0,917584	0,991678
95	0,9673115	0,9982262	0,909833	0,990776
100	0,9416785	0,9967568	0,900927	0,989841

de correlação maior resultado de correlação, para $\alpha = 55$ com correlação = 0,9954, sendo este resultado menor do que o $\alpha = 90$ com correlação = 0,9983 para a maior correlação estatística obtida da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros. Pode-se observar na Figura 5.10, que o algoritmo proposto conserva a robustez da marca, apesar do α ser menor, não apresenta melhora na transparência da imagem hospedeira, comparada à de Hsieh.

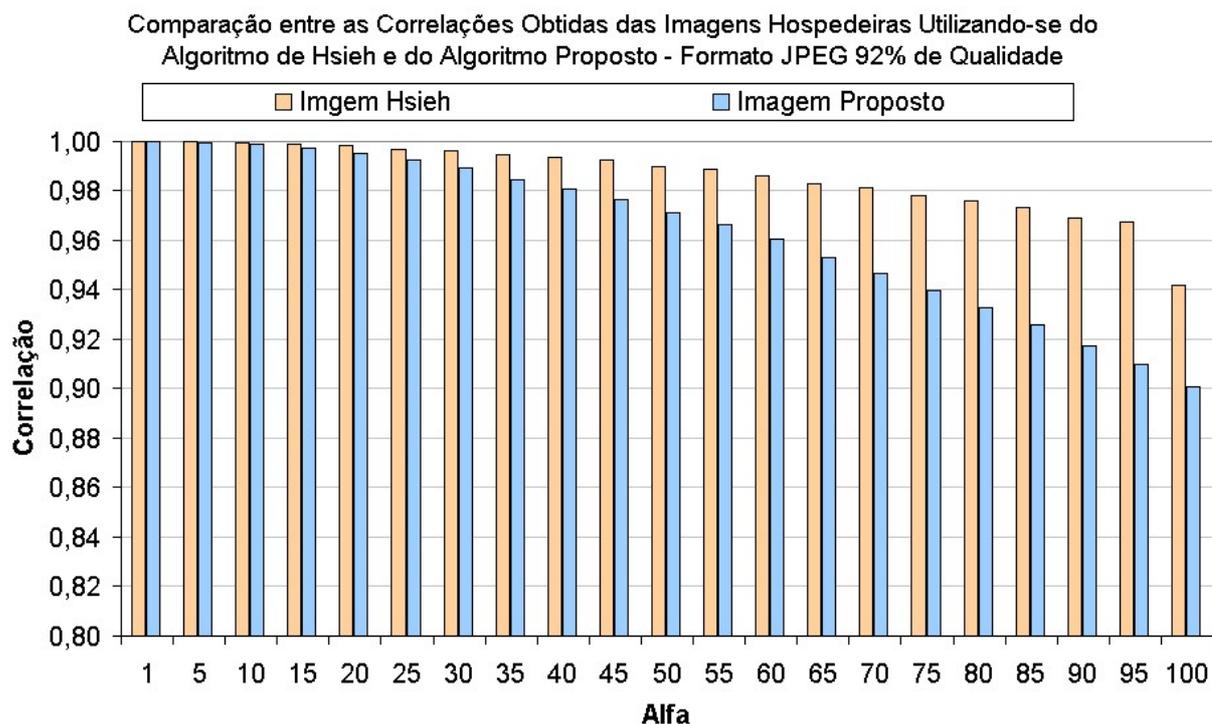


Figura 5.8: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 92% de qualidade.

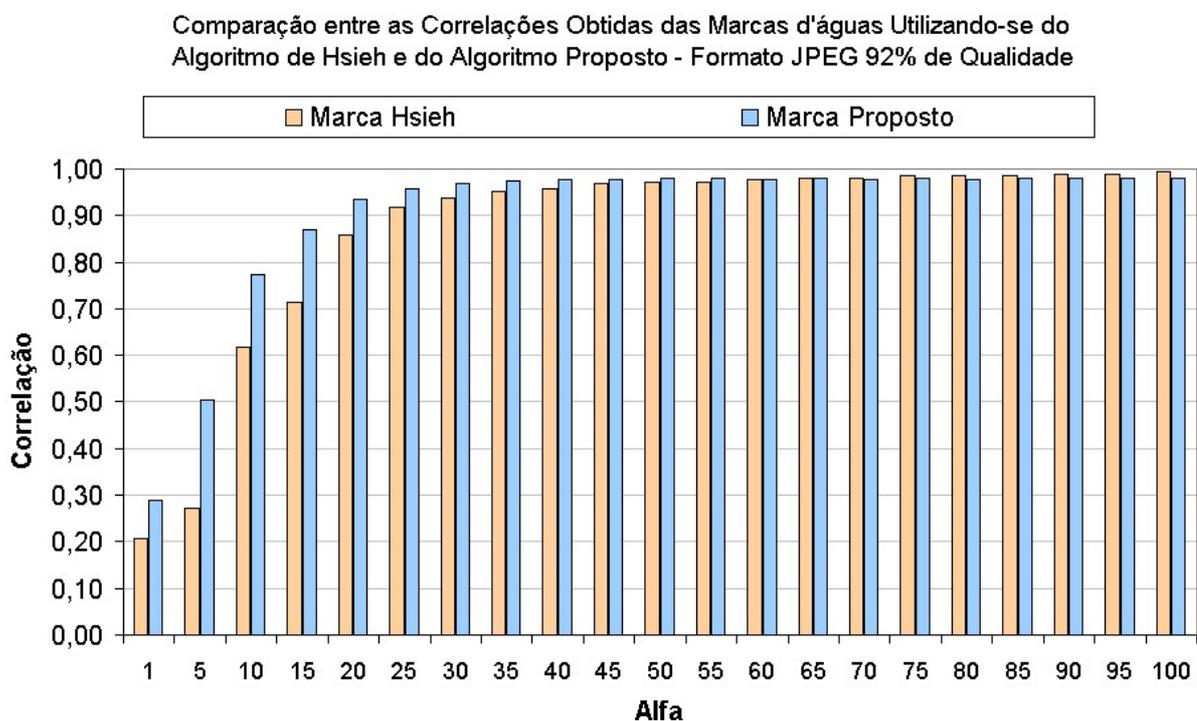


Figura 5.9: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 92% de qualidade.

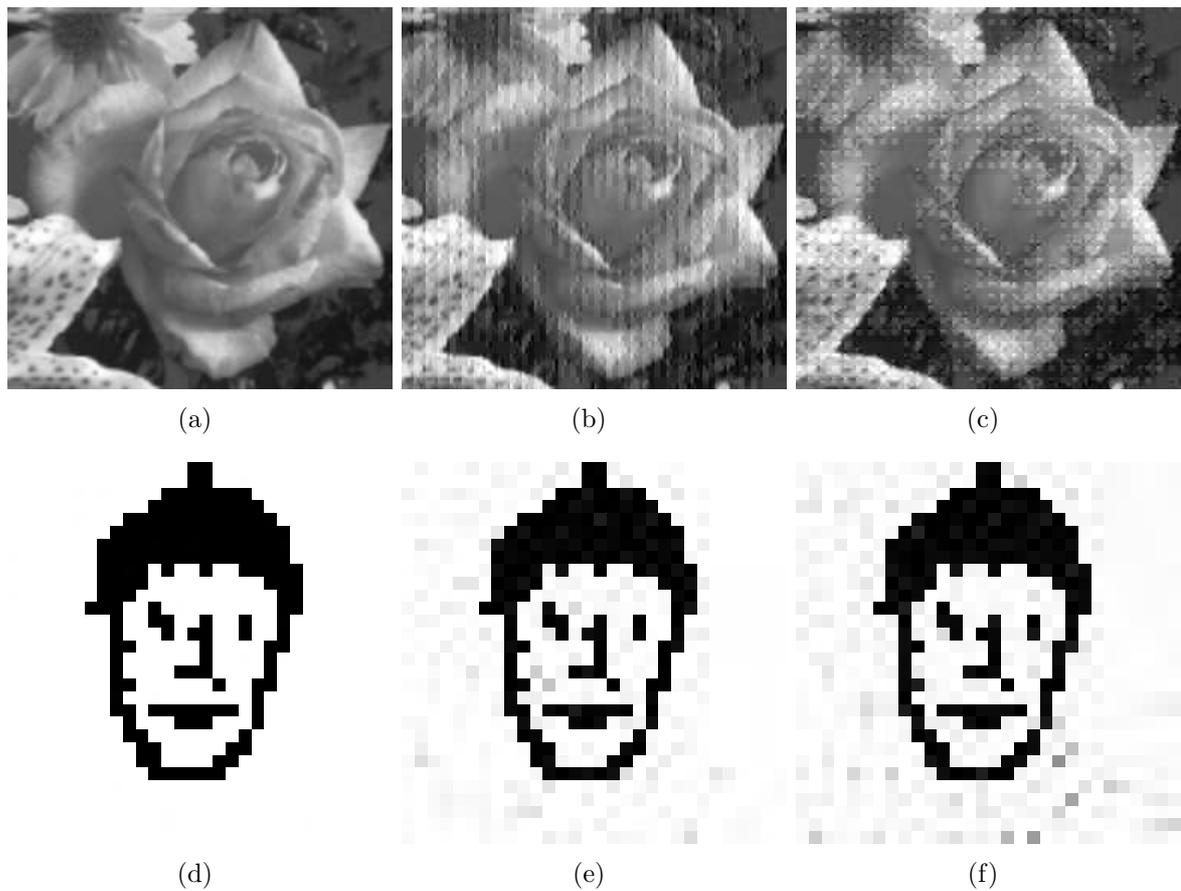


Figura 5.10: Formato JPEG 92%: Melhor resultado da marca recuperada (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 90$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 55$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 90$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 55$).

Como exemplo para a análise visual e para a comparação entre os algoritmos proposto e de Hsieh, tem-se a Figura 5.11, que mostra as imagens para $\alpha = 15$, considerado o α intermediário para a aplicação de Hsieh, pois ele apresenta o resultado que menos degrada as imagens. Pode se observar nessa figura que a marca d'água do algoritmo proposto apresenta maior nitidez que a de Hsieh, conservando a transparência da imagem hospedeira.

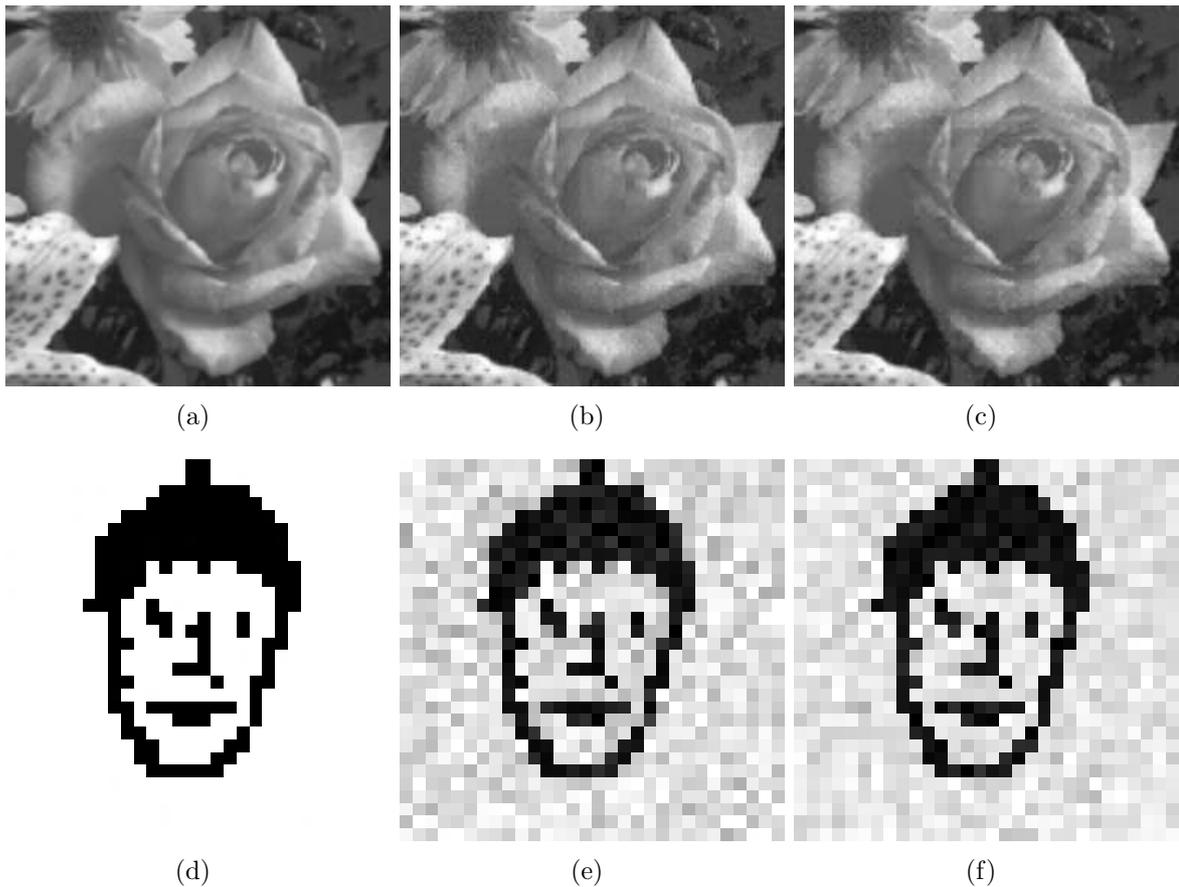


Figura 5.11: Formato JPEG 92%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 15$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 15$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 15$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 15$).

Pode-se observar na Tabela 5.3, da aplicação do algoritmo proposto um aumento de aproximadamente 2,5% da correlação estatística para o valor de $\alpha = 10$, na marca d'água comparado com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros para o mesmo valor de α . Pode-se observar na Figura 5.12, que o contorno da marca da aplicação proposta é mais nítido.

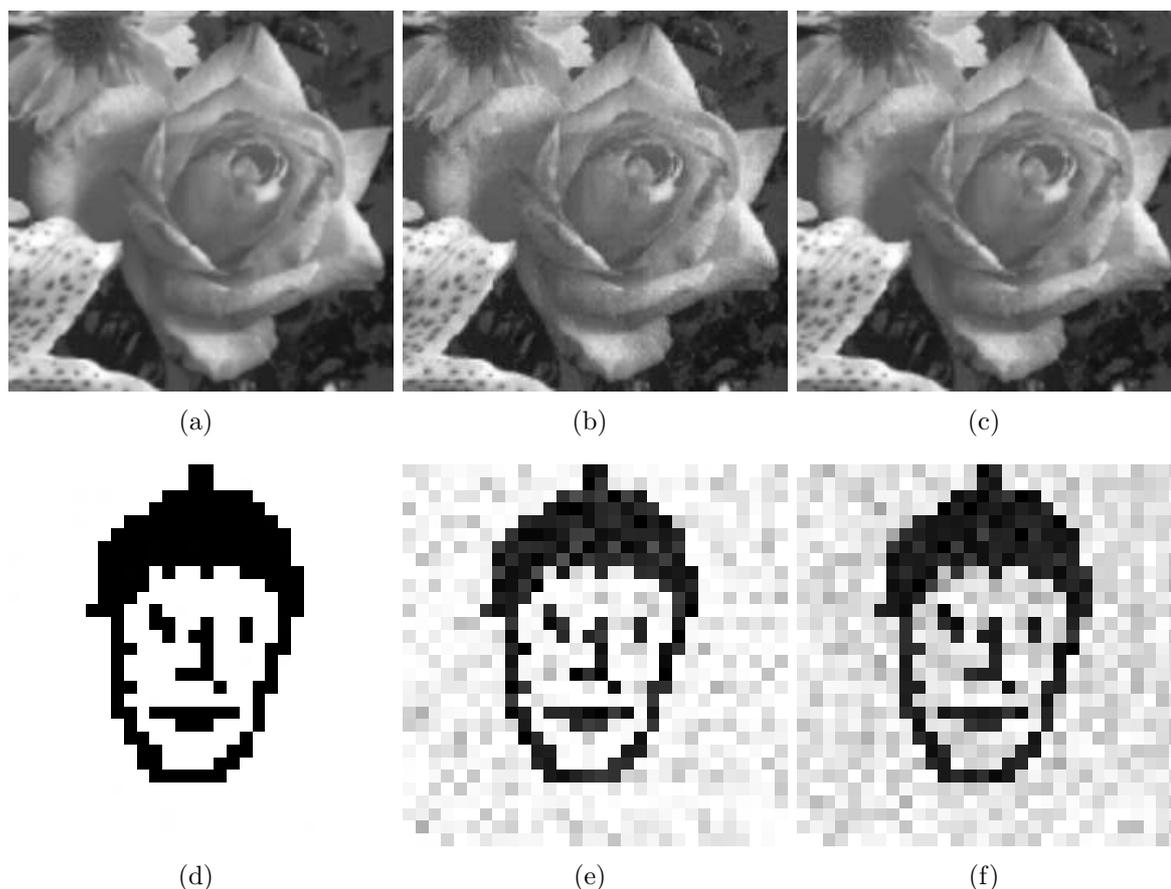


Figura 5.12: Formato JPEG 92%: Melhor resultado da marca recuperada (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 10$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 10$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 10$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 10$).

