UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**COMPARAÇÃO DA TRANSFORMADA *WAVELET*
DISCRETA E DA TRANSFORMADA DO COSSENO,
PARA COMPRESSÃO DE IMAGENS DE IMPRESSÃO
DIGITAL**

NILVANA DOS SANTOS REIGOTA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a.Dr^a. Maria Stela Veludo de Paiva.

São Carlos
2007

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela a graça e saúde, e força, para fazer este trabalho.

A minha família que sempre me incentivou.

A minha orientadora Maria Stela Veludo de Paiva que teve muito trabalho para me orientar, gostaria de registrar aqui a maneira delicada, generosa, e pertinente de sua orientação na condução dessa dissertação.

Aos meus queridos, amigos que me traz mensagens de encorajamento todos os dias.

Às Igrejas Batistas da Lagoinha em São Carlos e a Quadrangular em Assis pelas ajudas nas orações e suplicas para eu conseguir esta vitória.

À Universidade de São Paulo por colocar à minha disposição sua estrutura. Aos meus amigos do Laboratório de Visão Computacional (LAVI), em especial à Deise Mota Alves pelas ajudas, explicações e incentivos. Aos amigos dos outros laboratórios como o Everton Silva Fonseca pelas explicações de *Wavelet*, e Gildson Jesus pelas explicações matemáticas.

Sou grato aos funcionários da graduação e pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC - USP, e aos professores da pós-graduação.

Resumo

REIGOTA N.S. (2006) *Comparação da transformada Wavelet discreta e da transformada do Cosseno*, para compressão de imagens de impressão digital. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Carlos, 2006.

Este trabalho tem por objetivo comparar os seguintes métodos de compressão de imagens de impressão digital: Transformada Discreta do Cosseno (DCT), Transformada de *Wavelets* de *Haar*, Transformada de *Wavelets* de *Daubechies* e Transformada de *Wavelets* de Quantização Escalar (WSQ). O propósito da comparação é identificar o método que resulta numa menor perda de dados, para a maior taxa de compressão possível. São utilizadas as seguintes métricas para avaliação da qualidade da imagem para os métodos: erro quadrático médio (ERMS), a relação sinal e ruído (SNR) e a relação sinal ruído de pico (PSNR). Para as métricas utilizadas a DCT apresentou os melhores resultados, seguida pela WSQ. No entanto, o melhor tempo de compressão e a melhor qualidade das imagens recuperadas avaliadas pelo software “GrFinger 4.2”, foram obtidos com a técnica WSQ.

Palavra – chave: compressão de imagens, impressão digital, DCT, *Wavelet* de *Haar*, qualidade da imagem, *RMSE*, *SNRms* e *PSNR*.

Abstract

This research aims to compare the following fingerprint image compression methods: the Discrete Cosseno Transform (DCT), Haar Wavelet Transform, Daubechies Wavelets Transform and Wavelet Scalar Quantization (WSQ). The main interest is to find out the technique with the smallest distortion and higher compression ratio. Image quality is measured using peak signal-to-noise ratio (PSNR), signal-to-noise ratio (SNR) and root mean square (ERMS). Image quality using these metrics showed best results for the DCT followed by WSQ, although the WSQ had the best compression time and presented the best quality when evaluated by the “GrFinger 4.2” software.

Keywords: image compression, fingerprint, DCT, *Wavelet of Haar*, image quality, *RMSE*, *SNR_{ms}* e *PSNR*.

Lista de Figuras

Figura 1 - Tecnologias biométricas - impressão digital, face, íris, voz, geometria da mão, formato da unha.	2
FONTE - COSTA, (2001)	2
Figura 2 - Aplicação biométrica em diversos segmentos de mercado.....	3
FONTE - COSTA, (2001)	3
Figura 3 - Técnicas de aquisição de impressão digital.	4
FONTE - COSTA, (2001).....	4
Figura 4 - Exemplo de leitores biométricos.	5
FONTE - (COSTA, 2001; MVF, 2006)	5
Figura 5 - Exemplo de um leitor biométrico (prisma).	5
FONTE - COSTA, (2001)	5
Figura 6 - Imagem rolada e imagem plana.....	5
FONTE - COSTA, (2001)	5
Figura 7 - Amostras dos bancos de dados DB1, DB2, DB3, obtidas com os sensores da tabela 1.....	6
FONTE - (COSTA, 2001; FVC, 2000,2001).....	6
Figura 8 - Exemplos de imagens de impressão digital (a) Imagem original com 199 KB e resolução de 256 * 256 de resolução, do banco (b) Imagem com 30% de compressão, técnica de <i>Wavelet Haar</i> , 198 KB bytes.....	8
FONTE - COSTA, (2001).....	8
Figura 9 - cristas papilares (cumes), intercristais (vales), e poros e ponto ou ilha.....	11
FONTE - COSTA, (2001)	11
Figura 10 - Área padrão e tipos de linhas	14
FONTE - COSTA, (2001)	14
Figura 11 - Ponto delta e ponto núcleo de uma impressão digital.....	14
FONTE - COSTA, (2001)	14
Figura 12 - Sistemas de Linhas	15

FONTE - COSTA, (2001)	15
Figura 13 - As cinco classes propostas por Henry, deltas e núcleos destacados.....	16
FONTE - COSTA, (2001)	16
Figura 14 - Exemplo de minúcias identificadas em um datilograma	17
FONTE - KAZIENKO, (2003)	17
Figura 15 - Aspectos de impressões digitais - Detalhes de Galton	18
FONTE - MALTONI et al., (2003).....	18
Figura 16 - A minúcia de terminação: $[x_0, y_0]$ são as coordenadas da minúcia; θ é o ângulo que a tangente da minúcia forma com o eixo horizontal; b) uma minúcia de bifurcação: ângulo θ é definido por meio da minúcia de terminação correspondente a bifurcação original que existe na imagem negativa.....	21
FONTE - MALTONI et al., (2003).....	21
Figura 17 - Diagrama simplificado mostrando a codificação e decodificação WSQ.....	23
FONTE - (BRADLEY e BRISLAWN, 1994).....	23
Figura 18 - Imagem original da impressão digital (esquerda) e imagem com os contornos de cumes afinados.	24
FONTE - Gökmen et.al., (1996)	24
Figura 19 - Impressões digitais ampliadas: (a) imagem original da impressão digital, e impressões digitais reconstruídas (b) método proposto, (c) do JPEG, e (d) do WSQ.	25
FONTE - Gökmen et.al., (1996)	25
Figura 20 - Imagens de teste.....	26
FONTE - Grgic et al., (2003).....	26
Figura 21 - imagens utilizadas na avaliação do método híbrido.	27
FONTE - Ashino et al., (2003).....	27
Figura 22 - (a) Lena reconstruída. (b) Lena original. - 256×256 . Taxa de codificação: 1 bit/pixel.	28
FONTE - Rigotti (2004)	28

Figura 23 - linha superior: <i>Wavelet</i> ganhadora - linha inferior: evolução mostrando as gerações 1, 10, 20 e 50.....	30
FONTE - Grasemann e Miikkulainen (2005)	30
Figura 24 - Sistema de codificação por transformada.	35
FONTE - GONZALEZ, (2000).....	35
Figura 25 - Erro de reconstrução x tamanho da sub-imagem.	36
FONTE -GONZALEZ, (2000).....	36
Figura 26 - Exemplo de regiões usadas na amostragem por zona na DCT.	37
FONTE - SANTOS, (1994)	37
Figura 27- A matriz 8x8 das funções base.....	40
FONTE – (Toolbox do Matlab 07).....	40
Figura 28 - Exemplo de aplicação da DCT utilizando coeficientes pré-determinados na reconstrução da imagem.	41
FONTE - HERZ et al., (2002).....	41
Figura 29 - Transformada Contínua de <i>Wavelets</i>	44
FONTE – FONSECA, (2004).....	44
Figura 30 - Fator de escala de uma função <i>wavelet</i> Ψ	45
FONTE - FONSECA, (2004).....	45
Figura 31 - Fator de deslocamento: à direita função <i>Wavelet</i> $\Psi(t)$, à esquerda função <i>Wavelet</i> deslocada $\Psi(t - b)$	45
FONTE - FONSECA, (2004).....	45
Figura 32 - Funções base de Fourier descritas no plano Tempo x Freqüência.	47
FONTE - FONSECA, (2004).....	47
Figura 33 - Função base <i>Wavelet</i> de <i>Daubechies</i> descritas no plano Tempo x Freqüência.....	48
FONTE - FONSECA, (2004).....	48
Figura 34 - Comparação entre Transformada de <i>Fourier</i> e Transformada de <i>Wavelet</i>	48
FONTE - FONSECA, (2004).....	48
Figura 35 - Árvore de Decomposição <i>Wavelet</i>	49