Para JPEG 92% de qualidade, isto é, com pouca perda no processo de compactação, pode-se observar melhores resultados para o algoritmo proposto para α 's menores. Para $\alpha = 10$ no algoritmo proposto é necessário um $\alpha = 15$ para obter a mesma qualidade da marca d'água recuperada, demonstrando que para a compactação com perdas o algoritmo proposto apresenta melhores resultados.

Resultados para JPEG 62% de qualidade

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água no formato JPEG 62% de qualidade, utilizando o algo-

ritmo proposto, mostrados na Tabela ?? e no gráfico da Figura 5.13, demonstra o mesmo comportamento com relação ao algoritmo de Hsieh e outros. Apresenta o maior resultado de correlação estatística para o valor de $\alpha = 1$ com correlação = 0,9991 e o menor resultado correlação estatística para o valor de $\alpha = 100$ com correlação = 0,9014. Pode-se observar nessa figura que a aplicação do algoritmo proposto diminuiu, entre 1% e 3%, a correlação estatística para todos os α 's testados comparados com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh.

Tabela 5.4: Correlação estatística das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 62%.

α	JPEG Qualidade 62%			
	Imagem Hsieh	Marca Hsieh	Imagem Proposto	Marca Proposto
1	0,9991690	0,2068152	0,999167	0,289977
5	0,9991366	0,2730593	0,999001	0,505326
10	0,9988178	0,6163928	0,998236	0,774751
15	0,9985788	0,7148786	0,997094	0,870776
20	0,9978314	0,8594421	0,995141	0,933897
25	0,9967641	0,9191992	0,992645	0,956201
30	0,9962116	0,9363382	0,990160	0,967549
35	0,9948053	0,9526316	0,986778	0,975499
40	0,9937984	0,9570882	0,983456	0,977025
45	0,9925276	0,9674537	0,979689	0,978170
50	0,9904586	0,9713228	0,974648	0,979487
55	0,9894593	0,9725001	0,969861	0,981046
60	0,9868299	0,9763550	0,962713	0,977828
65	0,9838930	0,9798196	0,955297	0,978943
70	0,9826701	0,9805622	0,949244	0,977242
75	0,9793792	0,9846474	0,942361	0,978949
80	0,9769357	0,9857217	0,935068	0,976159
85	0,9746056	0,9860576	0,928013	0,978918
90	0,9702705	0,9889755	0,919343	0,980184
95	0,9680329	0,9899225	0,910728	0,980512
100	0,9378936	0,9940093	0,901479	0,980972

A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, utilizando o algoritmo proposto, mostrados na Tabela 5.4 e no gráfico da Figura 5.14, pode-se notar para α de 1 até 60, um aumento de médio de 4% da correlação estatística comparados a aplicação do algoritmo de Hsieh e outros. Obteve-se o maior resultado para $\alpha = 55$ com correlação = 0,9810, sendo este α menor que o $\alpha = 100$ com correlação = 0,9983 para a maior resultado obtido da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros. Pose-se observar na Figura 5.15, que o algoritmo proposto aumenta a nitidez da marca apesar do α ser menor, mas não apresenta melhora na transparência da imagem hospedeira, comparada a do algoritmo de Hsieh e outros.

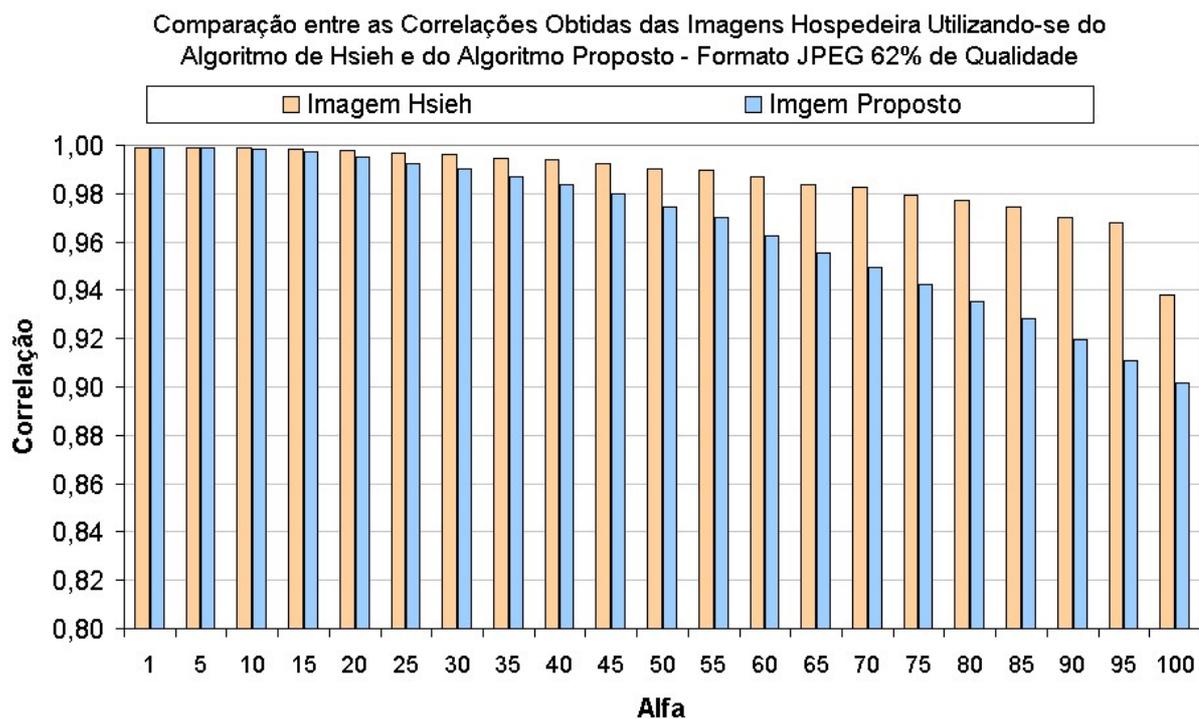


Figura 5.13: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 62% de qualidade.

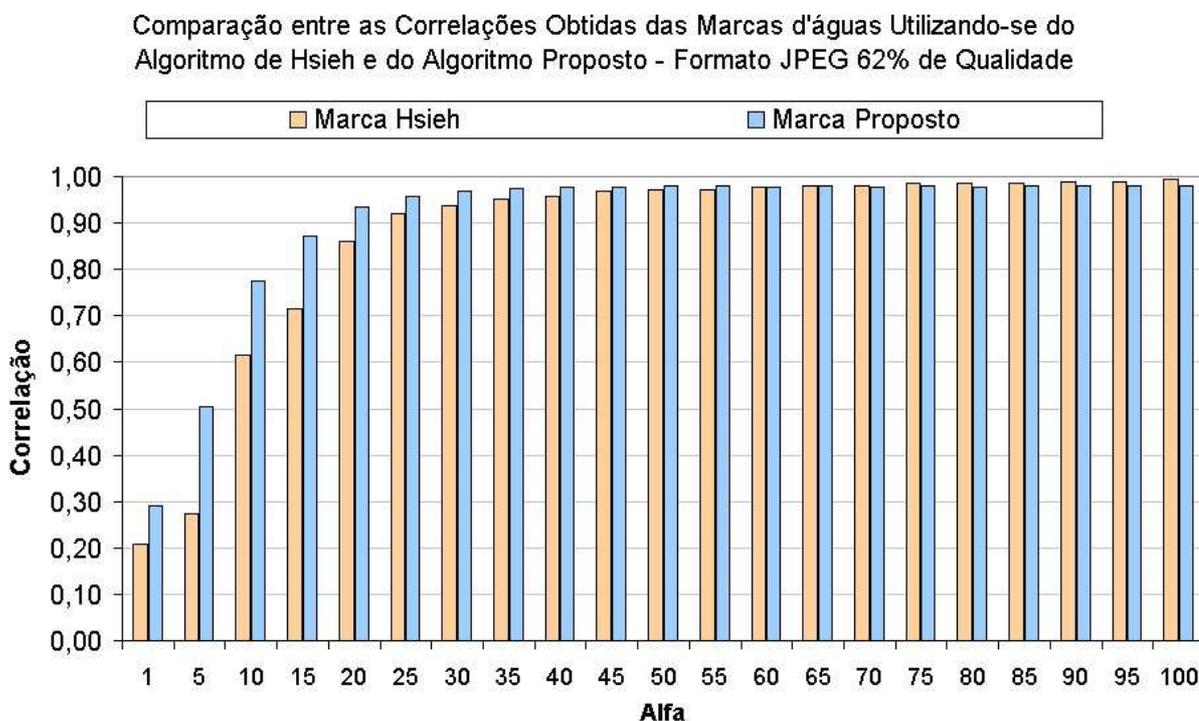


Figura 5.14: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 62% de qualidade.

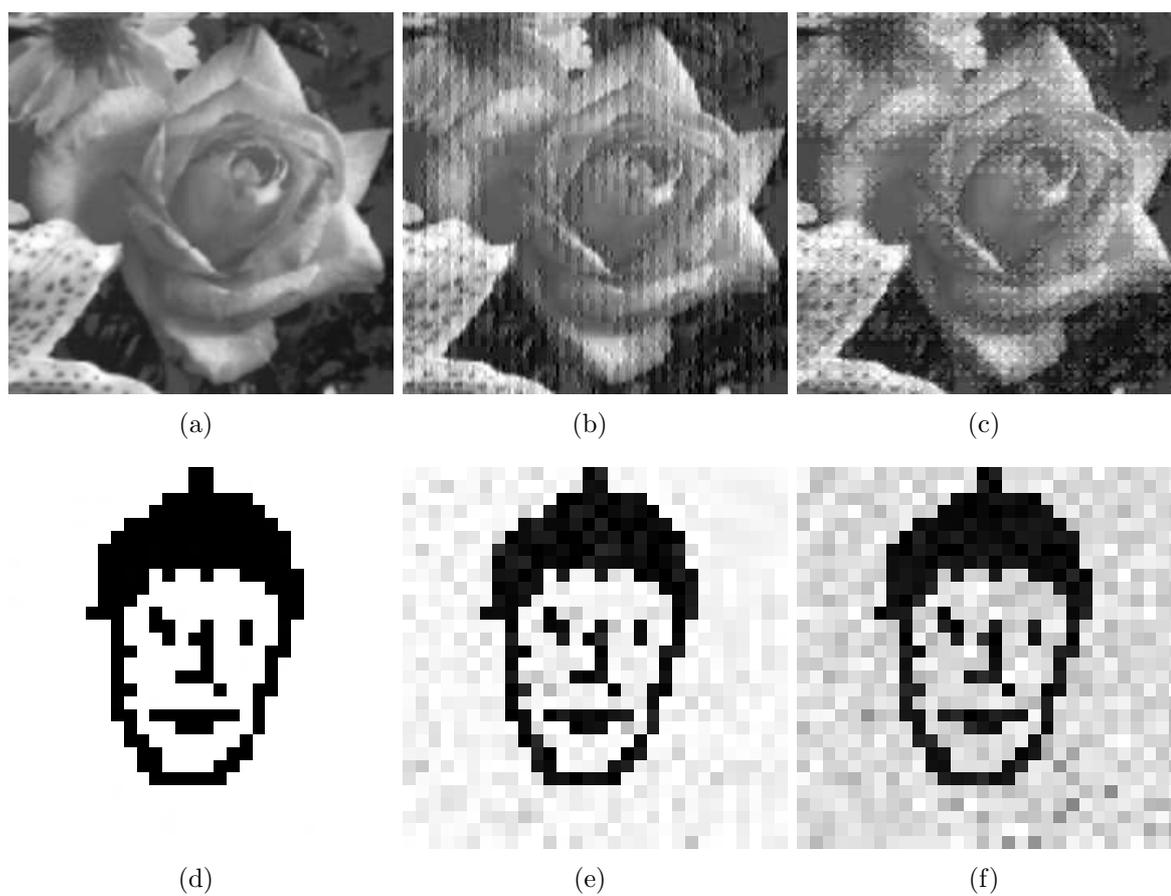


Figura 5.15: Formato JPEG 62%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 100$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 55$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 100$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 55$).

Quanto ao $\alpha = 15$ escolhido, da aplicação do algoritmo de Hsieh pela análise visual das imagens, como o melhor resultado que garante melhor transparência à imagem hospedeira e melhor nitidez à marca, pode-se observar na Tabela 5.4 um aumento em 16% da correlação estatística da marca d'água para o mesmo $\alpha = 15$ do algoritmo proposto. Este aumento pode-se verificar nas imagens da Figura 5.16, onde nota-se maior nitidez da marca, além de manter a transparência da imagem hospedeira.

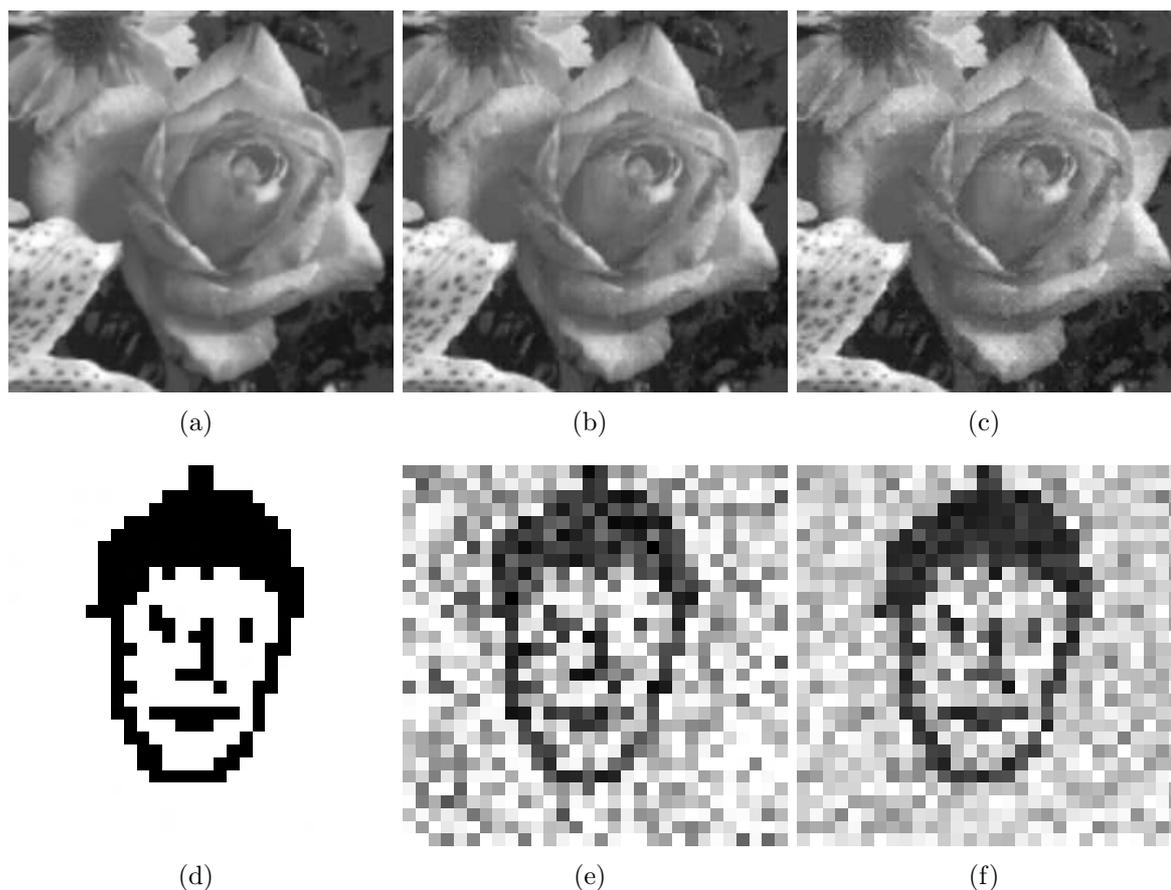


Figura 5.16: Formato JPEG 62%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 15$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 15$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 15$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 15$).

Assim percebe-se que o algoritmo proposto torna-se melhor do que o de Hsieh à medida que o nível de compactação com perda aumenta.

Resultados para JPEG 35% de qualidade

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água no formato JPEG 35% de qualidade, utilizando o algoritmo proposto, mostrados na Tabela 5.5 e no gráfico da Figura 5.17, demonstra o mesmo comportamento com relação ao algoritmo de Hsieh e outros. Apresenta o maior resultado

para $\alpha = 1$ com correlação = 0,9983 e o menor resultado para $\alpha = 100$ com correlação = 0,9107. Pode-se observar nessa tabela que a aplicação do algoritmo proposto, diminuiu a correlação estatística para todos os α 's testados, entre 1% e 3%, comparados com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh.

Tabela 5.5: Correlação estatística das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 35%.

α	JPEG Qualidade 35%			
	Imagem Hsieh	Marca Hsieh	Imagem Proposto	Marca Proposto
1	0,9983539	0,1911206	0,9983579	0,2735922
5	0,9983332	0,2067340	0,9981996	0,3392274
10	0,9980094	0,4232339	0,9975178	0,5649701
15	0,9978256	0,4832835	0,9965124	0,7237773
20	0,9970559	0,6354173	0,9947819	0,8173111
25	0,9959732	0,7560198	0,9922579	0,8834641
30	0,9954648	0,7917179	0,9895532	0,9094263
35	0,9939508	0,8647824	0,9855239	0,9336847
40	0,9927948	0,9002331	0,9820486	0,9459503
45	0,9916775	0,9206055	0,9784457	0,9559029
50	0,9895558	0,9385865	0,9737159	0,9627560
55	0,9885241	0,9438754	0,9693507	0,9648714
60	0,9862308	0,9546377	0,9640313	0,9686684
65	0,9836089	0,9603991	0,9580894	0,9734418
70	0,9823302	0,9615007	0,9526913	0,9763383
75	0,9794800	0,9650962	0,9463671	0,9780389
80	0,9775722	0,9668276	0,9405763	0,9776450
85	0,9751717	0,9675530	0,9343818	0,9760614
90	0,9718518	0,9716199	0,9265973	0,9763531
95	0,9703039	0,9737462	0,9196455	0,9751331
100	0,9455173	0,9786364	0,9107789	0,9748096

A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água extraída, utilizando o algoritmo proposto, mostrados na Tabela 5.5 e no gráfico da Figura 5.18, pode-se observar um aumento médio de 20% para o α entre 1 até 30 e após esse valor, um aumento médio de 5% da correlação estatística comparados a aplicação do algoritmo de Hsieh e outros. Obteve-se o maior resultado para o valor $\alpha = 75$ com correlação = 0,9780, sendo esse α menor do que o $\alpha = 100$ com correlação = 0,9786 para o maior resultado obtido da aplicação do algoritmo de Hsieh. Observa-se na Figura 5.20, que o algoritmo proposto aumenta a nitidez da marca apesar do α ser menor, e conserva a transparência da imagem hospedeira, comparada à do algoritmo de Hsieh e outros.

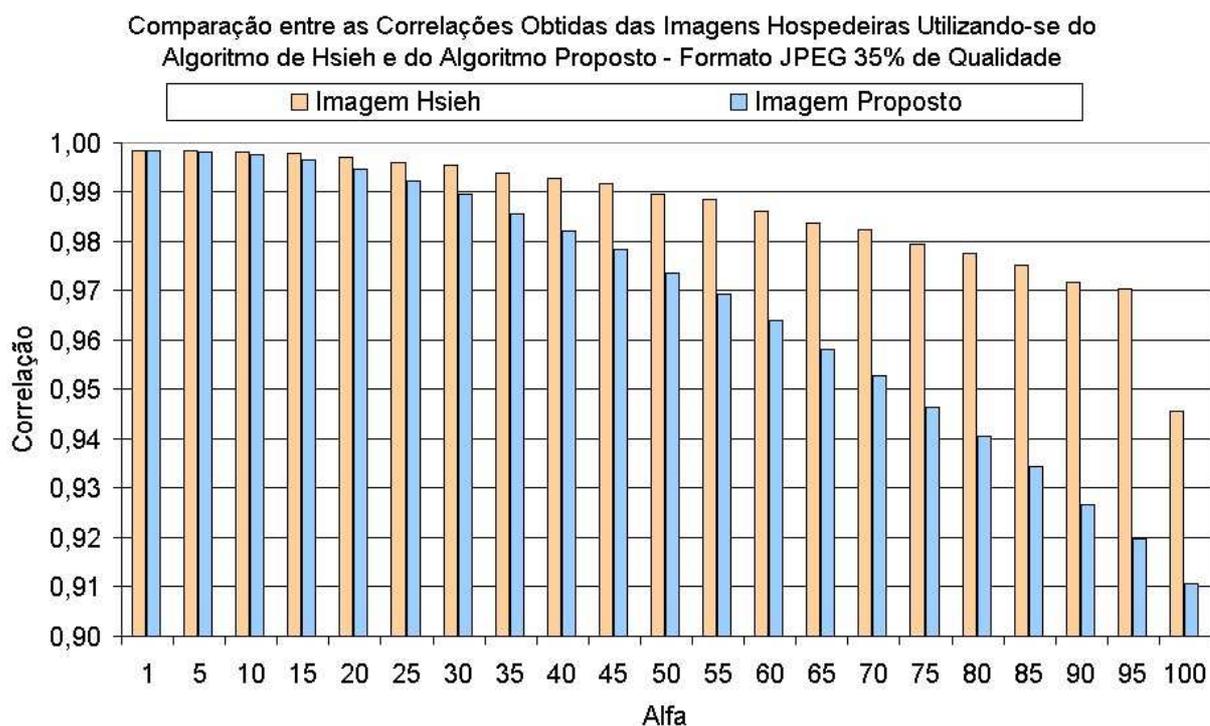


Figura 5.17: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 35% de qualidade.

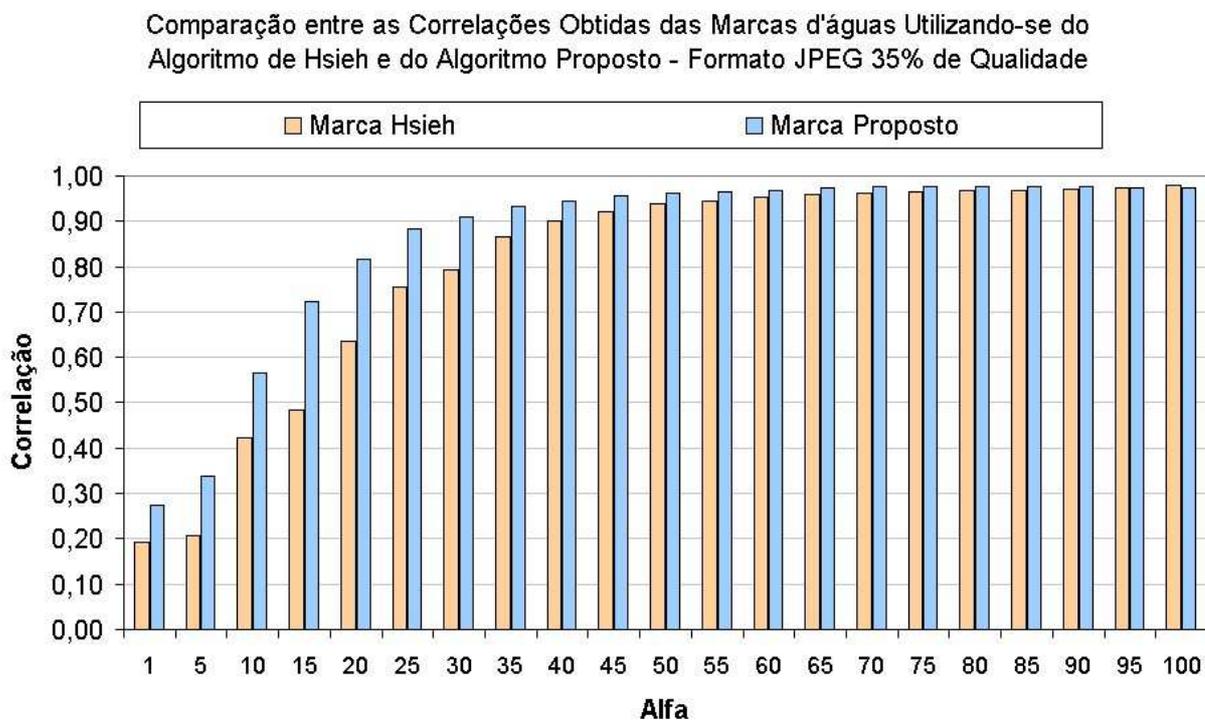


Figura 5.18: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 35% de qualidade.

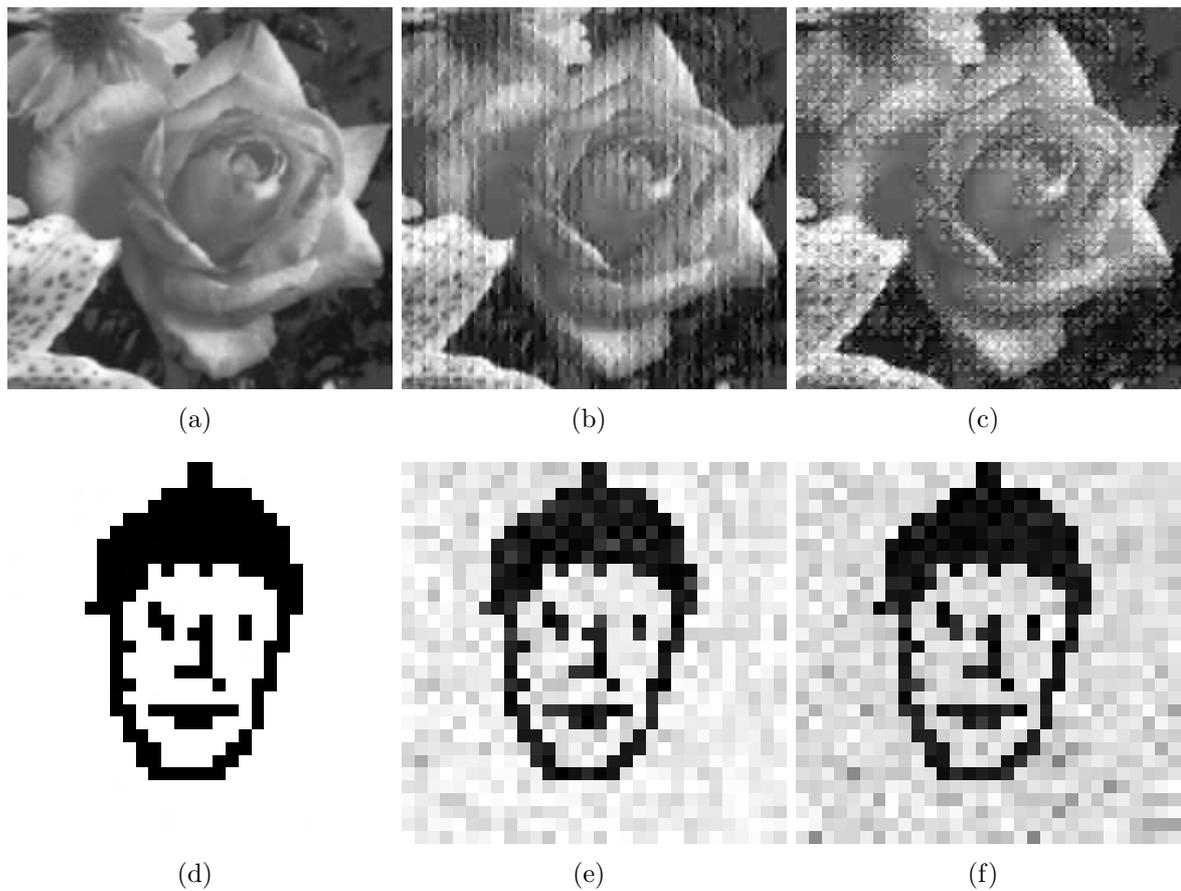


Figura 5.19: Formato JPEG 35%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 100$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 75$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 100$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 75$).

Quanto ao $\alpha = 20$ escolhido, da aplicação do algoritmo de Hsieh pela análise visual das imagens, como o melhor resultado que garante melhor transparência à imagem hospedeira e melhor nitidez à marca, pode-se observar na Tabela 5.5 um aumento de aproximadamente 16% da correlação estatística da marca para o mesmo α para o algoritmo proposto. Este aumento pode-se verificar nas imagens da Figura 5.20, onde nota-se maior nitidez do contorno da marca, além de manter a transparência da imagem hospedeira, comparada a Hsieh.