FONTE - Toolbox do Matlab 07.....	49
Figura 36 - Árvore de Decomposição <i>Wavelet</i> de um sinal.....	49
FONTE - Toolbox do Matlab 07.....	49
Figura 37- Banco de Filtros.....	50
FONTE - Toolbox do Matlab 07.....	50
Figura 38 - A base tipo <i>box</i> para V^2	54
FONTE - STOLLNITZ et. al., (1995).....	54
Figura 39 - As <i>Wavelet</i> de <i>Haar</i> para W^1	55
FONTE - STOLLNITZ et al., (1995).....	55
Figura 40 - Representação do grupo de função tipo <i>box</i> (parte 1)	56
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995).....	56
Figura 41 - Representação do grupo de função tipo <i>box</i> (parte 2)	56
FONTE - STOLLNITZ et. al., (1995).....	56
Figura 42 - Representação do grupo de função tipo <i>box</i> (parte 3)	56
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995).....	56
Figura 43 - (a) Decomposição padrão, (b) Decomposição não padrão	60
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995).....	60
Figura 44 - A construção padrão de uma base <i>Wavelet Haar</i> bidimensional para V^2 . No caso não normalizado, as funções são +1 onde mostram sinal de mais, -1 onde mostra sinal de menos, e 0 na região cinza.	62
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995).....	62
Figura 45 - A construção não padrão de uma base bidimensional <i>Wavelet</i> de <i>Haar</i> para V^2	63
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995).....	63
Figura 46 - Famílias <i>Daubechies</i>	64
FONTE - SILVA (2006).....	64
Figura 47 - Matriz de coeficientes da DAUB4.....	65
FONTE - ANDRADE (2001)	65
Figura 48 - Primeiro passo da Transformada de Wavelet Daub4.	65

FONTE - ANDRADE (2001)	65
Figura 49- Vetor da imagem a ser transformada.	66
FONTE - ANDRADE (2001)	66
Figura 50 - Etapas do sistema desenvolvido.	68
Figura 51 - (a) Imagem original “A20” (b) primeiro bloco 8x8 da imagem a ser transformada.....	69
Figura 52 - Imagem após a aplicação da transformada do Cosseno (blocos de tamanho 8x8).....	70
Figura 53 - (a) Máscara para quantificação por zona (b) representação da máscara aplicada na imagem.	70
Figura 54 - Imagem com taxa de compressão de 91%.	71
Figura 55 - Banco <i>DsPami</i> : tempo de execução das seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; (h)WSQ.....	78
Figura 56 - Banco <i>DsPami</i> : resultados da métrica RMSE para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ	79
Figura 57 - Banco <i>DsPami</i> : resultados da métrica SNRrms para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; i) WSQ	80
Figura 58 - Banco <i>DsPami</i> : resultados da métrica PSNR para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab h) WSQ	82
Figuras 59 - Banco <i>Fingdb</i> : tempo de execução das seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.	85
Figura 60 - Banco <i>Fingdb</i> : resultados da métrica <i>RMSE</i> para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.....	87

Figuras 61 - Banco <i>Fingdb</i> : resultados da métrica SNRrms para as seguintes técnicas a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 84; d) DCT 94; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.....	90
Figuras 62 - Banco <i>Fingdb</i> : resultados da métrica PSNR para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.....	92
Figuras 63 - Banco <i>Nistdb</i> : tempo de execução das seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) WSQ.	95
Figura 64 - Banco <i>Nistdb</i> : resultados da métrica RMSE para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.....	97
Figuras 65 - Banco <i>Nistdb</i> : resultados da métrica SNRrms para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.....	100
Figuras 66 - Banco <i>Nistdb</i> : resultados da métrica PSNR para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.....	102

Tabela 16 - Banco de dados <i>DsPami</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica WSQ.	127
Tabela 17 - Resultados do software classificador “GrFinger 4.2”, para as imagens originais e as recuperadas, do banco de dados <i>Fingdb</i>	128
Tabela 18 - Banco de dados <i>Fingdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica <i>Daub 4</i>	129
Tabela 19 - Banco de dados <i>Fingdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica <i>Daub 8</i>	130
Tabela 20 - Banco de dados <i>Fingdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica DCT.	131
Tabela 21- Banco de dados <i>Fingdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica <i>Wavelet de Haar, com 91%</i>	132
Tabela 22 - Banco de dados <i>Fingdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica <i>Wavelet de Haar, com 94%</i>	133
Tabela 23 - Banco de dados <i>Fingdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica Haar do Matlab.	134
Tabela 24 - Banco de dados <i>Fingdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica WSQ.	135
Tabela 25 - Resultados do software classificador “GrFinger 4.2”. para as imagens originais e as recuperadas, do banco de dados <i>Nistdb</i>	136
Tabela 26 - Banco de dados <i>Nistdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica <i>Daub4</i>	137
Tabela 27 - Banco de dados <i>Nistdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica <i>Daub8</i>	138
Tabela 28 - Banco de dados <i>Nistdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica DCT.	139
Tabela 29 - Banco de dados <i>Nistdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica <i>Wavelet de Haar, 91%</i>	140
Tabela 30 - Banco de dados <i>Nistdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica <i>Wavelet de Haar, 94%</i>	141

Tabela 31 - Banco de dados <i>Nistdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica Haar do Matlab.	142
Tabela 32 - Banco de dados <i>Nistdb</i> : tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica WSQ.....	143

Lista de abreviaturas e siglas

CCD	<i>Charged Coupled Device</i> (em português - Dispositivo de Acoplamento de Carga)
ARID	Análise e Reconhecimento de Impressão Digital
FVC	<i>Fingerprint Verification Competition</i> (em português - Competição para Verificação de Impressão digital)
DPI	<i>Dots per inch</i> (em português - Pontos Por Polegada)
FBI	<i>Federal Bureal of Invertigation</i> (em português - Agência de Investigação Federal dos EUA)
NIST	<i>National Institute of Standard and Techology</i> (em português - Instituto Nacional de Padrão e Tecnologia)
RAM	<i>Random Access Memory</i> (em português - Memória de Acesso Randômico)
NSA	<i>National Security Agency</i> (em português - Agência Nacional de Segurança dos Estados Unidos).
FD	Fórmula Datiloscópica
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i> (em português - Transformada Discreta de Wavelet)
DCT	<i>Discrete Cosine Transform</i> (em português - Transformada Discreta do Cosseno)
CWT	<i>Continuous Wavelet Transform</i> (em português - Transformada Contínua de Wavelet)
WSQ	<i>Wavelet Scalar Quantization</i> (em português - Wavelet de Quantização Escalar)
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (em português - Erro Médio Quadrático)
SNR _{rms}	<i>Signal to Noise Ratio rms</i> (em português - Relação Sinal Ruído rms)
PSNR	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i> (em português - Relação Sinal Ruído de Pico)
PQS	<i>Picture Quality Scale</i> (em português - Escala de Qualidade da Imagem)

Sumário

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTAS DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
1 Introdução.....	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Aquisição da imagem de impressão digital	3
1.3 Proposta.....	8
1.4 Objetivo	8
1.5 Organização do trabalho.....	9
2 Características das imagens de impressão digital.....	10
2.1 Considerações iniciais	10
2.2 Introdução.....	10
2.3 Impressão Digital: análise e representação	13
2.3.1 Pontos singulares (núcleos e deltas).....	13
2.3.2 Sistema de Henry	15
2.3.3 Tipos de minúcias ou detalhes de Galton	16
2.3.4 Os Tipos Fundamentais de Juan Vucetich.....	19
2.3.5 O sistema do FBI (Federal Bureau of Investigation)	21
2.4 Considerações finais	21
3 Compressão em imagens de impressão digital.....	22
3.1 Considerações iniciais.....	22
3.2 Revisão dos artigos	22
3.3 Considerações finais	32
4 Compressão de Dados.....	33

4.1 Considerações iniciais	33
4.2 Introdução.....	33
4.2.1 A seleção da transformada.....	35
4.2.2 Seleção do tamanho da sub-imagem.....	36
4.2.3 Alocação de bits	36
4.2.3.1 Amostragem por zona	37
4.2.3.2 Amostragem por limiar.....	37
4.3 Transformada Discreta do Cosseno (DCT)	38
4.4 Transformada de <i>Wavelets</i>	41
4.4.1 Introdução.....	42
4.4.2 Introdução Histórica.....	42
4.4.3 Transformada de <i>Wavelets</i> : contínua e discreta.....	44
4.4.4 Diferenças entre a Transformada de <i>Fourier</i> e a Transformada de <i>Wavelets</i>	46
4.4.5 Aproximações e Detalhes	49
4.4.6 Tipos de <i>Wavelets</i>	51
4.5 A Transformada de <i>Wavelet</i> de <i>Haar</i>	51
4.5.2 A Função <i>Haar</i> de base unidimensional	53
4.5.3 Ortogonalidade.....	57
4.5.4 Normalização	57
4.5.5 Compressão <i>Wavelet</i>	58
4.5.6 A Transformada de <i>Wavelet</i> de <i>Haar</i> Bidimensional	60
4.5.7 Função <i>Haar</i> de base bidimensional.....	61
4.5.6 A Transformada de <i>Wavelets</i> de Daubechies.....	63
4.6 Consideração final	66
5 Metodologia.....	67
5.1 Considerações iniciais	67
5.2 Metodologia.....	67
5.2.1 Software de Desenvolvimento	69
5.2.2 Transformada Discreta do Cosseno	69