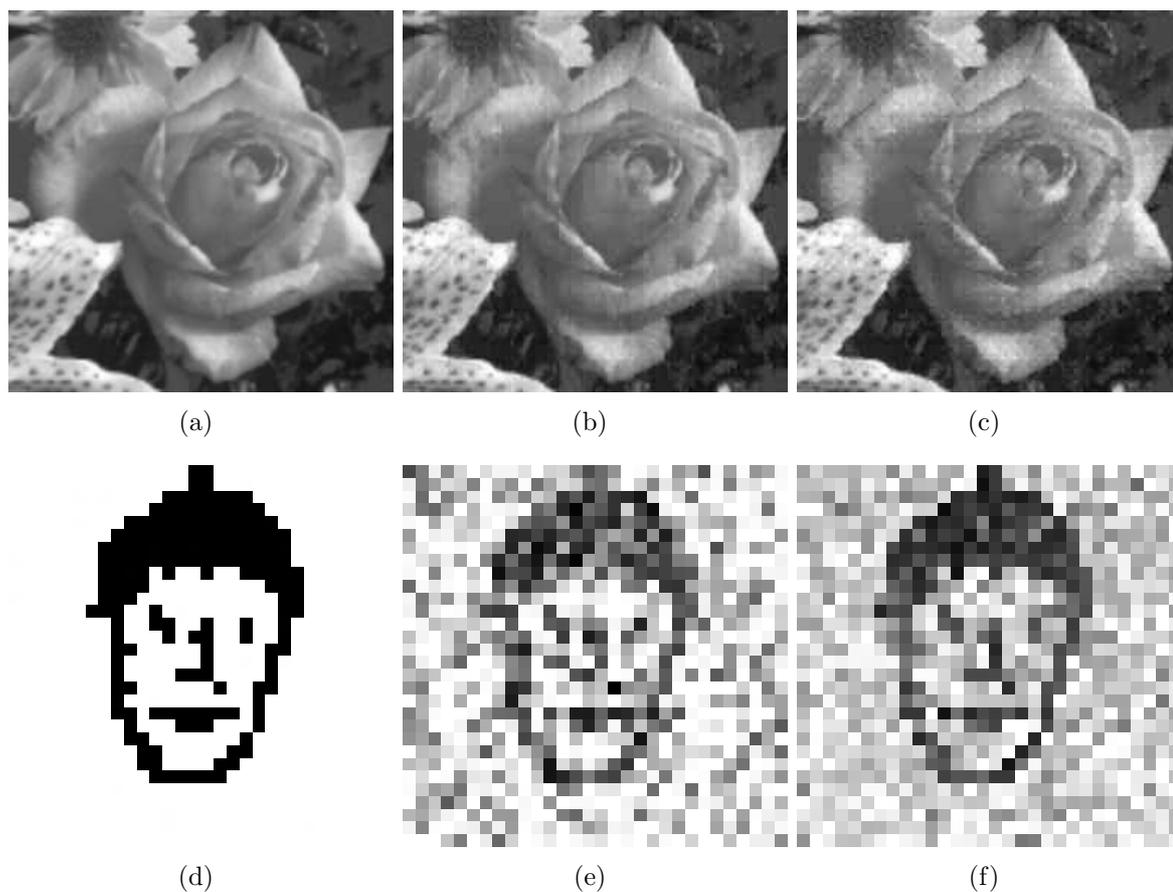


Figura 5.20: Formato JPEG 35%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 20$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 20$); (d) marca original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 20$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 20$).

Observa-se da aplicação do algoritmo proposto um aumento de aproximadamente 24% da correlação estatística da marca para $\alpha = 15$ comparado com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh para mesmo valor de α . Na Figura 5.21 pode-se visualizar melhor o contorno da marca do algoritmo proposto comparado à marca de Hsieh.

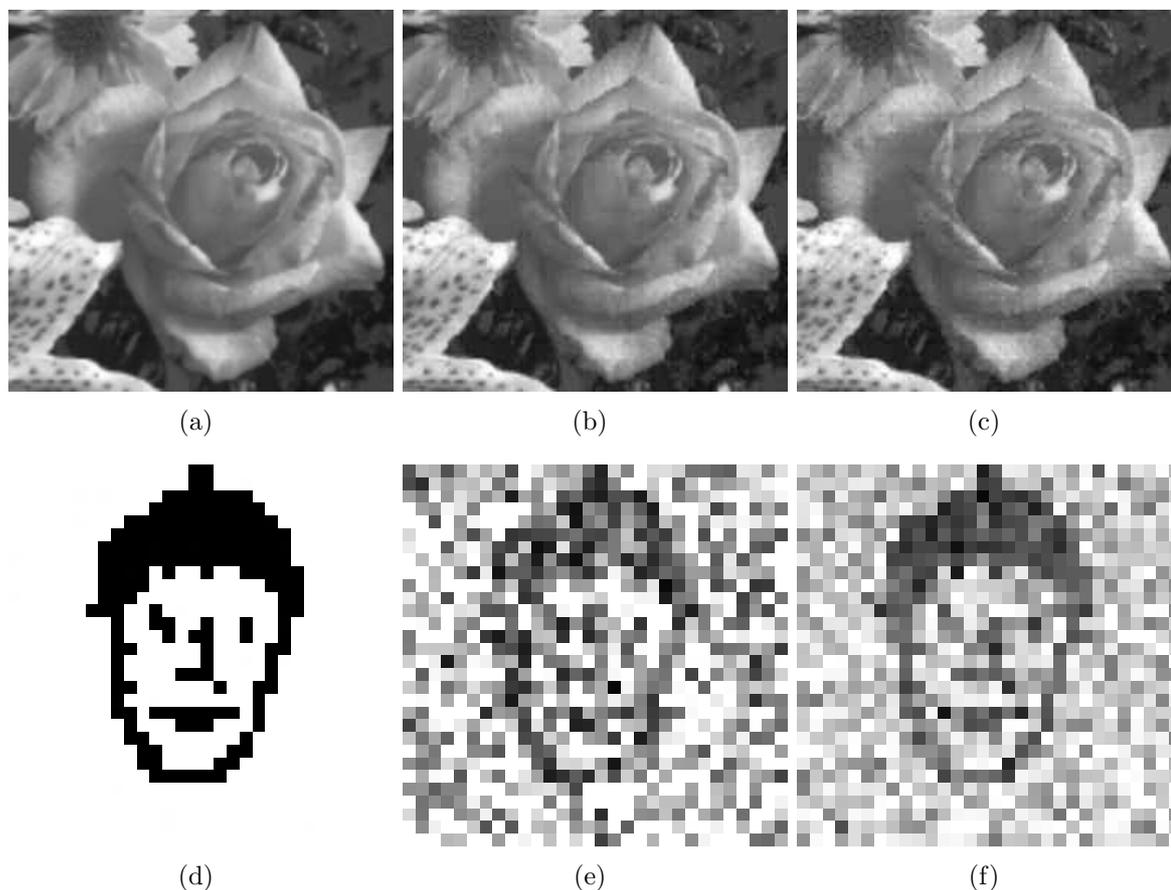


Figura 5.21: Formato JPEG 35%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 15$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 15$); (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 15$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 15$).

Resultados para JPEG 19% de qualidade

A correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água no formato JPEG 19% de qualidade, utilizando o algoritmo proposto, mostrados na Tabela 5.6 e no gráfico da Figura 5.22, demonstra o mesmo comportamento com relação ao algoritmo de Hsieh. Apresenta o maior resultado da correlação estatística para o valor de $\alpha = 1$ com correlação = 0,9965 e o menor resultado da correlação estatística para o valor de $\alpha = 100$ com correlação = 0,9092. Pode observar nessa tabela que a aplicação do algoritmo proposto diminuiu entre 1% e 3% a correlação estatística para todos os α 's testados comparados à aplicação do algoritmo de Hsieh.

A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a marca d'água

Tabela 5.6: Correlação estatística das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 19%.

α	JPEG Qualidade 19%			
	Imagem Hsieh	Marca Hsieh	Imagem Proposto	Marca Proposto
1	0,9965122	0,2008192	0,996507	0,337145
5	0,9964890	0,2138237	0,996370	0,362890
10	0,9961774	0,3063257	0,995719	0,433341
15	0,9959919	0,3375536	0,994907	0,523350
20	0,9953026	0,4933418	0,993272	0,641974
25	0,9943655	0,5691020	0,991244	0,713444
30	0,9938980	0,5958893	0,989078	0,763230
35	0,9925185	0,6534571	0,985852	0,802113
40	0,9915088	0,6899073	0,982636	0,836040
45	0,9902607	0,7316877	0,978863	0,867197
50	0,9882193	0,7936385	0,973661	0,896010
55	0,9872033	0,8145969	0,968456	0,912181
60	0,9843862	0,8560029	0,961043	0,925939
65	0,9812285	0,8944823	0,953592	0,937765
70	0,9797696	0,9036303	0,947768	0,945899
75	0,9763202	0,9310669	0,940887	0,955338
80	0,9743476	0,9417638	0,935705	0,957277
85	0,9720387	0,9468552	0,930157	0,959450
90	0,9685930	0,9535018	0,923111	0,960848
95	0,9670021	0,9556215	0,917348	0,960637
100	0,9462362	0,9632593	0,909267	0,957853

extraída utilizando o algoritmo proposto, mostrados na Tabela 5.6 e no gráfico da Figura 5.23, nota-se para α de 1 até 60, um aumento médio de 15% e para α superior a 60, um aumento médio de 3% da correlação estatística comparadas a aplicação do algoritmo de Hsieh e outros. Obteve-se o maior resultado para o valor $\alpha = 90$ com correlação = 0,9608, sendo esse α menor do que o $\alpha = 100$ com correlação = 0,9786 para o maior resultado obtido da aplicação do algoritmo de Hsieh. Pode-se observar na Figura 5.24, que o algoritmo proposto aumenta a nitidez da marca apesar do α ser menor, e conserva a transparência da imagem hospedeira, comparada à do algoritmo de Hsieh e outros.

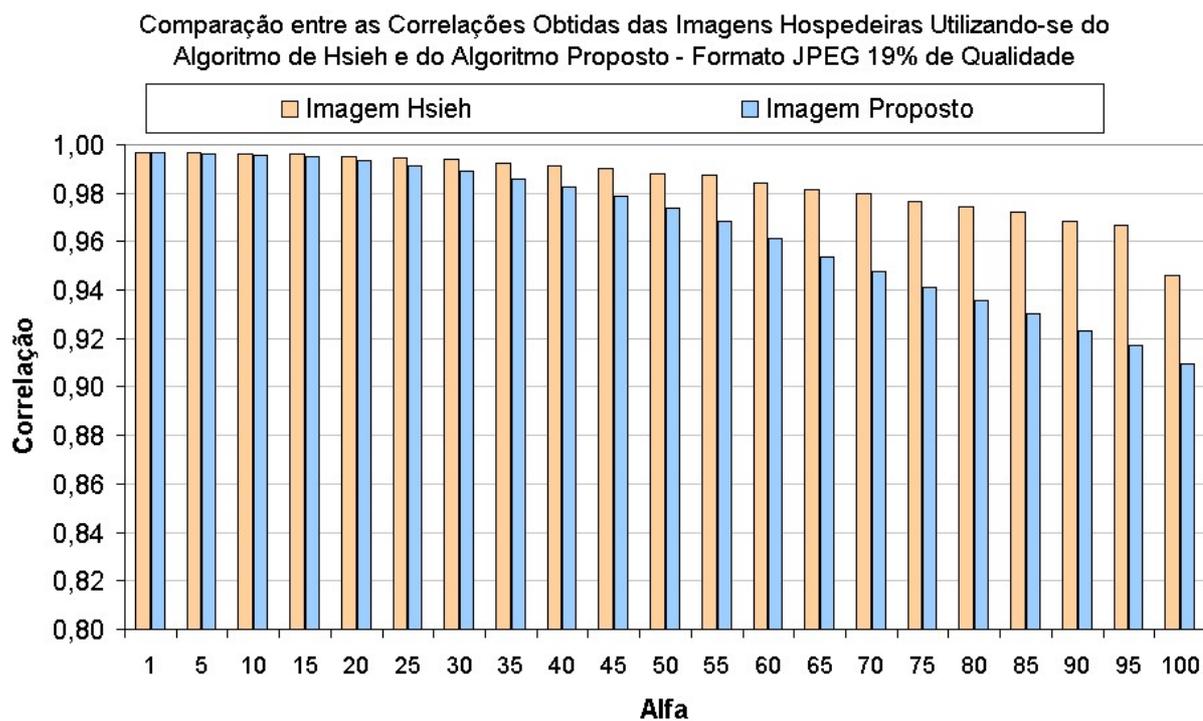


Figura 5.22: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 19% de qualidade.

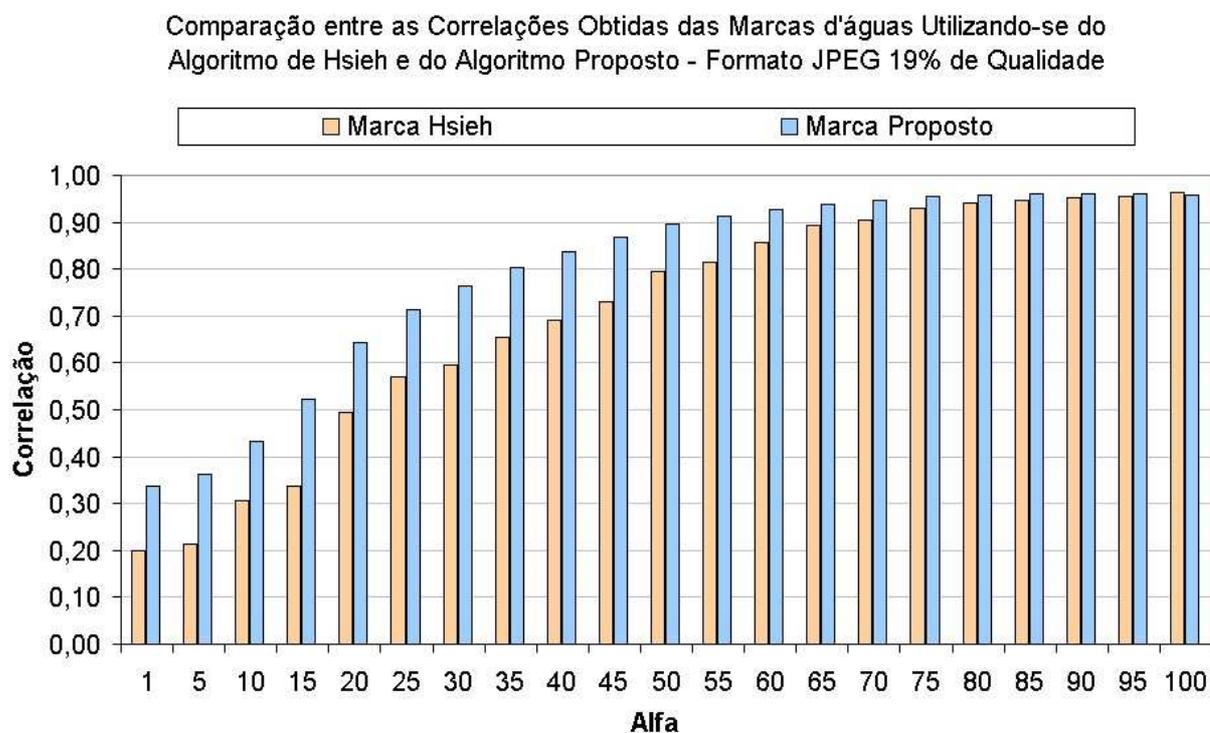


Figura 5.23: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 19% de qualidade.

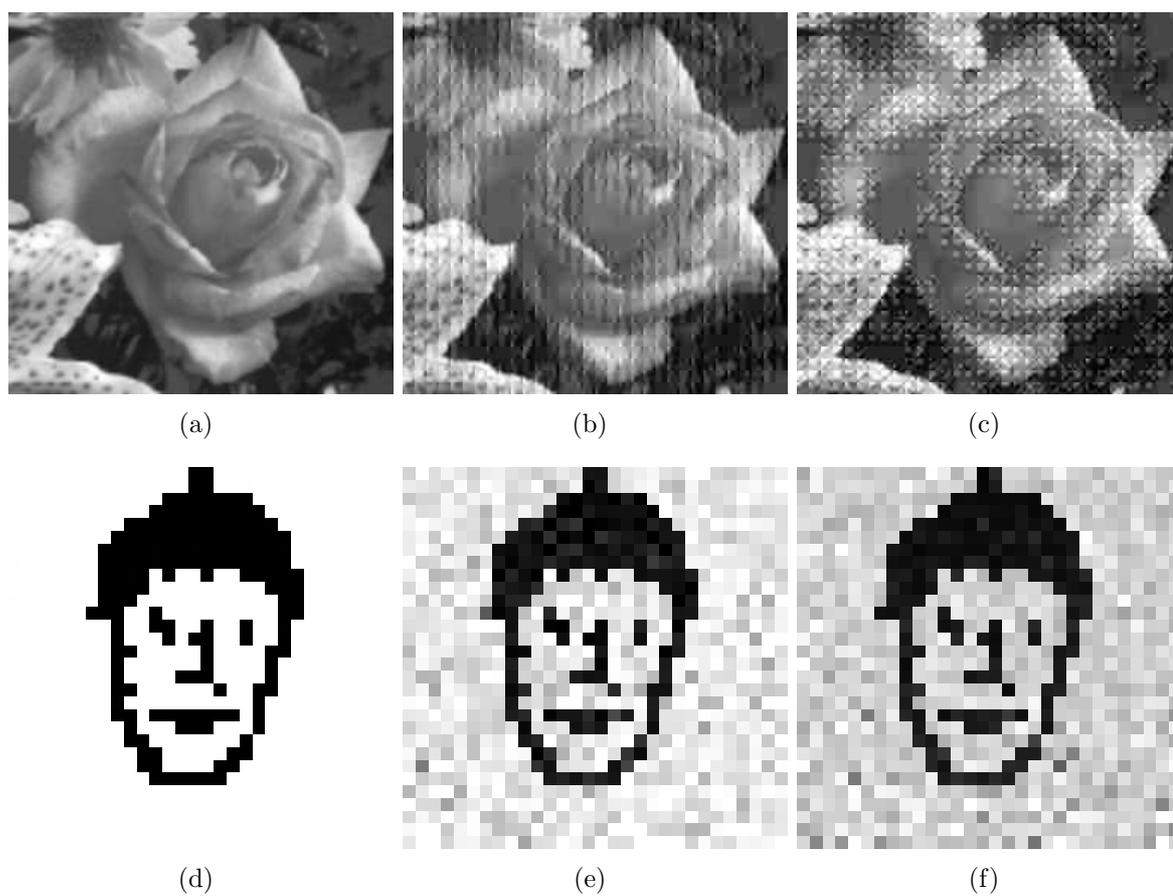


Figura 5.24: Formato JPEG 19%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 100$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 90$); (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 100$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 90$).

Quanto ao $\alpha = 20$ escolhido, da aplicação do algoritmo de Hsieh pela análise visual das imagens, como o melhor resultado que garante melhor transparência à imagem hospedeira e melhor nitidez à marca d'água, pode-se observar na Tabela 5.6 um aumento de aproximadamente 15% da correlação estatística da marca para o mesmo α para o algoritmo proposto. Este aumento pode-se verificar nas imagens da Figura 5.25, onde pode-se visualizar melhor o contorno da marca d'água do algoritmo proposto comparado à marca de Hsieh, além de manter a transparência da imagem hospedeira, comparada à do algoritmo de Hsieh e outros.

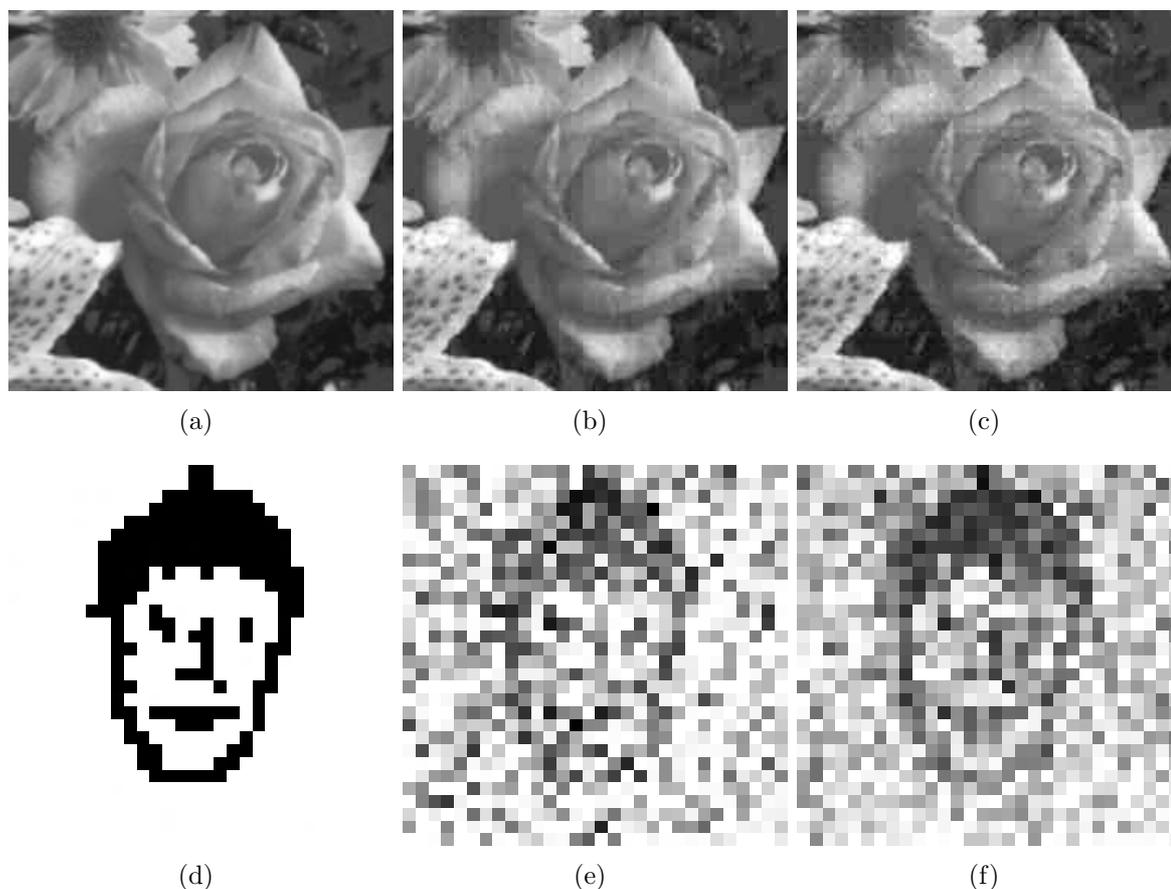


Figura 5.25: Formato JPEG 19%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 20$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 20$); (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 20$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 20$).

Resultados para JPEG 10% de qualidade

Os resultados da correlação estatística entre a imagem hospedeira original e a imagem hospedeira após a inserção da marca d'água no formato JPEG 10% de qualidade utilizando o algoritmo proposto, mostrados na Tabela 5.7 e no gráfico da Figura 5.26, demonstra o mesmo comportamento com relação ao algoritmo de Hsieh. Apresenta o maior resultado de correlação estatística para o valor de $\alpha = 1$ com correlação = 0,9920 e o menor resultado

da correlação estatística para o valor de $\alpha = 100$ com correlação = 0,9096. Pode-se observar nessa tabela que a aplicação do algoritmo proposto diminuiu de aproximadamente 1,5% em relação a correlação estatística para todos os α 's testados comparados com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros.

Tabela 5.7: Correlação estatística das imagens geradas pelo algoritmo de Hsieh e pelo algoritmo proposto no formato JPEG 10%.

α	JPEG Qualidade 10%			
	Imagem Hsieh	Marca Hsieh	Imagem Proposto	Marca Proposto
1	0,9920594	0,1389043	0,9920480	0,3785604
5	0,9920311	0,1460167	0,9919320	0,3892300
10	0,9917366	0,2076243	0,9913496	0,4226149
15	0,9915444	0,2246562	0,9905152	0,4573141
20	0,9909386	0,2667153	0,9891616	0,4831106
25	0,9900634	0,3651769	0,9874345	0,5396839
30	0,9896106	0,3887356	0,9857368	0,6072323
35	0,9884300	0,4611980	0,9829161	0,6479745
40	0,9875107	0,5101583	0,9802098	0,6933807
45	0,9865071	0,5420659	0,9770891	0,7211855
50	0,9847632	0,5863348	0,9732941	0,7333947
55	0,9839290	0,6011548	0,9694479	0,7585915
60	0,9816652	0,6433782	0,9642738	0,7841305
65	0,9792343	0,6735573	0,9581835	0,8020738
70	0,9780381	0,6777334	0,9529725	0,8175648
75	0,9794800	0,7177173	0,9463692	0,8372774
80	0,9727628	0,7317513	0,9407027	0,8481748
85	0,9704148	0,7432627	0,9341593	0,8666715
90	0,9666482	0,7758153	0,9260400	0,8799473
95	0,9647147	0,7804996	0,9187578	0,8906646
100	0,9394237	0,9172772	0,9096572	0,9026870

A correlação estatística entre a imagem da marca d'água inserida e a da marca d'água extraída, utilizando o algoritmo proposto, mostrados na Tabela 5.7 e no gráfico da Figura 5.27, obteve-se o maior resultado de correlação estatística para o valor de $\alpha = 100$ com correlação = 0,9026, sendo esse α igual ao do algoritmo de Hsieh com correlação = 0,9172. Apesar da correlação estatística do algoritmo proposto ser menor do que a do algoritmo de Hsieh, visualmente nota-se na Figura 5.28 melhor nitidez do contorno para o primeiro. Para os α 's de 1 a 95, observa-se nessa tabela um aumento da correlação estatística de 15% em média, pode-se visualizar mais nitidez dos contornos das marcas nas figuras apresentadas nesta sessão.

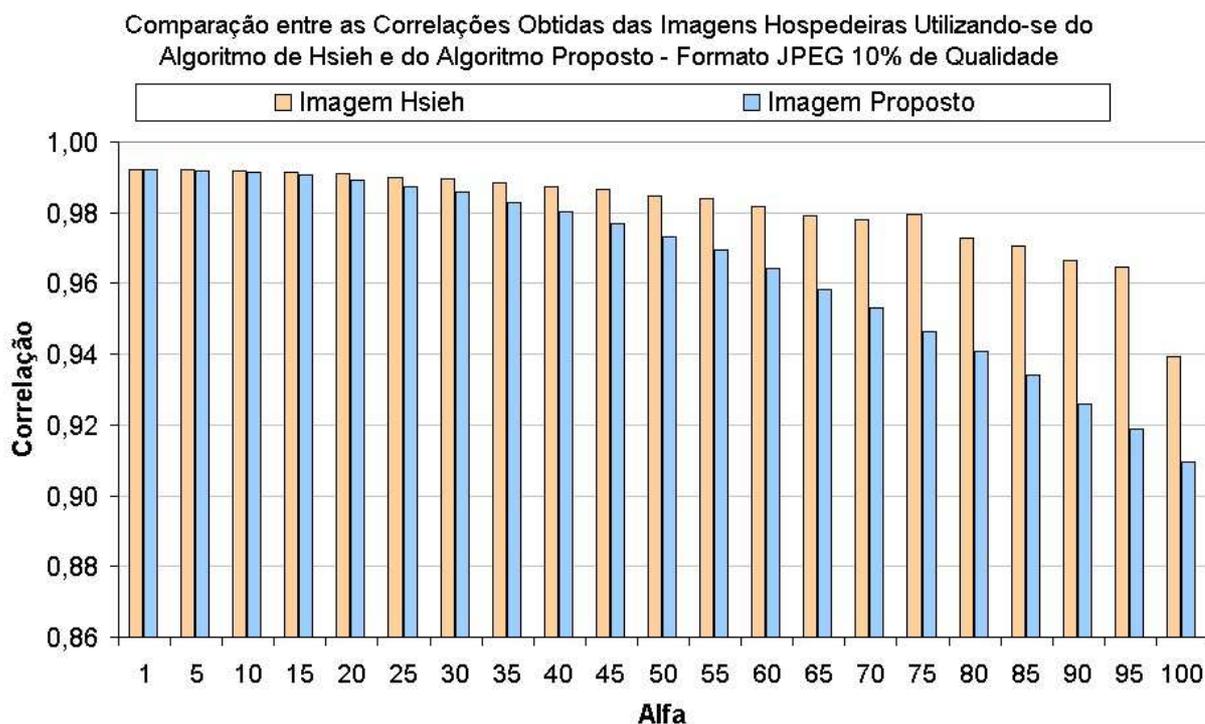


Figura 5.26: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 10% de qualidade.

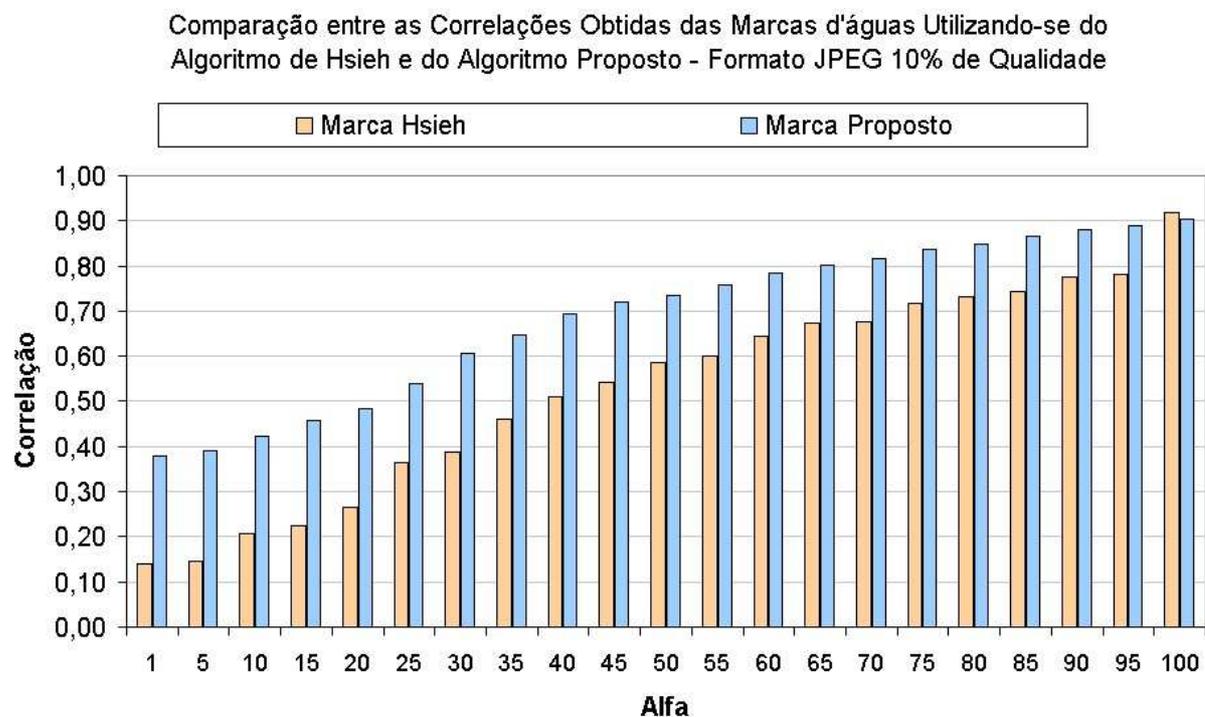


Figura 5.27: Resultado da comparação entre o algoritmo Hsieh e o algoritmo proposto para o formato JPEG 10% de qualidade.