5.2.3 Transformada Wavelet de Haar	71
5.2.4 Transformada de Wavelets de Daubechies Daub4 e Daub8	72
5.2.5 Wavelet Scalar Quantization (WSQ)	73
5.2.6 Métricas para Avaliação das Técnicas de Compressão.....	73
5.3 Consideração final	74
6. Resultados e Discussões.....	76
6.1 Considerações iniciais	76
6.2 Resultados e Discussões.....	76
6.3 Banco DsPami	77
6.3.1 Tempo de compressão para cada técnica	77
6.3.2 Avaliação dos resultados com a métrica RMSE.....	78
6.3.3 Avaliação dos resultados com a métrica SNRrms	79
6.3.4 Avaliação dos resultados com a métrica PSNR.....	81
6.4 Banco Fingdb.....	82
6.4.1 Tempo de compressão para cada técnica	82
6.4.2 Avaliação dos resultados com a métrica RMSE.....	85
6.4.3 Avaliação dos resultados com a métrica SNRrms	87
6.4.4 Avaliação dos resultados com a métrica PSNR.....	90
6.5 Banco Nistdb	92
6.5.1 Tempo de compressão para cada técnica	92
6.5.2 Avaliação dos resultados com a métrica RMSE.....	95
6.5.3 Avaliação dos resultados com a métrica SNRrms	98
6.5.4 Avaliação dos resultados com a métrica PSNR.....	100
6.6 Resultado final	103
6.7 Avaliação da qualidade das imagens	104
7 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros	105
7.1 Considerações iniciais	105
7.2 Conclusões sobre os Resultados	105
7.3 Sugestões para trabalhos futuros.....	106

Referências Bibliográficas	107
Anexo A - Norma e normalização.....	116
Anexo B - Algoritmo de compressão da Transformada de Daub 4, Daub 8 e Haar do Matlab	118
Anexo C - Algoritmo de compressão da Transformada de DCT.....	119
Anexo D - Algoritmo de compressão da Transformada de <i>Wavelet de Haar</i>	120

1 Introdução

1.1 Aspectos Gerais

O termo biometria, do grego *bios* (vida) + *metron* (medida), é o ramo da ciência que estuda a medida das características únicas do indivíduo, com o objetivo de utilizá-las em sistemas de identificação (LIU e SILVERMAN, 2001). Essas características podem ser físicas ou comportamentais (COSTA, 2001).

Como exemplo de identificadores físicos pode-se citar as impressões digitais, a geometria de mão, a retina, as características faciais e o formato da unha (Figura 1).

Entre os identificadores comportamentais destacam-se a voz e a assinatura. Esses identificadores geralmente são considerados menos conclusivos por estarem sujeitos a imitações, ou a limitações devidas a enfermidades.

O crescente interesse no uso de técnicas biométricas para reconhecimento de indivíduos deve-se ao fato de serem únicas para cada pessoa e, de certa forma, manterem-se estáveis ao longo do tempo. Além disso, não podem ser roubadas, emprestadas, esquecidas e dificilmente são forjadas, enquanto que os sistemas tradicionais de reconhecimento (carteira de identidade, carteira de motorista, passaporte) facilmente são fraudados (LIU e SILVERMAN, 2001).

Entre as técnicas biométricas citadas destaca-se a impressão digital porque há muito é aceita pelo sistema judiciário, como evidência indiscutível de identidade (TURK, 1991), e por ser amplamente utilizada para identificação criminal e em sistemas de segurança. Sua ampla aceitação e uso contribuíram para a escolha dessa técnica como tema de interesse para este trabalho.

Figura 1 - Tecnologias biométricas - impressão digital, face, íris, voz, geometria da mão, formato da unha.

FONTE - COSTA, (2001)

A impressão digital refere-se ao conjunto de linhas presentes nos dedos humanos. A formação dessas linhas inicia-se nos primeiros meses do embrião e permanecem imutáveis durante toda a vida do indivíduo (JAIN, 1997). Para a identificação de uma impressão digital são utilizados pontos chaves, denominados minúcias, detalhadas no Capítulo 2.

Os procedimentos para identificação de impressões digitais podem ser manuais ou automáticos. Os procedimentos manuais, os primeiros a serem desenvolvidos, baseiam-se na análise da impressão digital tintada em papel. Apresentam uma série de limitações, como:

- pequena taxa de identificações positivas;
- procedimentos lentos;
- danificação do papel usado para as impressões digitais devido ao freqüente manuseio;
- perdas de papéis das impressões digitais em impressões postais, etc..

Outro problema em se utilizar o procedimento manual de identificação é a identificação de impressão latente, onde uma ou mais impressões digitais obtidas da cena de um crime devem ser comparadas com um arquivo contendo milhares de impressões digitais.

Mais recentemente, com o avanço tecnológico e com as técnicas recentes de reconhecimento de padrões e armazenamento de dados, foi possível a produção de equipamentos para aquisição da imagem de impressão digital, e foram desenvolvidos procedimentos automáticos para identificação de indivíduos através de suas impressões digitais. Os equipamentos automáticos gradualmente têm substituindo os procedimentos

manuais, pelo fato de reduzirem as limitações anteriormente citadas para o procedimento manual.

Nos sistemas automáticos a impressão digital é digitalizada e armazenada. Como o armazenamento envolve grande quantidade de dados de impressão digital, são de grande interesse técnicas para armazenamento e rápido acesso à informação. Neste contexto insere-se a compressão de dados, permitindo o armazenamento de maior quantidade de impressões digitais e a transmissão dessas informações em taxas mais elevadas.

Atualmente, além das aplicações civis e criminais, diversas outras áreas têm buscado a utilização da tecnologia de reconhecimento biométrico, principalmente, devido à necessidade de estabelecer níveis de segurança e autenticidade na identificação de pessoas. Como exemplo pode-se citar o acesso a bancos, edifícios, residências, áreas restritas em indústrias e hospitais, Internet, e segurança de celulares e automóveis (Figura 2).

Figura 2 - Aplicação biométrica em diversos segmentos de mercado.
FONTE - COSTA, (2001)

1.2 Aquisição da imagem de impressão digital

Como mencionado na seção 1.1 há dois procedimentos para aquisição das imagens de impressão digital (CHONG et al., 1992; HONG et al., 1996):

- a impressão tintada em papel (método *ink and paper*), procedimento bem conhecido e ainda muito usado pelas autoridades (Figura 3(a)) ;

- aquisição da imagem através de um leitor biométrico, que transforma os aspectos físicos extraídos em um *template*, ou seja, em um conjunto de características (COSTA, 2001) (Figura 3(b)).

Na impressão tintada em papel o dedo deve ser rolado de um lado ao outro, de maneira que o desenho digital não apresente borrões ou manchas. Porém, na prática, podem ocorrer tanto os borrões como as manchas, como mostrado na Figura 3(a), devido ao excesso ou falta de tinta, o que afeta consideravelmente a qualidade da imagem (CHONG et al., 1992; HONG et al., 1996). Se a qualidade da impressão digital obtida não corresponde a um padrão aceitável, a verificação automática da mesma torna-se uma tarefa extremamente difícil (COETZEE et al., 1993; ELECCIÓN, 1973). Devido a isto o método apresenta limitações.

Figura 3 - Técnicas de aquisição de impressão digital.
FONTE - COSTA, (2001)

O segundo método proposto utiliza um sistema eletrônico de geração de dados e dependendo da tecnologia utilizada nesses sistemas, podem ser obtidas imagens de qualidade superior à imagem da impressão digital tintada. Na Figura 3 pode-se observar a diferença entre os métodos de aquisição, para a mesma imagem coletada em papel (Figura 3(a)) e com uso de leitor biométrico (Figura 3 (b)) (COSTA, 2001).

Os primeiros leitores biométricos eram constituídos por placas e prismas de vidro, alimentando câmeras ópticas, com saída de vídeo analógica (Figura 4).

Figura 4 - Exemplo de leitores biométricos.
FONTE - (COSTA, 2001; MVF, 2006)

Apesar de serem bem maiores que leitores mais recentes (20x10 cm), esses leitores ainda são usados quando é necessário imagem de boa qualidade. O diagrama em blocos de um leitor biométrico utilizando prisma é mostrado na Figura 5. A área de captura da imagem desses leitores é maior e permite a amostragem do dedo rolado (Figura 6), o que é vital para se obter o máximo possível de área útil na impressão digital.

Figura 5 - Exemplo de um leitor biométrico (prisma).
FONTE - COSTA, (2001)

Figura 6 - Imagem rolada e imagem plana.
FONTE - COSTA, (2001)

Atualmente há também leitores desenvolvidos através do uso de câmeras *CCD*, microprismas e sensores sensíveis à luz, leitores capacitivos e com outras tecnologias.

A Tabela 1 mostra a comparação de três tipos de sensores, cujas amostras são apresentadas na Figura 7. Essas amostras foram adquiridas de três bases de dados distintas, DB1, DB2, DB3, nas quais, para cada base de dados, foi utilizado um tipo de sensor. Cada amostra apresenta uma resolução diferente.

Tabela 1 - Comparação entre vários tipos de sensores.

Banco de Dados	Tipos de sensores	Resolução da imagem
DB1	Ótico de baixo custo	300x300
DB2	Capacitivo de baixo custo	256x364
DB3	Óptico	448x448

Fonte: COSTA, (2001).