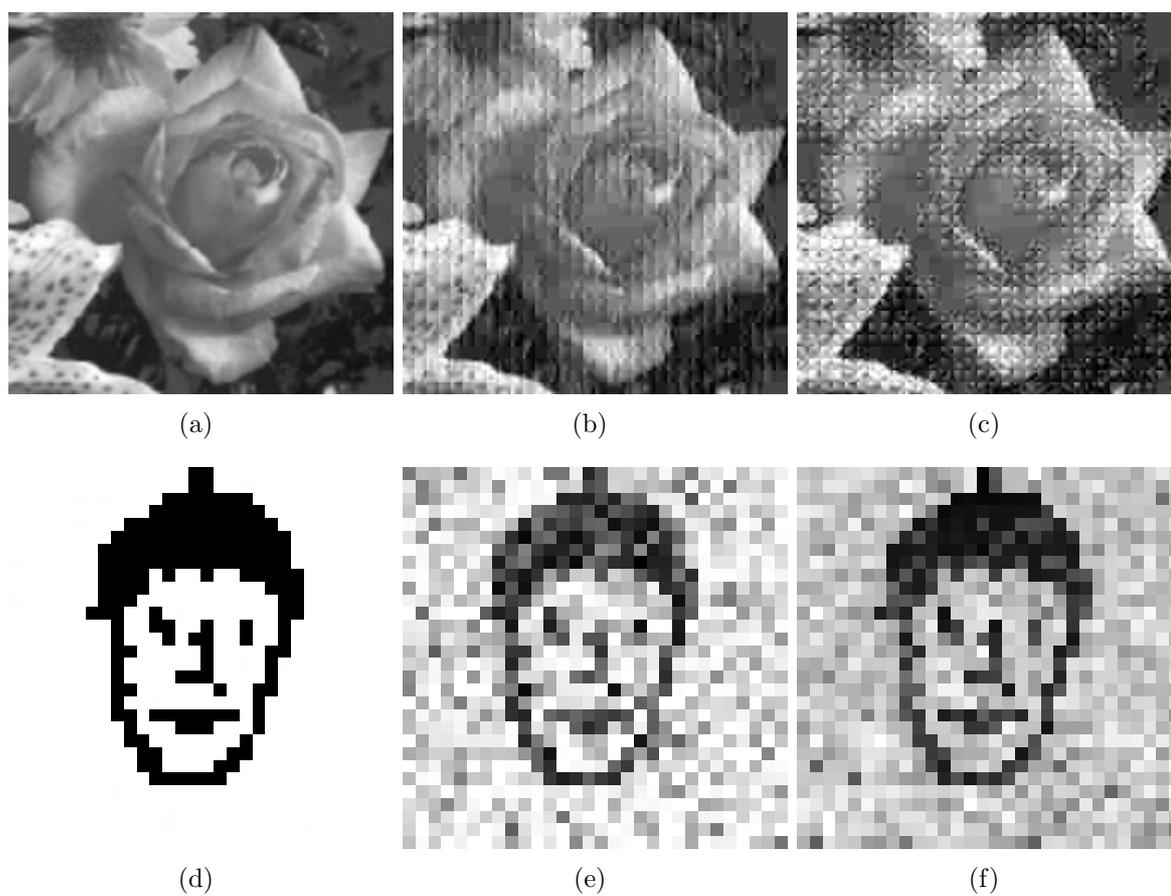


Figura 5.28: Formato JPEG 10%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 100$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 100$); (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 100$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 100$).

Pode-se observar da aplicação do algoritmo proposto um aumento de aproximadamente 165% da correlação estatística para o valor de $\alpha = 5$ comparado com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh para o mesmo valor de α , mostrado na Figura 5.29, onde constata-se que esse aumento pouco contribui para melhorar a visualização da marca d'água.

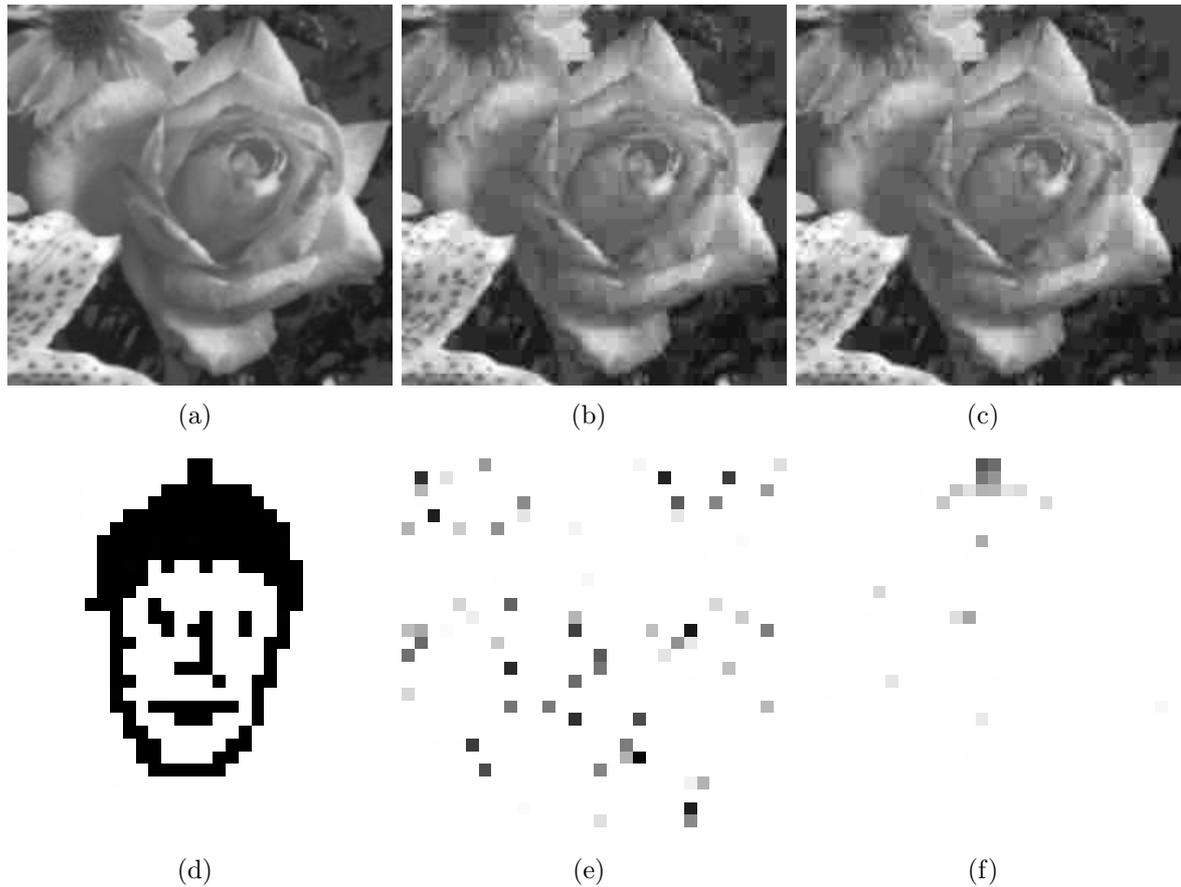


Figura 5.29: Formato JPEG 10%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 5$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 5$); (d) marca d'água original; (e) marca Hsieh ($\alpha = 5$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 5$).

Pode-se observar na Tabela 5.7, que existe um aumento da correlação estatística para os valores de $\alpha = 10, 15, 20, 30$ de aproximadamente 55% a 100% da aplicação do algoritmo proposto comparado com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros para os mesmos valores de α . As Figuras 5.30 e 5.31, mostram as imagens para $\alpha = 15$ e $\alpha = 30$ respectivamente. Nota-se melhor nitidez na marca d'água do algoritmo proposto e a mesma transparência na imagem hospedeira comparadas às do algoritmo de Hsieh e outros para $\alpha = 30$.

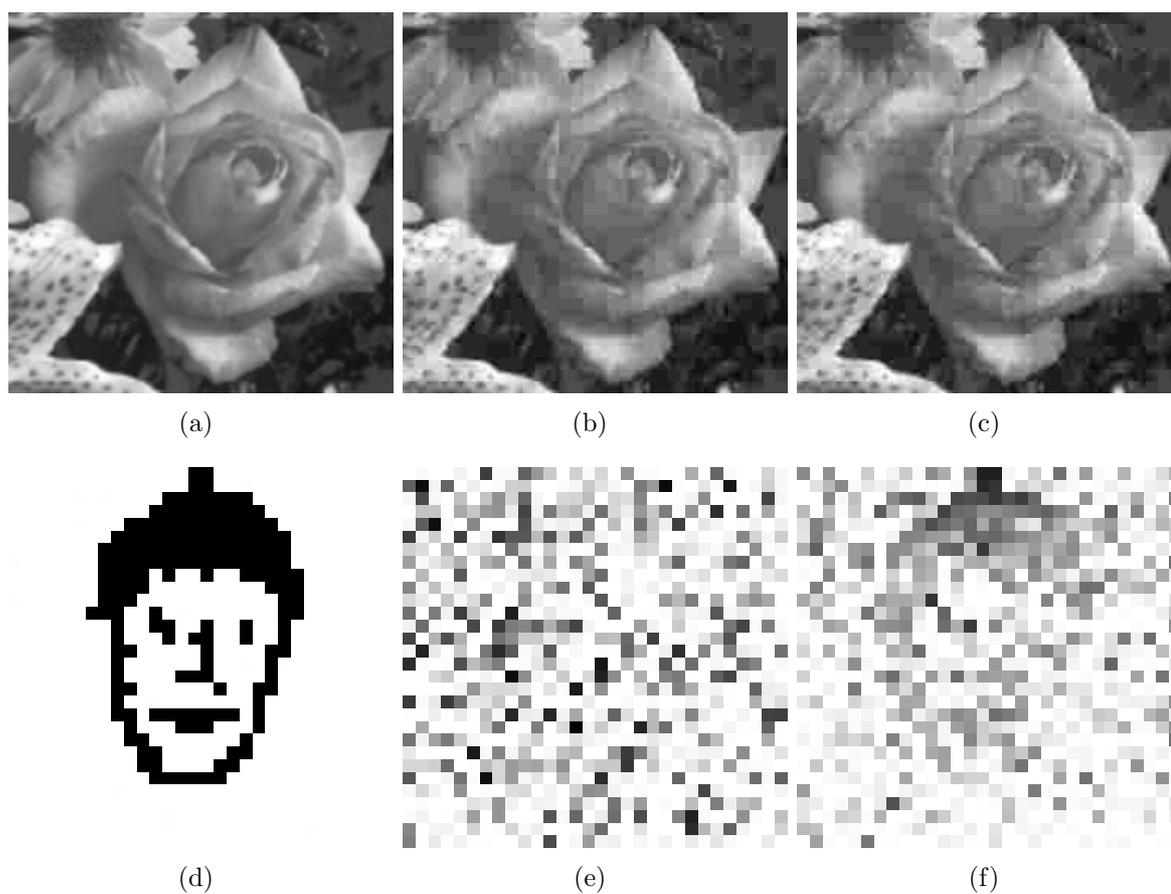


Figura 5.30: Formato JPEG 10%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 15$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 15$); (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 15$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 15$).

No maior nível de compactação testado, isto é, o nível de qualidade de 10%, observa-se uma superioridade notória do algoritmo proposto, mantendo um percentual de correlação estatística bem acima do algoritmo de Hsieh e outros. Portanto, os experimentos indicam que para maiores níveis de compactação o algoritmo proposto é melhor do que o algoritmo de Hsieh para o processo de recuperação da marca d'água.

Com o objetivo de facilitar a análise visual e a efetividade do algoritmo proposto, é apresentado a seguir as Figuras 5.31 até 5.36, outros resultados obtidos para esse nível

de compactação, sendo que em todas elas pode-se perceber a melhor performance do algoritmo proposto.

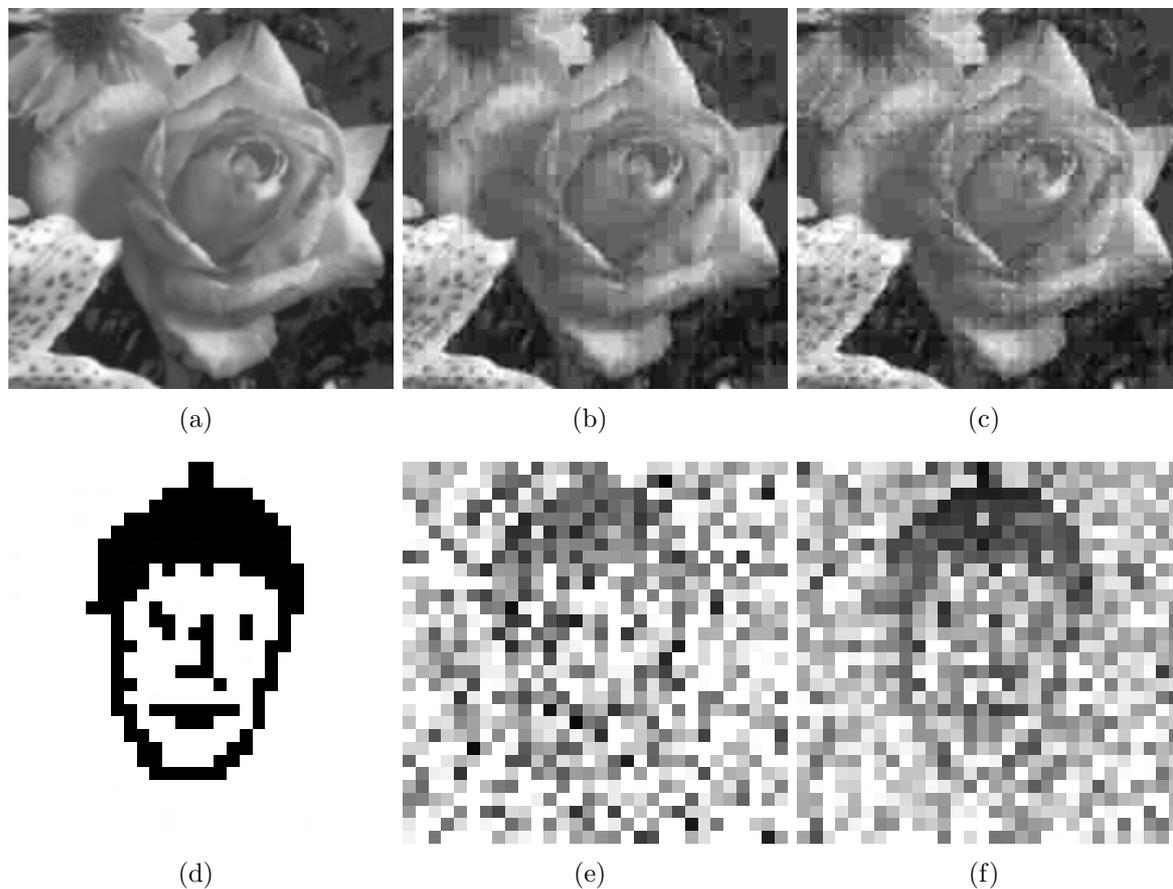


Figura 5.31: Formato JPEG 10%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 30$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 30$); (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 30$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 30$).

Pode-se observar na Tabela 5.7 que existe um aumento da correlação estatística para os valores de $\alpha = 35, 40, 45$, de aproximadamente 36% da aplicação do algoritmo proposto comparado com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros para os mesmos valores de α . A Figura 5.32, mostra as imagens para $\alpha = 45$ e nota-se melhor nitidez na marca do algoritmo proposto e a mesma transparência na imagem hospedeira comparadas às algoritmo de Hsieh e outros.