Figura 7 - Amostras dos bancos de dados DB1, DB2, DB3, obtidas com os sensores da tabela 1.
FONTE - (COSTA, 2001; FVC, 2000,2001)

Os pontos chaves na identificação de uma impressão digital, denominados minúcias, serão abordados no Capítulo 2. Cada sistema automático usa uma tecnologia proprietária para fazer a identificação de uma impressão digital. Por exemplo, no *software* ARID - Análise e Reconhecimento de Impressões Digitais, (ARID, 2006), a identificação se faz pela criação de um grafo descritor das minúcias, também conhecido como *template*, que leva à economia no espaço do banco de dados. Uma imagem de impressão digital (512 x 512 pixels em 256 níveis de cinza) que ocupa 262000 *bytes* é comprimida entre 20 e 30 Kb, criando um *template* com cerca de 5K *bytes* contendo as minúcias. O *template* além de ser menor, permite comparação e cálculo de similaridade, o que é impossível com a imagem original. O algoritmo de compressão utilizado neste tipo de sistema, o WSQ - *Wavelet Scalar Quantization* garante taxas de compressão de cerca de 15:1 (NAVARRO, 2001).

Segundo Brislawn (2002) a técnica WSQ -*Wavelet Scalar Quantization*, tem sido bastante usada para comprimir imagens de impressão digital, inclusive pelo FBI (*Federal Bureau of Investigation* - EUA). No entanto estão em andamento estudos que buscam outras técnicas que resultem em alta taxa de compressão e recuperação da imagem sem grandes perdas.

Um exemplo de banco de dados de impressão digital é o do FBI, que armazena impressões digitais desde 1924. Em 70 anos o conteúdo do banco cresceu para 200 milhões de impressões digitais. Isto inclui aproximadamente 29 milhões de registros que são acessados toda vez que se busca identificar um suspeito. O tamanho do banco chega a 2.000 *Terabytes* de imagens. Os dados de impressão digital continuam a acumular aproximadamente a taxa de 30.000 a 50.000 novas impressões digitais, gerando enorme tráfego de informações que faz aumentar o tempo de acesso à informação. Em 2002 o tempo de busca na base de dados do FBI era de aproximadamente 3 horas (BRISLAWN, 2002).

A necessidade de compactação de dados de impressão digital deve-se a dois fatores (BRISLAWN, 2002):

- 1) permitir o armazenamento de maior número de imagens;
- 2) aumentar a taxa de transferência de dados, pois quanto mais compactados forem os dados, mais rápida será a transferência, melhorando assim, a performance.

De acordo com Gonzalez (2000), as técnicas de compressão são agrupadas em duas grandes categorias: com perdas e sem perdas.

A compressão sem perdas (Figura 8(a)) permite que uma imagem seja comprimida e recuperada sem perder informações. Essa técnica é útil para arquivamento de imagens, como por exemplo, imagens de registros médicos e legais.

A compressão com perdas (Figura 8 (b)) fornece maiores níveis de redução de dados, mas resulta na reprodução menos perfeita da imagem original, sendo útil em aplicações como transmissão de televisão, vídeo conferência e transmissão para fac-símile, nas quais uma certa quantidade de erros é aceitável, mas tendo como vantagem o aumento do desempenho da compressão.

Compactar imagens para armazená-las com um mínimo de perda é a maior dificuldade encontrada pelas técnicas de compressão.

Figura 8 - Exemplos de imagens de impressão digital (a) Imagem original com 199 KB e resolução de 256 * 256 de resolução, do banco (b) Imagem com 30% de compressão, técnica de *Wavelet Haar*, 198 KB bytes.

FONTE - COSTA, (2001)

1.3 Proposta

Este trabalho tem por proposta comparar as seguintes técnicas de compressão de imagens para aplicação em imagens de impressão digital: a Transformada Discreta do Cosseno, a Transformada de *Wavelet* de *Haar*, a Transformada de *Wavelet* de *Daubechies* e a Transformada WSQ (*Wavelet Scalar Quantization*). Essas técnicas foram escolhidas por apresentarem boa eficiência nos resultados para imagens de impressão digital (STOLLNITZ et al., 1995; GONZALEZ, 2000).

1.4 Objetivo

O objetivo deste trabalho é escolher a melhor técnica para a compressão de imagens de impressão digital, que possibilite a maior taxa de compressão possível com o mínimo de perdas. Dependendo do grau de perda de informação em uma impressão digital, algumas características importantes podem ser perdidas, prejudicando uma futura classificação, além de não registrar anomalias que porventura existam. A perda de algumas características é tolerável, desde que o reconhecimento do indivíduo ainda possa ser feito.

1.5 Organização do trabalho

Este primeiro capítulo mostrou a importância da compressão de imagens digitais e o contexto no qual se insere este trabalho. O restante do texto está organizado da seguinte forma:

- no segundo capítulo são descritos a impressão digital, suas características de interesse para identificação de indivíduos e os sistemas de classificação das características em uma impressão digital;
- no terceiro capítulo são apresentados alguns trabalhos sobre compressão aplicada a imagens de impressão digital;
- no quarto capítulo são apresentados os aspectos teóricos dos métodos de compressão a serem utilizados: a Transformada Discreta do Cosseno, a Transformada de *Wavelets* de *Haar* e a Transformada de *Wavelets* de *Daubechies* .
- no quinto capítulo é apresentada a metodologia utilizada no trabalho;
- no sexto capítulo são apresentados os resultados e as discussões a respeito da performance das técnicas;
- no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros;

2 Características das imagens de impressão digital

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são descritas as características da impressão digital, de maior interesse para identificação de indivíduos e os sistemas de classificação dessas características.

2.2 Introdução

Papiloscopia é a ciência que estuda as impressões papilares e a identificação por meio das mesmas. Ela está dividida nas seguintes áreas: quiroscopia (impressões da mão), podoscopia (impressões do pé) e datiloscopia (impressões das extremidades dos dedos) (TAVARES JUNIOR, 1991; ARAÚJO, 2003).

A característica biométrica de interesse para esse trabalho é a impressão digital ou a datiloscopia, também conhecida como datilograma.

A impressão digital é constituída pelos seguintes elementos, destacados na Figura 9: cristas papilares (cumes), que constituem as linhas pretas impressas na imagem; sulcos interpapilares ou intercristais (vales), que correspondem aos intervalos brancos que separam as linhas pretas impressas; poros, que são pequenos orifícios brancos que se vêem nas linhas pretas (cumes); e pontos, cristas curtas ou ilhotas, que são particularidades morfológicas que permitem distinguir as impressões digitais, identificados por um ponto preto que fica no meio da linha branca (ARANTES, 2002).

Figura 9 - cristas papilares (cumes), intercristais (vales), e poros e ponto ou ilha
FONTE - COSTA, (2001)

A datiloscopia pode ser dividida nas seguintes áreas (TAVARES JUNIOR, 1991):

- **datiloscopia Civil** - trata da identificação de documentos para fins civis, como a carteira de identidade.
- **datiloscopia Criminal** - faz da identificação nas seguintes circunstâncias: identificação do indiciado em inquérito policial, quando houver dúvida ou suspeita sobre sua identidade; expedição de documentos de idoneidade, como o atestado de antecedentes criminais e folha de antecedentes; identificação de fragmentos de impressões digitais encontradas em locais de crime.
- **datiloscopia Clínica** - estuda as perturbações observadas nos desenhos digitais em consequência de enfermidades ou do exercício de certas profissões.

A datiloscopia empregada há mais de um século, tem sido considerado o método mais prático, seguro e econômico para identificação de pessoas na área civil e criminal. Um breve resumo histórico, com destaque para os principais avanços realizados na identificação através das impressões digitais é apresentado a seguir (KAZIENKO, 2003).

Um importante avanço na área de identificação através da impressão digital ocorreu na década de 1880. Nesse período, *Sir Francis Galton*, antropólogo inglês, estabeleceu um intenso estudo sobre as impressões digitais alertando para a individualidade e permanência das mesmas. Em seu livro *Fingerprints*, publicado em 1882, Galton confirmou cientificamente a suspeita de Hershel: as impressões digitais

não mudam durante a vida do indivíduo, e são particulares para cada pessoa. Ele criou o primeiro sistema de classificação para impressões digitais. Com isso, surgiu o termo minúcia ou detalhes de Galton, que diz respeito às características que identificam as impressões (TOCHETTO et al., 1999). Galton publicou seu sistema datiloscópico adotando 38 tipos de impressões digitais, divididos em três grupos: arcos, presilhas e verticilos (TAVARES JUNIOR, 1991).

Em 1891, Juan Vucetich, Oficial da Polícia Argentina, iniciou a montagem do primeiro arquivo baseado nos padrões de Galton, colocando em funcionamento o sistema de identificação datiloscópica. Em 1892, Vucetich fez a primeira identificação criminal através de uma impressão suja de sangue deixada pelo criminoso em local de crime. Em seu livro, “*Datilosopia Comparada*”, descreveu seu sistema de classificação baseado em quatro tipos básicos de impressões digitais (TOCHETTO et al., 1999). O sistema de Vucetich bem como seus tipos fundamentais estão apresentados na seção 2.3.4.

No ano de 1900, Edward Richard Henry, realizou um importante trabalho que resultou na publicação do livro *Classification and uses of Fingerprints*, o qual descreve seu sistema de identificação datiloscópica adotando quatro tipos fundamentais para classificação de impressões digitais: arcos, presilhas, verticilos e compostos (TAVARES JUNIOR, 1991).

Em 1904 o sargento John Kenneth Ferrier, do *Scotland Yard Fingerprint Bureau*, ministrou nos Estados Unidos o primeiro curso sobre impressões digitais, e a partir dessa data, o uso de impressões digitais foi disseminado nos diversos países. Em muitas cidades, foram criados núcleos de identificação por impressões digitais, seguidos de condenações em que as impressões digitais serviam como prova judicial (TOCHETTO et al., 1999).

Em 1918, Edmond Locard escreveu que, em termos de confronto de impressões digitais, doze minúcias ou pontos característicos encontrados em duas impressões são suficientes para afirmar que um datilograma corresponde a outro (TOCHETTO et al., 1999).

De forma geral, no século XX, a identificação pela impressão digital tornou-se reconhecida como prática válida perante a justiça, também para os organismos responsáveis pelo cumprimento da lei. Por volta de 1960, o FBI – *Federal Bureau of Investigation*, a “Polícia Federal” dos Estados Unidos da América, promoveu grandes esforços no desenvolvimento de sistemas automáticos de identificação através da

impressão digital. Vários organismos de cumprimento da lei espalhados pelo mundo também passaram a adotar esses sistemas. Atualmente, o campo de atuação desses sistemas tem transcendido a tarefa de cumprimento legal, sendo amplamente aceitos e utilizados nas mais diversas aplicações civis, tais como controle de votantes e controle de funcionários (JAIN, 1997).

No Brasil o primeiro núcleo de identificação por impressões digitais foi estabelecido em 1935, com a criação do arquivo Datiloscópico Monodátilar e do Laboratório de Locais do Crime no Serviço de Identificação de São Paulo.

Em 1963, foi inaugurado em Brasília, o Instituto Nacional de Identificação, com o objetivo fundamental de centralizar a identificação criminal no país.

2.3 Impressão Digital: análise e representação

Na literatura, as caracterizações de aspectos de impressões digitais mais referenciadas são aquelas apresentadas por Galton (KARU e JAIN, 1892), por *Henry* (HENRY, 1905) e pelo FBI (FBI, 1984). Estas três caracterizações serão apresentadas nesta seção, precedidas pela definição de alguns termos técnicos na seção 2.3.1.

2.3.1 Pontos singulares (núcleos e deltas)

Antes de abordar os pontos singulares, é necessário definir alguns termos técnicos usados para reconhecimento de impressões digitais. O desenho digital (Figura 10) apresenta uma área útil onde é possível observar a área padrão entre as linhas A e B. A área padrão é a parte principal da impressão do dedo e consiste das cristas e de todos seus aspectos. Os tipos de linhas são definidos como duas cristas que iniciam paralelamente e divergem sobre toda a área padrão. Essas cristas podem ser contínuas ou não, se ocorrer alguma quebra.

Figura 10 - Área padrão e tipos de linhas
FONTE - COSTA, (2001)

Os pontos singulares em impressões digitais, conhecidos como núcleos e deltas, são usados na classificação de impressões digitais (Figura 11).

Figura 11 - Ponto delta e ponto núcleo de uma impressão digital
FONTE - COSTA, (2001)

O núcleo é um ponto singular localizado na área central da impressão digital, o delta é um ângulo ou triângulo formado pelas cristas papilares que pode se apresentar de duas maneiras: pela bifurcação de uma linha simples ou pela brusca divergência de duas linhas paralelas. O delta desempenha papel importante na impressão digital porque determina a sua classe. Em impressões digitais com ausência de pontos deltas verificam-se somente os sistemas de linhas basilar e marginal (caso dos arcos planos).

As impressões que apresentam um ou dois deltas, possuem três sistemas de linhas denominados: nuclear (região central da impressão), basilar (linha que serve de base, abaixo da região nuclear) e marginal (região das características situadas nas margens da impressão) (Figura 12).

Figura 12 - Sistemas de Linhas
FONTE - COSTA, (2001)

2.3.2 Sistema de Henry

As impressões digitais podem ser divididas em várias classes de acordo com sua topologia geométrica (ELECCIÓN, 1973; LUMINI et al., 1997; HRECHAK e MCHUGH, 1990). A primeira tentativa para classificar impressões digitais foi proposta por Edward Richard Henry (HENRY, 1905), que as dividiu em cinco classes diferentes, definindo um sistema de classificação designado *Henry System* (RAO e BALCK, 1978).

O sistema Henry de classificação analisa sub-regiões da impressão digital, denominadas região singular de pontos, o delta e outras linhas do sistema nuclear (núcleo) para determinar as cinco classes, as quais apresentam características próprias (HENRY, 1905; RATHA et al., 1995; LEE e GAENSSLEN, 1991). São apresentadas a seguir, as cinco classes (Figura 13) e suas definições:

Arco Plano: não apresenta delta e as linhas atravessam de um lado para outro de forma abaulada. As linhas datilares formam-se em um lado e tendem a sair pelo outro.

Arco Angular: apresenta acentuada elevação das linhas na região central, em forma de tenda. Pode apresentar um delta, mas sem linha ou fragmento de linha, entre o delta e o núcleo.

Presilha Interna (Direita): apresenta um delta à direita do observador, e as linhas datilares correm para a esquerda em forma de laçadas, ou seja, as linhas formam-se à esquerda do observador, curvam-se e tendem a voltar para o mesmo lado.

Presilha Externa (Esquerda): apresenta um delta à esquerda do observador, e as linhas datilares correm para a direita do observador, ou seja, as linhas formam-se à direita do observador, curvam-se no centro da impressão e tendem a voltar para o mesmo lado.

Verticilo: apresenta dois deltas, sendo um à direita e outro à esquerda do observador; as linhas nucleares ficam encerradas entre os dois deltas, assumindo configurações variadas.

Figura 13 - As cinco classes propostas por Henry, deltas e núcleos destacados
FONTE - COSTA, (2001)

Segundo o arquivo do FBI, foi constatado que 65% dos padrões são presilhas, 30% são verticilos e 5% são arcos (MOAYER e FU, 1975). Por esse motivo os bancos de dados não possuem impressões digitais uniformemente distribuídas nas cinco classes.

2.3.3 Tipos de minúcias ou detalhes de Galton

Outro padrão das imagens de impressão digital são as minúcias, pequenos detalhes, a que se referem a diferentes maneiras como as cristas papilares podem se tornar descontínuos. Por exemplo, uma crista papilar pode terminar abruptamente

(minúcia de terminação) ou pode se dividir em duas (minúcia de bifurcação) (MALTONI, 2003).

O inglês *Sir* Francis Galton, foi antropólogo, geógrafo, meteorologista, pesquisador tropical, fundador da psicologia diferencial e pioneiro da correlação estatística (BOUCHAR, 1997). Em 1886 Galton foi o primeiro a estudar a identificação pelas cristas papilares na área da biologia, e a categorizar as minúcias; porém sem estabelecer hereditariedade das linhas e nem referir que algumas são específicas de uma raça. Demonstrou que as impressões digitais eram imutáveis e que permaneciam iguais durante toda a vida do indivíduo, desde antes do seu nascimento, até sua morte. As cristas em regra, já estão formadas, desde o sexto mês da vida intra-uterina. Seu primeiro livro sobre impressões digitais de 1892, relata a anatomia dos desenhos digitais e descreve métodos práticos de registrá-los. Divide as impressões digitais em três grupos: arcos, presilhas e verticilos (COSTA, 2000). As minúcias algumas vezes são denominadas “detalhes de Galton”, em sua honra.

Cada impressão digital tem um conjunto único de minúcias que diferencia uma imagem de impressão digital da outra. O ANSI - *American National Standards Institute* em 1986 propôs, uma taxonomia para as minúcias baseada em quatro classes: cristas finais ou terminações, bifurcações, cruzamentos ou trifurcações (*crossovers*) e ponto indeterminante ou não determinado (Figura 14).

Figura 14 - Exemplo de minúcias identificadas em um datilograma
FONTE - KAZIENKO, (2003)

As minúcias ou pontos característicos, resumidamente, são classificados em duas categorias: aspectos básicos e aspectos compostos (Figura 15).

Figura 15 - Aspectos de impressões digitais - Detalhes de Galton
FONTE - MALTONI et al., (2003)

Os aspectos compostos são construídos a partir dos aspectos básicos. São aspectos básicos: cristas finais (*ridge ending*) e cristas bifurcadas (*bifurcation*) (MALTONI et al., 2003). Quanto aos aspectos compostos são citados: ilhas (*islands*), cristas curtas (*short ridge*), espora (*spur*), cruzamento (*crossover*). A crista final é definida como o ponto onde a crista termina abruptamente. A crista bifurcada é definida como o ponto onde a crista diverge dentro de cristas brancas, ou seja, vales (linhas brancas). Lagos ou ilhas são definidos como duas bifurcações conectadas. Cristas independentes ou curtas são definidas como cristas finais muito pequenas ou simplesmente como cristas quebradas. A espora é formada pela combinação de bifurcações e cristas finais. Cruzamentos ou pontes são definidos como duas ou mais bifurcações conectadas na vizinhança, ou seja, duas bifurcações com um caminho conectado (HRECHAK e MCHUGH, 1990; BOMBONATTI, 1984; KEHDY, 1968).

Para a verificação de impressões digitais é necessário que:

- haja coincidência no mínimo de doze pontos característicos (XIAO e RAAFAT, 1991b; ELECCIÓN, 1973).
- não exista discordância nenhuma entre estes pontos, ou seja, eles devem ser idênticos e ter a mesma localização. Na maioria dos países, esses critérios são requeridos legalmente para identificação em um caso criminal. Um típico leitor de impressão digital pode registrar mais de 20 pontos característicos (minúcias).