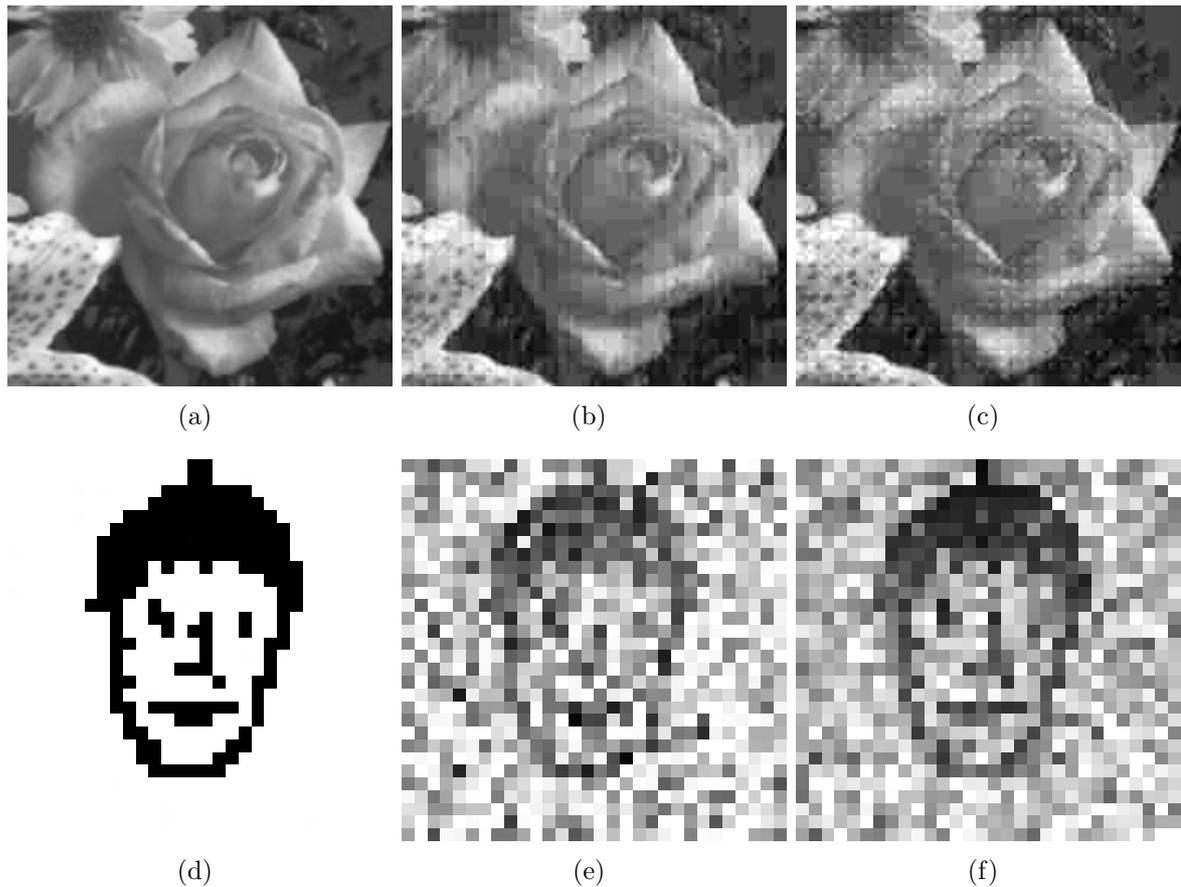


Figura 5.32: Formato JPEG 10%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 45$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 45$); (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 45$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 45$).

Pode-se observar na Tabela 5.7 que existe um aumento da correlação estatística para os valores de $\alpha = 50, 55, 60, 65$ e 70 , de aproximadamente 19% a 25% da aplicação do algoritmo proposto comparado com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros para os mesmos valores de α . As Figura 5.33 e 5.35 mostram as imagens para $\alpha = 55$ e $\alpha = 7,0$ respectivamente, onde esse último é considerado o α intermediário do algoritmo de Hsieh e outros. Comparando-os nota-se melhor nitidez da marca d'água do algoritmo proposto e a marca d'água hospedeira menos transparente.

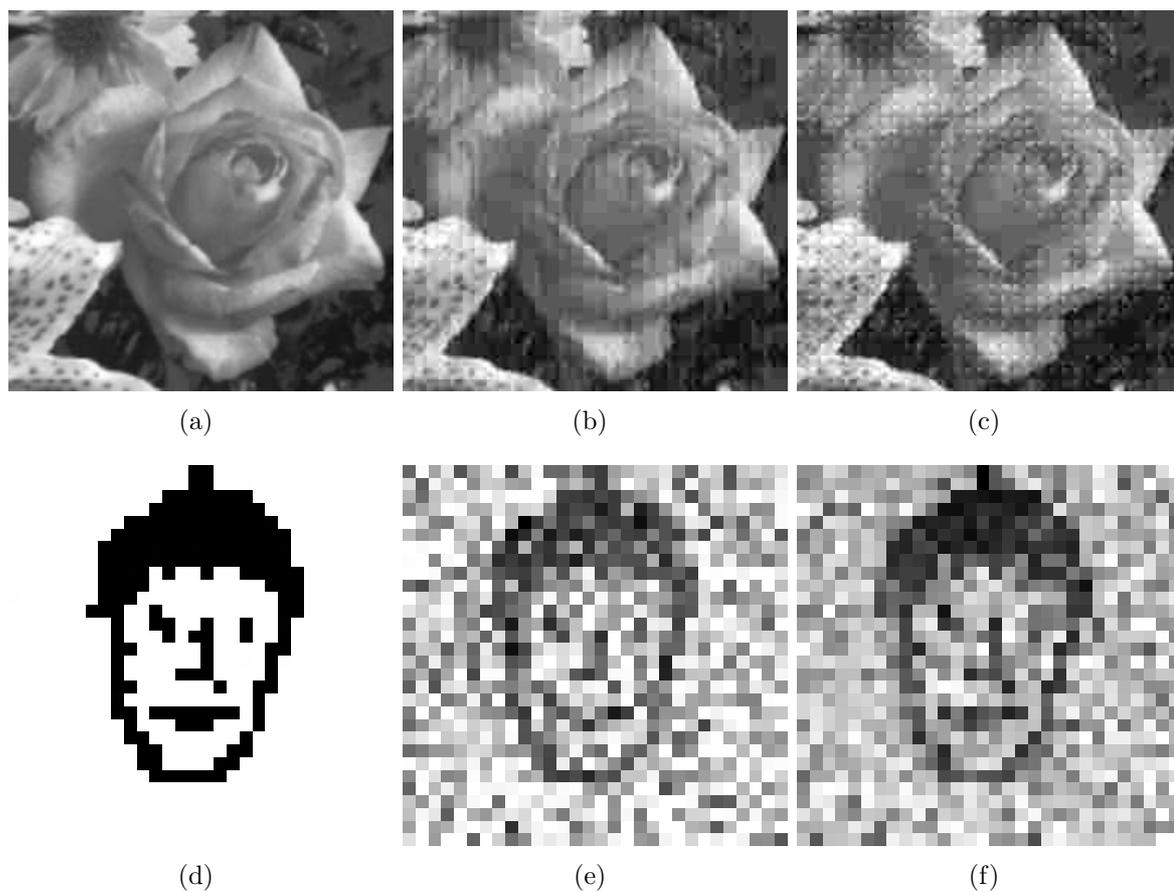


Figura 5.33: Formato JPEG 10%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 55$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 55$);(d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 55$); (f) marca do algoritmo proposto($\alpha = 55$).

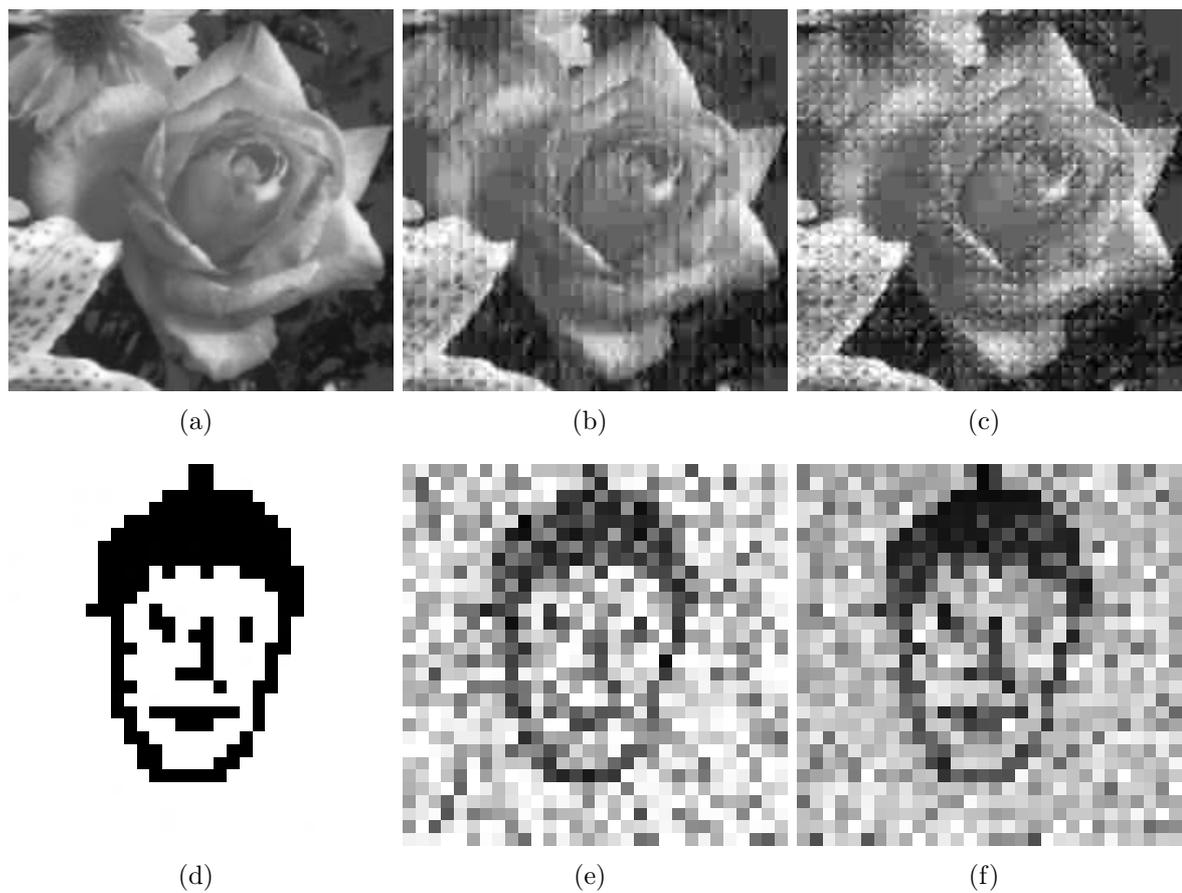


Figura 5.34: Formato JPEG 10%: (a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 70$); (c) rosa do algoritmo proposto $\alpha = 70$; (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 70$); (f) marca do algoritmo proposto ($\alpha = 70$;).

Pode-se observar também pela Tabela 5.7 que existe um aumento da correlação estatística para os valores de $\alpha = 75, 80, 85, 90$ e 95 , de aproximadamente 14% a 17% da aplicação do algoritmo proposto comparado com a correlação estatística da aplicação do algoritmo de Hsieh e outros para os mesmos valores de α . As Figuras 5.35 e 5.36 mostram as imagens com $\alpha = 80$ e $\alpha = 95$ respectivamente, nota-se melhor nitidez da marca d'água do algoritmo proposto e a mesma transparência da imagem hospedeira comparadas a do algoritmo de Hsieh e outros.

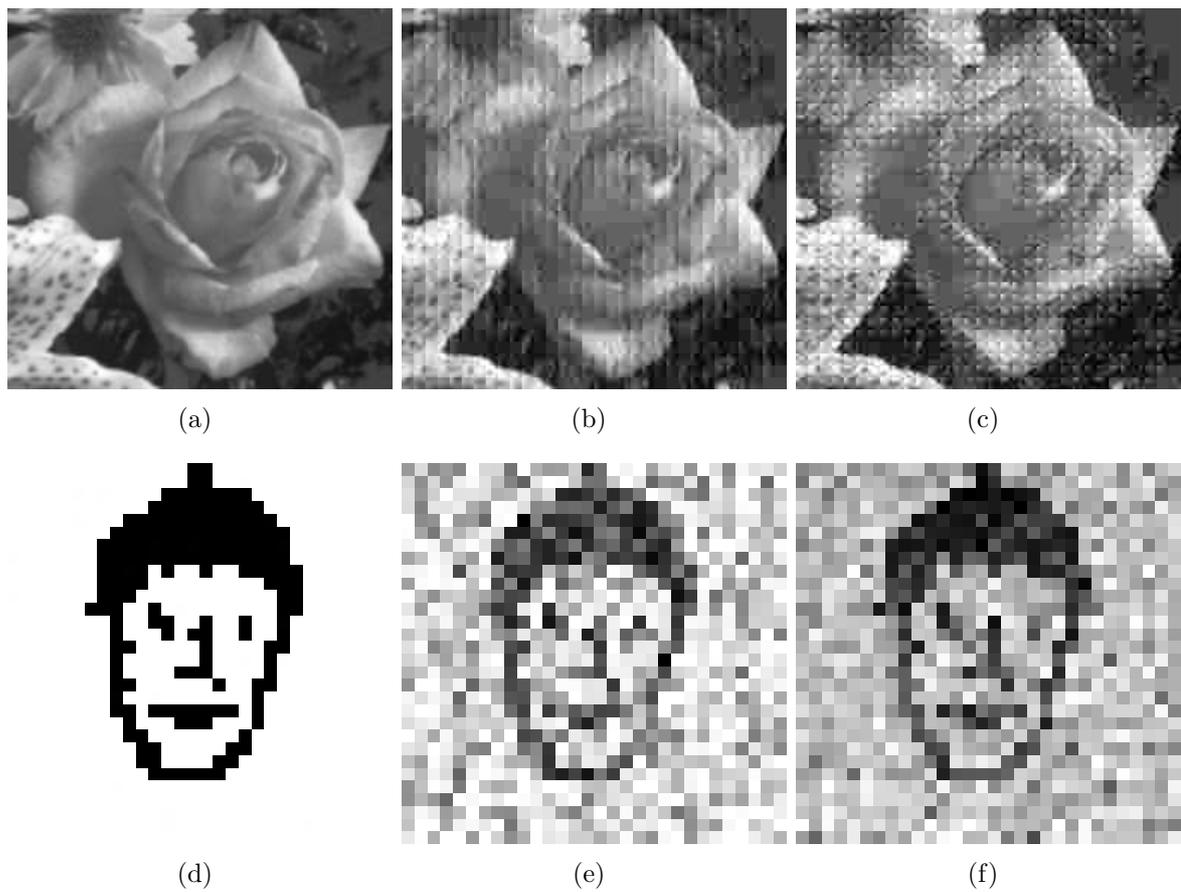


Figura 5.35: Formato JPEG 10%: a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 80$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 80$);(d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 80$); (f) marca do algoritmo proposto($\alpha = 80$).