2.3.4 Os Tipos Fundamentais de Juan Vucetich

Posteriormente, Juan Vucetich, utilizando os estudos realizados por *Galton* na área de identificação, criou e colocou em funcionamento um sistema de identificação ou datiloscópico humano, através da impressão digital, enfocando, sobretudo, a classificação e o arquivamento das impressões digitais dos dez dedos das mãos.

Com base na classificação do sistema de Henry (1905), Vucetich apenas traduziu *arch* para arco, *loop* para presilha e *whorl* para verticilo. Como observou que nos tipos presilha e verticilo havia um pequeno acidente morfológico, também observado por Galton, denominou-o delta, cujo significado encontra-se na seção 2.3.1.

Estabeleceu também, que o tipo fundamental seria aquele revelado através do datilograma, independente da mão a que pertencesse e com base principalmente na presença ou ausência do delta (RABELLO, 1996):

Para facilitar o arquivamento de impressões digitais, Vucetich designou símbolos para cada tipo datiloscópico. Dessa forma, os símbolos literais A (arco), I (presilha interna), E (presilha externa), e V (verticilo) foram designados, nessa ordem, para indicar o tipo fundamental das impressões dos polegares. Os símbolos numéricos 1 (arco), 2 (presilha interna), 3 (presilha externa), e 4 (verticilo) foram empregados para designar o tipo fundamental das impressões dos demais dedos da mão (TAVARES JUNIOR, 1991). Vucetich dividiu os quatro tipos em símbolos para serem aplicadas às fichas decadatilares, nos quais letras representam os tipos do dedo polegar e números os demais dedos.

Junto a essa simbologia, Vucetich idealizou uma ficha datiloscópica na qual seriam coletadas as impressões digitais dos dez dedos da mão. Essa ficha, uma vez preenchida, receberia o nome de “*Individual Datiloscópica*”. Nessa ficha, há duas fileiras com cinco espaços cada. A fila superior seria destinada à coleta das impressões digitais dos dedos da mão direita, ou *série*. Na fila inferior, seriam coletadas as impressões dos dedos da mão esquerda, ou *seção*.

Em etapa posterior, Vucetich representou os datilogramas de uma ficha “*Individual Datiloscópica*” através de uma fração ordinária, no numerador seriam colocados os símbolos da série ou *Ser*, e no denominador os da seção ou *Sec*. A essa representação ele deu o nome “*Fórmula Datiloscópica*”, que é a descrição dos padrões de impressão digital dos dedos das mãos de um indivíduo. Supondo que uma pessoa

tenha seus datilogramas classificados conforme a Tabela 3, a “*Fórmula Datiloscópica*”, ou *FD*, desse indivíduo era dada pela fração apresentada em equação (1).

$$FD = \frac{Ser}{Sec} = \frac{V - 2221}{I - 3333} \quad (1)$$

Através deste processo, com o uso dos dez dedos da mão e com os quatro tipos datiloscópicos distintos, teoricamente seria possível, serem obtidos 1.048.576 fórmulas diferentes, de acordo com a seguinte demonstração na Tabela 2 (RABELLO, 1996):

Tabela 2 - Processo com uso dos dez dedos.

Séries (5 dedos)	4x4x4x4x4=1.024 séries
Seleção (5 dedos)	4x4x4x4x4=1.024 seções
Total	1024x1024=1.048.576 FDs

FONTE - KAZIENKO (2003).

Existem variações dos desenhos digitais chamadas subtipos, que podem ser constatadas em cada tipo fundamental. Tais subtipos possibilitam o desdobramento de datiloscópicas individuais de mesma fórmula, o que facilita a busca e identificação de indivíduos em grandes arquivos (RABELLO, 1996).

Um aspecto interessante de se perceber é que os tipos e subtipos datiloscópicos não identificam unicamente um indivíduo, uma vez que as fórmulas datiloscópicas podem repetir-se de uma pessoa para outra. Dessa forma, tanto o tipo quanto o subtipo datiloscópico não são suficientes para a verificação e prova da identidade de um datilograma. Mas limitam a busca em arquivos datiloscópicos, para indivíduos que possuem a mesma fórmula (RABELLO, 1996).

Tabela 3 - Esquema de classificação de datilograma.

Dedo	Mão direita	Mão esquerda
Polegar	V – Verticilo	I- Presilha Interna
Indicador	2- Presilha interna	3- Presilha Externa
Médio	2- Presilha interna	3- Presilha Externa
Anular	2- Presilha interna	3- Presilha Externa
Mínimo	1- Arco	3- Presilha Externa

FONTE - RABELLO, (1996).

Por outro lado, existem dois tipos de características mapeadas na impressão digital que podem ser mais eficazes na individualização dos datilogramas: as minúcias e os poros. Vale citar o sistema desenvolvido para uso interno pela NSA, Agência

Nacional de Segurança dos Estados Unidos, que utiliza poros para comparar impressões digitais. Tal sistema visa explorar a eficácia do uso de poros para automaticamente comparar impressões digitais (RABELLO, 1996).

2.3.5 O sistema do FBI (Federal Bureau of Investigation)

O modelo coordenado de minúcias do FBI considera apenas as terminações e bifurcações: cada minúcia é denotada por sua classe, as coordenadas x e y , e o ângulo entre a tangente à crista papilar da linha na posição da minúcia e o eixo horizontal (Figura 16 (a) e (b)). Na prática, existe uma ambigüidade entre terminação e bifurcação das minúcias; dependendo da pressão do dedo contra a superfície em que a impressão digital é obtida, terminações podem aparecer como bifurcações e vice versa (MALTONI et al., 2003).

Figura 16 - A minúcia de terminação: $[x_0, y_0]$ são as coordenadas da minúcia; θ é o ângulo que a tangente da minúcia forma com o eixo horizontal; b) uma minúcia de bifurcação: ângulo θ é definido por meio da minúcia de terminação correspondente a bifurcação original que existe na imagem negativa.

FONTE - MALTONI et al., (2003)

2.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou as mais relevantes características das impressões digitais para identificação de um indivíduo e como essas características são classificadas. Técnicas de compressão com perdas aplicadas para esse tipo de imagem devem ser utilizadas com cuidado, observando a preservação dessas características, para não comprometer o reconhecimento da impressão digital.

3 Compressão em imagens de impressão digital

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta alguns trabalhos sobre compressão de imagens de impressões digitais, usando a Transformada Discreta de Cosseno (DCT) e a Transformada de *Wavelets*.

3.2 Revisão dos artigos

Bradley e Brislawn (1994), em seu artigo, descrevem um novo padrão de compressão digital adotado pelo FBI para uso em imagens digitalizadas de impressão digital em escala de cinza. O algoritmo baseado na quantização escalar uniforme adaptativa, de uma decomposição de imagem na Transformada Discreta de *Wavelets* (DWT), foi denominado padrão *Wavelet* de Quantização Escalar (WSQ). Esse algoritmo produz imagens na taxa de compressão de 20:1, permitindo ao FBI trocar sua base de dados de cartões de papel de impressão digital, por imagem digital. Em 1994 o FBI possuía ao redor de 114 milhões de cartões de impressão digital criminal, representando cerca de 29 milhões de indivíduos. Em resposta à crescente demanda por identificação rápida de impressões digitais, o FBI, converteu sua base de dados, do papel para o formato eletrônico. Imagens de impressão digital foram digitalizadas na resolução de 500 *pixels*/polegada, e 8 *bits* por *pixel*. Neste nível de resolução, uma única impressão digital rolada de 1.5 x 1.6 polegada, gera cerca de 600 Kbytes de dado digital, e um cartão inteiro produz cerca de 10 *Mbytes*. Sem compressão de dados, essa base de dados do FBI produziria ao redor de 1.140 *terabytes* de dados de imagem. Além das

considerações sobre a base de dados há custos significativos de comunicação, envolvendo a digitalização de impressão digital. A transmissão de um único cartão de impressão digital nas linhas telefônicas na taxa de 9600 *baud* levaria cerca de três horas.

A Divisão de Serviços de Informação da Justiça Criminal do FBI, junto com os pesquisadores do Laboratório Nacional de *Los Alamos* e o Instituto Nacional de padrões e Tecnologia, desenvolveram padrões nacionais para digitalização de impressão digital e compressão de imagem com perdas. O algoritmo de compressão descrito (BRADLEY e BRISLAWN, 1994) utiliza quantização escalar uniforme adaptativa, de uma decomposição de imagem com DWT, com 64 sub-bandas, seguida por codificação por *Huffman*. A especificação oficial é denominada como padrão *Wavelet* de Quantização Escalar (WSQ). A Figura 17 mostra as etapas para codificação e decodificação da imagem.

Figura 17 - Diagrama simplificado mostrando a codificação e decodificação WSQ.
FONTE - (BRADLEY e BRISLAWN, 1994).

A compressão de imagens de impressão digital utilizando a Transformada de *Wavelets* seguida pelo vetor de quantização foi abordada no trabalho de Shnaider e Paplinski (1996). Os resultados obtidos foram comparados com a técnica de compressão WSQ utilizada pelo FBI. Devido ao uso do vetor no lugar da quantização escalar, foi observada uma expansão *wavelet* simplificada, com estrutura em árvore. Isso conduziu à significativa redução no tempo de codificação, sem perda considerável na qualidade das imagens reconstruídas. O método foi testado com imagens de impressão digital. A comparação desse método com o padrão de compressão do FBI mostrou que o método desenvolvido obteve velocidade superior de codificação e ao mesmo tempo, manteve a

relação sinal-ruído similar, podendo ser utilizado como um padrão alternativo para o FBI.