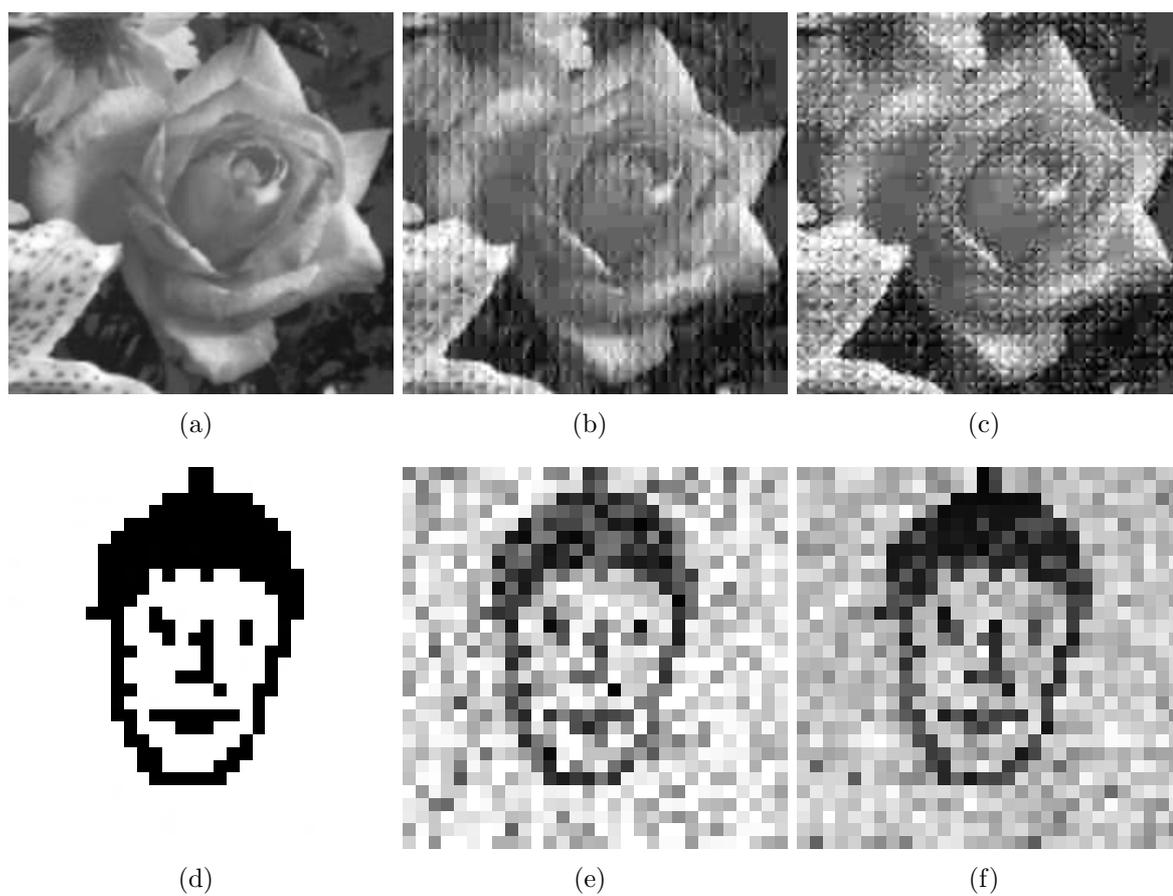


Figura 5.36: Formato JPEG 10%: a) rosa original; (b) rosa de Hsieh ($\alpha = 95$); (c) rosa do algoritmo proposto ($\alpha = 95$); (d) marca d'água original; (e) marca de Hsieh ($\alpha = 95$); (f) marca do algoritmo proposto($\alpha = 95$).

5.3.1 Conclusões dos testes utilizando o algoritmo proposto

Este capítulo apresentou o algoritmo proposto neste trabalho que aumenta o nível de redundância da marca d'água nas sub-bandas da decomposição *wavelets* com o objetivo de recuperar a marca d'água com maior qualidade. Utilizou-se o algoritmo de Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001) como base da criação do algoritmo proposto, comparando-se os resultados obtidos pelo algoritmo proposto ao algoritmo de Hsieh.

Pode-se observar nos resultados obtidos neste capítulo que quanto maior é o nível de compactação da imagem hospedeira, após a inserção da marca d'água, maior é a diferença entre os resultados obtidos pelos dois algoritmos, principalmente nas imagens com 62%, 35%, 19% e 10% de qualidade, demonstrando sempre uma vantagem para o algoritmo proposto neste trabalho.

Observa-se também que com o algoritmo proposto, para imagem fortemente compactadas, é possível utilizar α 's menores, tornando a imagem hospedeira menos degradada.

Assim, pelas análises feitas e comentadas no decorrer deste capítulo, pode-se concluir que a abordagem proposta neste trabalho trouxe uma melhoria real ao algoritmo base utilizado, podendo ser utilizado com maior vantagem para situações em que a imagem hospedeira é armazenada de forma compactada e com perdas.

O capítulo seguinte apresenta mais conclusões com relação ao trabalho como um todo, contextualizando melhor as aplicabilidade da melhoria obtida neste trabalho.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Introdução

As análises realizadas no capítulo 5 desta dissertação demonstram que a melhoria proposta para o algoritmo de Hsieh e outros (Hsieh; Tseng; Huang , 2001), propiciou para a marca d'água recuperada e para a imagem hospedeira compactada maior correlação estatística para os níveis maior de compactação. Pôde-se observar também que a imagem hospedeira não teve a sua qualidade visual significativamente alterada com a melhoria proposta, pois o fato de se utilizar um valor menor para o α (coeficiente de atenuação da marca d'água), propiciou uma melhor visualização da imagem hospedeira.

Desta forma, os experimentos e a análise demonstram conclusivamente que a melhoria proposta no algoritmo permite uma melhor manipulação de marca d'água digital para imagens compactadas, notadamente para as imagens no formato JPEG.

6.2 Objetivos Gerais, Específicos e Hipóteses

Com relação aos objetivos definidos para este trabalho, foram realizados os estudos sobre marca d'água digital, sobre a teoria de *wavelets* e que tais embasamentos teóricos permitiram que se propusesse uma melhora efetiva no processo de armazenamento/recuperação da marca d'água digital em imagens compactadas. Assim, conclui-se que o objetivo geral deste trabalho foi alcançado.

Quanto aos objetivos específicos, conclui-se que também foram atingidos devido à realização dos estudos previstos e também devido a se ter atingido uma melhora no processo de inserção/remoção de marca d'água digital em imagens digital, melhora obtida através do aumento da redundância de informações da marca d'água digital na imagem. Finalmente, o último objetivo específico, a construção das aplicações para realização dos experimentos, foi atingido com o trabalho e demonstrou que a melhoria proposta real-

mente proporcionou um aumento de qualidade na marca d'água recuperada.

Quanto às hipóteses, o aumento da redundância das informações da marca d'água nas sub-bandas *wavelets* permite, para imagens fortemente compactadas, a recuperação desta com melhor nível de qualidade, demonstrando que a hipótese básica deste trabalho é verdadeira.

A obtenção de valores de correlação estatística semelhantes ao método original, mas com valores de α reduzidos, demonstra também que a hipótese secundária deste trabalho também é verdadeira.

6.3 Considerações Finais

A utilização da teoria de *wavelets* permitiu que uma marca d'água fosse recuperada de uma imagem hospedeira compactada com significativo nível de qualidade. Concluiu-se a partir disso que a *Discrete Wavelet Transform* (DWT) detecta os pontos de maior concentração de energia de maneira semelhante que a *Discrete Cosine Transform* (DCT). Tal fato abre espaço para novos trabalhos futuros, mas demonstra também a efetividade da teoria de *wavelets*.

O método aprimorado neste trabalho pode ser utilizado para situações em que a imagem a ser marcada tiver que ser compactada com perdas, pois foi em tais situações que os testes demonstraram uma significativa superioridade com relação ao método base utilizado neste trabalho.

Essa melhoria acentuada identificada para imagens compactadas com perdas é a maior contribuição deste trabalho, abrindo a possibilidade de aplicação das marcas d'água digitais para imagens com baixa resolução no formato JPEG e evitando, por exemplo, que se publiquem imagem falsas em jornais.

Observou-se na análise dos experimentos realizados que parâmetros como a análise visual podem ser subjetivos para se concluir a cerca da efetividade do método. Por outro lado, medidas quantitativas como a correlação estatística, também mostrou-se não ser adequada para esse tipo de análise. As medidas utilizadas, análise visual e correlação estatísticas, em algumas situações, mostraram-se até divergentes com relação ao resultado quantitativos e o qualitativo, obtido da observação. Assim, cabe a consideração final deste trabalho, de que medidas que contemplam resultados quantitativos e qualitativos de maneira coerente devem ser buscados para a realização de uma análise, permitindo

resultados mais confiáveis e conclusivos dos experimentos realizados.

6.4 Sugestão de Trabalhos Futuros

1. Estudo da transformada de cosseno (DCT) com a finalidade de permitir um mapeamento do que são os coeficientes importantes nessa transformada com os coeficientes importantes na transformada *wavelets*, trazendo assim maior robustez para o método proposto;
2. Realização de novos experimentos visando determinar melhor a influência da utilização de determinadas sub-bandas na deterioração da imagem hospedeira. Desta forma pode ser possível obter resultados também significativos na recuperação da marca d'água digital, mas deteriorando menos a imagem hospedeira, e;
3. Desenvolvimento de uma pesquisa com a finalidade de avaliar o conforto visual dos ruídos gerados na imagem hospedeira pelas duas abordagens.

Referências

- Burnett, S. *Criptografia e Segurança: Guia Oficial RSA*. Rio de Janeiro: ed.Campus, 2002.
- Coatrieux, G.; Sankur, B.; Rolland, R. Relevance of Watermarking in Medical Imaging. In: . [S.l.: s.n.].
- Cody, M. A. The fast Wavelet Transform Beyond Fourier Transforms. In: *Dr. Dobb's Journal*. 1992. vol. 17, n^o. 4.
- Cohen, A.; Daubechies, I.; Feauveau, J. Biorthogonal bases of compactly support Wavelets. In: *Communications on Pure and Applied Mathematics*. 2000. vol. 45, pp. 485–560.
- Cohen, M. F. et al. Wavelets and Their Applications in Computer Graphics. In: *SIBGRAPH 95 Conference*. 1995.
- Daubechies, I. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets. In: *Communications on Pure and Applied Mathematics*. 1988. vol. 41, pp. 909–996.
- Deepthi, A.; Nirajan, U. C. Watermarking Medical Images With Patient Information. In: *IEEE*. 1998. vol. 20, n^o. 2, pp. 703–706.
- EDWARDS, T. Discrete Wavelet Transform: Theory and Implementation. In: *Tech. Rep.* 1991.
- Fridrich, J.; M., G.; Du, R. Reliable Detection of LSB Steganography in Grayscale and Color Images. In: *Proc. ACM, Special Session on Multimedia Security and Watermarking*. 2001. pP. 27–30.
- Friedman, G. L. The Trustworthy Digital Camera: Restoring Credibility to the Photographic Image. In: *IEEE T. Consumer Electronics*. 1993. vol. 39, pp. 905–910.
- Gomes, J.; Velho, L.; Goldenstein, S. Wavelets: Teoria, Software e Aplicações. In: *Instituto de Matemática Pura e Aplicada*. 1997. pp. 20–46.
- Gonzalez, R.; Woods, R. *Processamento de Imagens Digitais*. NJ: Prentice Hall: Upper Saddle River, 2000.
- Graps, A. An Introduction to Wavelets. In: *IEEE Computational Science and Engineering*. 1995. vol. 2, n^o. 2.
- Hsieh, M.-S.; Tseng, D.; Huang, Y.-H. Hiding Digital Watermarks Using Multiresolution Wavelet Transform. In: *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2001. vol. 48, n^o. 5, pp. 875–882.

- Jawerth, B.; Sweldens, W. An Overview of Wavelet Based Multiresolution Analysis. In: *SIAM Rev.* 1994. vol. 36, n.º. 3, pp. 377–412.
- Jerome, M. Embedded Image Coding Using Zerotree of Wavelet Coefficients. In: *IEEE*. 1993. vol. 41, n.º. 12, pp. 3445–3462.
- Joint Photographic Experts Group. *JPEG*. Website: <http://www.jpeg.org>, Acesso em: 05/04/2006.
- Kim, H. Y. *Projeto de Operadores pela Aprendizagem, Difusão Anisotrópica e Marca d'água de Autenticação*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, 2002.
- Kong, X.; Feng, R. Watermark Medical Signal for Telemedicine. In: *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 2001. vol. 5, n.º. 3, pp. 195–201.
- Langelaar, G. C.; Setyawan, I.; Lagendijk, R. *Watermarking Digital Image and Video Data*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
- Langelaar, G. C.; Setyawan, I.; Lagendijk, R. Watermarking Digital Image and Video Data - A State-of-the-Art Overview. In: *IEEE Signal Processing Magazine*. 2000. vol. 1, n.º. 1053, pp. 20–46.
- Mallat, S. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. In: *IEEE Transaction on Analysis and Machine Intelligence*. 1989. vol. 11, n.º. 7, pp. 674–693.
- Marcondes, C. A. *HTML 4.0 Fundamental: A Base da Programação para WEB*. São Paulo: Érica, 2005.
- MathWorks, I. T. *MATLAB Version 6.0*. 2004. Copyright 1985,2000.
- Podilchuk, C. I.; Delp, E. Digital Watermarking: Algorithms and Applications. In: *IEEE Signal Processing Magazine*. 2001. vol. 1, n.º. 1, pp. 33–46.
- POLIKAR, R. The Wavelet Tutorial. In: *Iowa State University, Ames, IA*. 1998.
- Prasad, L.; Iyengar, S. S. *Wavelet Analysis with Applications to Image Processing*. New York: CRC Press, 1997.
- Ramaswamy, V. N. Lossless Compression Using Wavelet Decomposition. In: *Ph.D. thesis, University of South Florida, Departamento of Computer Science and Engineering*. Florida: [s.n.], 1998.
- Schyndel, R.; Tirkel, A.; Osborne, C. Digital Watermark. In: *IEEE Potential*. 1994. vol. 1, n.º. 1, pp. 86–90.
- Stollnitz, E. J.; DeRos, T. D.; Salesin, D. H. Wavelets for Computer Graphics: A Primer. In: *IEEE Computer Graphics and Applications*. 1995. vol. 15, n.º. 3, pp. 76–84.
- Sweldens, W.; Piessens, R. Wavelet Sampling Techniques. In: *Proceedings of the Statistical Computing Section*. 1993. pp. 20–29.

- Tay, P.; Havlicek, J. P. Image Watermarking Using Wavelets. In: *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2002. pp. 258–261.
- Tem, C.; Choomchuay, S.; Lasakul, A. A Robust Image Watermarking Using Multiresolution Analysis of Wavelet. In: *Proceedings of ISCIT - IEEE*. 2005. pp. 603–606.
- Villasenor, J. D.; Belzer, B.; Liao, J. Wavelet Filter Evaluation for Image Compression. In: *IEEE Transactions on Image Processing*. 1995. vol. 2, pp. 1053–1060.
- Vleeschouwer, C.; Delaigle, J. F. Invisibility and Application Functionalities in Perceptual Watermarking - An Overview. In: *IEEE*. 2002. vol. 90, n.º. 1, pp. 64–77.
- Wei, Z.; Qin, P.; Fu, Y. Perceptual Digital Watermark of Images Using Wavelet Transform. In: *IEEE*. 1998. vol. 44, n.º. 4, pp. 1267–1272.
- Wong, P. W. A Watermark for Image Integrity and Ownership Verification. In: *IS eT PIC Conference*. 1997. pp. 97–72.
- Wu, M.; Liu, B. Data Hiding in Digital Binary Image. In: *IEEE Int. Conf. Multimedia and Expo*. New York, USA: [s.n.], 2000.
- Yang, S.-H. Filter Evaluation for DWT-Domain Image Watermarking. In: *Electronics Letters Online*. 2003. vol. 39, n.º. 24, pp. 4–5.
- Yeung, M. M.; Mintzer, F. An Invisible Watermarking Technique for Image Verification. In: *IEEE Int. Conf. Image Processing*. 1997. vol. 1, pp. 680–683.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)