Gökmen et al., (1996), apresentam um eficiente modelo de compressão de imagens de impressão digital baseado em um modelo híbrido de imagem. Esse método utiliza a extração de vales e contornos do cume, seguido da reconstrução de superfícies híbridas usando níveis de cinza desses contornos. O modelo híbrido utilizado é a combinação convexa de funcionais de membrana e placa, usadas para reconstrução da superfície por regularização (GÖKMEN, 1993; GÖKMEN e JAIN, 1995). Dois parâmetros desse modelo são determinados para obter uma boa aproximação da imagem de impressão digital, a partir dos valores esparsos dos cumes e vales.

Neste esquema de compressão, os contornos dos cumes são eficientemente codificados com uso de um código de cadeia diferencial, enquanto as diferenças entre os níveis consecutivos de cinza ao longo das cadeias são codificadas com a codificação de *Huffman*. São também incluídos na imagem comprimida, os valores médios de cada segmento do vale e dois parâmetros do modelo híbrido. Uma vantagem dessa aproximação, comparada com os algoritmos baseados em transformada e algoritmos baseados em *wavelets*, é que características tais como o delta e pontos do núcleo, pontos finais e pontos de bifurcação podem ser extraídos diretamente da imagem de compressão, mesmo para alto valor de taxa de compressão. O algoritmo foi aplicado a várias imagens de impressão digital, obtendo-se altas taxa de compressão, como por exemplo, 45:1 e ao mesmo tempo conservou todas as importantes características das imagens. As Figuras 18 e 19 mostram os resultados obtidos.

Figura 18 - Imagem original da impressão digital (esquerda) e imagem com os contornos de cumes afinados.

FONTE - Gökmen et.al., (1996)

Figura 19 - Impressões digitais ampliadas: (a) imagem original da impressão digital, e impressões digitais reconstruídas (b) método proposto, (c) do JPEG, e (d) do WSQ.
FONTE - Gökmen et.al., (1996)

A Figura 19 mostra resultados da comparação desse método com o algoritmo JPEG e com o método WSQ. O algoritmo JPEG (Figura 19(c)) cria elementos de bloco para alta taxa de compressão, tornando difícil a extração de características para finalidades de classificação e de identificação desta imagem. O método WSQ (*Wavelet Scalar Quantization*) (Figura 19(d)), é complexo, borra a imagem e altera a forma dos cumes resultando em características falsas. A imagem comprimida com o método proposto, ilustrado na Figura 19(b), preserva os contornos do cume em cada caso, permitindo a extração de todas as características. Além disso, o método proposto provê melhor imagem reconstruída quando qualitativamente avaliado. Com base nos resultados obtidos, a conclusão apresentada no artigo é que o algoritmo proposto é muito útil para finalidades da classificação e da identificação de imagens de impressão digital, assim como para a recuperação baseada no conteúdo de um arquivo de impressões digitais.

O trabalho de Grgic et al., (2003), apresenta estudos comparativos dos codificadores de imagem JPEG e JPEG2000, usando duas medidas de qualidade da imagem: Relação Sinal-Ruído de Pico – PSNR, como medida objetiva, e Escala de Qualidade da imagem – PQS, como medida quantitativa. JPEG e JPEG2000 usam técnicas de compressão diferentes, o que introduz diferentes tipos de distorção nas imagens. Para descrever essas distorções foram usadas quatro imagens teste, com características espaciais e de frequência diferentes, mostradas na Figura 20. As quatro imagens teste foram codificadas e decodificadas usando os algoritmos de compressão JPEG e JPEG2000. O JPEG usa a técnica de compressão por DCT (Transformada do Cosseno Discreta), com tamanho de bloco 8x8, onde os coeficientes DC de todos os

blocos são codificados separadamente, usando um esquema de previsão. O JPEG2000 usa a Transformada Discreta de *Wavelets* (DWT), implementando dois tipos de filtros *Wavelets*: o filtro *Daubechies* 9/7 e o 5/3. Devido à melhor desempenho identificado visualmente (aparentemente sem perdas), o filtro 9/7 é usado como *default*.

Na avaliação dos resultados, a medida *PSNR* mostrou que com o JPEG2000 foram obtidas imagens de melhor qualidade que o JPEG para todas as taxas de bits e imagens testadas. Mas a medida PQS mostrou resultados diferentes. JPEG oferece melhor compressão para taxas de bit médias e altas (acima de 1bpp). Os autores propuseram a aplicação do JPEG para taxas de bit moderadas pela boa qualidade da imagem e menor complexidade computacional. Para baixas taxas de bit (abaixo de 0,25 bits/pixel) a distorção da imagem JPEG tornou-se inaceitável comparada ao JPEG2000, que introduz distorções significativamente menores. A complexidade computacional do JPEG2000 é muito mais alta. Para as imagens de impressão digital avaliadas, o JPEG2000 apresentou melhores resultados.

Figura 20 - Imagens de teste.
FONTE - Grgic et al., (2003)

Ashino et al., (2003), propõem um método híbrido que combina *Wavelets* e decomposição de valor singular. Apresentam, também estudos comparativos da técnica de compressão de imagem que usa decomposição de valor singular (SVD) em multi-resolução, com as seguintes técnicas: Transformada Discreta do Cosseno, Transformada Discreta de *Wavelets* biortogonal 9/7, Transformada Karhunen-Loève e Transformada *Wavelet*-SVD híbrida. A compressão usa particionamento por conjunto em árvores hierárquicas (SPIHT) e codificação *Huffman* por tamanho variável. O desempenho desses métodos foi testado através de experimentos numéricos sobre várias imagens conhecidas, e mostrou que difere pouco de um método para o outro, para taxa de compressão moderada. De uma maneira geral, a Transformada Discreta de *Wavelets* biortogonal 9/7 apresentou resultados superiores para a maioria das imagens que foram testadas para uma dada taxa de compressão. Mas para algumas transformadas por bloco e certos tipos de imagens, outros métodos são ligeiramente superiores.

Para as imagens teste da Figura 21 foram obtidas as seguintes conclusões:

- para alta taxa de compressão (pequeno bpp), o efeito de bloco tornou-se evidente para as técnicas SVD, KLT, e JPEG;
- para imagens de impressão digital o método proposto mostrou-se superior aos demais;
- para a imagem (d), os filtros SVD 2x2 e KLT 2x2 quando se usa poucos níveis de cinza; a performance foi melhor;
- para outras imagens, o método proposto é ligeiramente inferior à Transformada de *Wavelets* biortogonal 4/4, mas é superior a SVD, KLT, e JPEG.

Figura 21 - imagens utilizadas na avaliação do método híbrido.
FONTE - Ashino et al., (2003)

Figuerola e Villanueva et al., (2003) descrevem um conjunto de experimentos realizados para comparar o desempenho da técnica WSQ (*Wavelet Scalar Quantization*), utilizada pelo FBI para compressão de imagens de impressão digital, com a técnica JPEG 2000. A principal vantagem da técnica WSQ está na sua superioridade em preservar as características das minúcias para altas taxas de compressão, o que o padrão JPEG não é capaz de preservar. Com o advento do JPEG 2000 para compressão de imagens, cuja implementação foi baseada em Transformadas de *Wavelets*, surgiu a motivação de investigar se persistem as mesmas vantagens da técnica WSQ.

Duas métricas foram utilizadas para comparar a performance das duas técnicas: Relação Sinal Ruído de Pico (PSNR) e análise ROC. Na análise ROC, foi utilizado um identificador de impressão digital da IBM, para o qual foi apresentado um par de imagens, a original e a reconstruída. Esse identificador retorna um valor entre 0 e 100 para cada par de imagens indicando a similaridade entre elas. Um limiar pode então ser definido para estabelecer se houve o casamento do par de imagens ou não. Uma curva ROC é obtida, calculando a falsa rejeição e a falsa aceitação em diferentes pontos de operação conforme determinado pelo valor de limiar. Essa métrica, a análise ROC,

avalia a degradação de desempenho devido à compressão, enquanto que PSNR tende a descrever a distorção visual.

Além disso, foi avaliado se foi significativa a diferença entre os valores PSNR das duas técnicas, e a diferença entre as curvas ROC. Os resultados mostraram que a técnica JPEG 2000 apresentou os melhores resultados em relação à WSQ para altas taxas de bit.

Rigotti (2004) descreve um sistema de compressão de imagens monocromáticas usando a Transformada Discreta do Cosseno. Esse sistema foi implementado com base no sistema de codificação adaptativa usando a DCT e a divisão por classes de energia, descrito no trabalho de Chen e Smith, (1977). Em seguida foi comparado com outros similares, usando-se a qualidade subjetiva, visual, da imagem reconstruída, o Erro Quadrático Médio - MSE, a Relação Sinal/Ruído-SNR e a Entropia. Os resultados obtidos pelo sistema proposto mostraram que, apesar de se obter uma boa compressão, a qualidade final da imagem reconstruída ficou abaixo da qualidade obtida pelos sistemas utilizados para comparação, principalmente pelo efeito de blocagem e pela maneira como foi implementada a quantização. Os sistemas utilizados para comparação empregaram diferentes técnicas para aperfeiçoamento do sistema de Chen (CHEN e SMIT,1977), por exemplo, sistemas de bloco variável e codificação de borda.

Figura 22 - (a) Lena reconstruída. (b) Lena original. - 256×256 . Taxa de codificação: 1 bit/pixel. FONTE - Rigotti (2004)

A Figura 22 (a) mostra o resultado obtido pela compressão e a ocorrência da blocagem na imagem reconstruída. Em 22 (b) é apresentada a imagem original.

Fonseca (2004), em seu trabalho, apresenta um estudo comparativo de algumas famílias de bases *wavelet* como as bases de *Haar*, Daubechies, Biorthogonal, *Coiflets* e Symlets, usadas para compressão de um conjunto de imagens. O objetivo do trabalho foi definir quais bases apresentam melhor qualidade de compressão. A avaliação das imagens, original e comprimida foi feita através da avaliação qualitativa e quantitativa usando as seguintes funções: Erro Médio Quadrático (RMSE), Relação Sinal Ruído

(SNR) e a Relação Sinal Ruído de Pico (PSNR). O autor concluiu que para aplicação em compressão de imagens usando a Transformada de *Wavelets*, foi a base de *Haar* que demonstrou melhor desempenho global, com menor degradação da imagem, em relação às outras famílias testadas.

Grasemann e Miikkulainen (2005), consideram que os codificadores de imagem baseados em *wavelets*, diferentemente da técnica DCT, dependem da escolha da *wavelet*. Este problema normalmente é contornado, usando *wavelets* padrões que não são especialmente adaptadas para dada imagem, mas conhecidas pela boa performance em imagens fotográficas. Entretanto, muitas classes de imagens comuns não apresentam as mesmas propriedades estatísticas que as imagens fotográficas, como por exemplo, imagens de impressões digitais, imagens médicas, imagens de documentos obtidos por *scanners* e imagens de satélites. As *wavelets* padrões usadas em codificadores de imagem, freqüentemente não se adequam a elas, resultando em qualidade de imagem ou compressão de qualidade inferior. Além disso, imagens não fotográficas freqüentemente são armazenadas em grandes bases de dados de imagens similares, enfatizando a importância de ser encontrada uma *wavelet* adaptada especialmente para essas imagens. Com base nessas considerações os autores propõem um algoritmo genético (GA), baseado em sub-populações pré-definidas, e uma técnica matemática, denominada *lifting*, usada para encontrar *wavelets* que são especialmente adaptadas para uma classe particular de imagens. Esta aproximação foi testada no domínio da compressão de imagens de impressão digital e comparada a outras. As *wavelets* encontradas pelo algoritmo genético foram testadas e comparadas com as *wavelets* padrão, mostrando ser consistentemente superiores (inclusive ao codificador JPEG). Para avaliar as imagens resultantes foi utilizada a Relação Sinal Ruído de Pico (PSNR), e a imagem de erro (subtração *pixel a pixel* da imagem comprimida e original), que permite separar os erros dos dados da imagem tornando a comparação mais fácil.

A Figura 23 mostra as *wavelets* ganhadoras na parte superior, e na parte inferior as imagens comprimidas em 16:1, podendo-se observar o progresso da evolução para as gerações 1, 10, 20 e 50. Nas gerações sucessivas ocorre melhoria da qualidade da imagem e da suavização das *wavelets*.

Figura 23 - linha superior: *Wavelet* ganhadora - linha inferior: evolução mostrando as gerações 1, 10, 20 e 50.

FONTE - Grasemann e Mäikkiläinen (2005)

Em Belc et al., (2005) é apresentada uma análise da comparação de desempenho da Transformada de Fourier (FT), Transformada Discreta do Cosseno (DCT), Transformada de *Wavelets* (WT), *Wavelet Packets* (WP) em mamograma de 12 bits, resolução de 1024 x 1024, e imagem de impressão digital de 8 bits, com resolução de 512 x 256. Nos métodos de análise de multi-resolução foram utilizados três a cinco níveis de decomposição e modelos diferentes de entropia em todos os níveis de decomposição. Um algoritmo adaptável de decomposição do sinal foi introduzido para minimizar a árvore de decomposição.

As imagens foram segmentadas primeiramente em duas regiões: região de interesse (por exemplo, região de microcalcificação em imagens de mamogramas), e região de fundo. As duas regiões foram então comprimidas em dois níveis diferentes, para melhor preservar a informação na imagem e principalmente na região de interesse.

Para avaliar a qualidade das imagens comprimidas resultantes estas foram submetidas à análise visual de um grupo de 30 estudantes não especialistas, e foram também analisadas de forma objetiva utilizando-se a relação Sinal Ruído de Pico (PSNR), Erro Médio Quadrático (MSE), e erro de reconstrução.

Os autores sugerem que potencialmente este estudo pode auxiliar radiologistas e peritos de impressão digital a detectar, de forma mais acurada, os detalhes importantes nas imagens. Além disso, os resultados mostraram ter ocorrido reduções do espaço para armazenamento e do tempo de acesso e também melhoria na precisão do diagnóstico, resultando em redução de custos. As imagens comprimidas são também mais adequadas

para transferência e acesso remoto, para tele-diagnósticos e para pesquisa e treinamento em tele-medicina.

O trabalho de Esakkirajan et al., (2006) apresenta nova técnica de codificação de impressão digital baseada na transformada *contourlet* e na quantização vetorial de múltiplos estágios (MSVQ). As *wavelets* têm mostrado habilidade em representar imagens naturais contendo áreas suavizadas separadas com bordas. Entretanto, as *wavelets* não podem obter vantagem de forma eficiente, pelo fato das bordas geralmente encontradas nas impressões digitais, serem curvas suaves. Esta questão é melhor tratada pelas transformadas direcionais conhecidas como *contourlets*, que têm a propriedade de preservar bordas. A transformada *contourlet* é uma nova extensão da transformada *wavelet* em duas dimensões, usando bancos de filtros direcionais e não separáveis. Os requisitos para cálculo e armazenamento são a principal dificuldade para implementar um quantizador vetorial. No algoritmo da pesquisa completa, a complexidade do cálculo e do armazenamento é uma função exponencial do número de bits usados na quantização de cada frame da informação espectral. O requisito de armazenamento em uma quantização vetorial de múltiplo estágio é menor quando comparado à quantização vetorial de pesquisa completa. Os coeficientes da transformada *contourlet* são quantizados por quantização vetorial de múltiplo estágio. Os coeficientes quantizados são codificados pela codificação de *Huffman*.

Para avaliação da técnica foram utilizados diferentes tipos de impressão digital. Os resultados obtidos foram comparados com as *wavelets* baseadas em MSVQ. A Relação Sinal Ruído de Pico (PSNR) obtida, foi maior para a transformada *countourlet* do que para a transformada *wavelet*. A conclusão foi que é possível a melhor reconstrução da imagem com menor número de bits, utilizando a transformada *countourlet*. Na pesquisa foram consideradas combinações de quatro filtros. Os resultados experimentais mostraram que a quantização vetorial de múltiplos estágios (MSVQ) é conveniente para codificação de imagens com baixa taxa de bits. O esquema proposto gerou saídas codificadas de boa qualidade, ao redor de 0.5 bits por dimensão (bpd), e produziu resultados muito bons, próximos de 1 bpd. Este esquema pode ser estendido de forma a incluir mais estágios na MSQV, melhorando a qualidade da imagem de saída.

3.3 Considerações finais

Esse capítulo apresentou técnicas de compressão aplicadas principalmente para imagens de impressão digital. A revisão mostra que, ultimamente, a Transformada de *Wavelets* tem sido uma das técnicas mais utilizadas, normalmente associada a outra técnica. De acordo com Grasmann e Miikkulainen (2005) a qualidade dos resultados obtidos para imagens de impressão digital depende da escolha da *Wavelet*.

4 Compressão de Dados

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo descreve a base teórica referente às seguintes técnicas que serão utilizadas para implementação da compressão de imagens de impressão digital: Transformada Discreta do Cosseno (DCT) e Transformada de *Wavelets*. Para a Transformada de *Wavelets* será apresentada a teoria referente à *wavelet* de *Haar* e às *wavelets* de *Daubechies*.

4.2 Introdução

A compressão de dados é uma forma de codificar um grupo de informações de maneira que o código gerado seja menor que o código fonte. As aplicações de compressão são inúmeras, tanto em hardware quanto em software, e os codificadores podem ser classificados em dois tipos básicos: com perda e sem perda de informação.

O início dos trabalhos na área de compressão de dados aconteceu na década de 50. Dois trabalhos influenciaram a compactação de dados até a década de 70:

- o primeiro foi o trabalho de *Huffman*, (1952), que permitiu a representação de caracteres em forma binária, a partir de sua probabilidade de ocorrência. Esta representação é gerada por um sistema de decodificação em árvore binária, o que impede a ambigüidade na análise do código.

- o segundo foi o trabalho popularmente conhecido como *Shannon-Fano* de *Shannon* e *Fano* (MARK, 1992), que descobriram uma forma de codificação que é construída por uma árvore descendente, partindo sucessivamente da tabela de frequências a partir de valores mais elevados dos *pixels* da imagem (PEREIRA, 2005).

Atualmente existe grande variedade de métodos de compressão com perdas, de imagens digitais, e vasta literatura sobre o tema (RABBANI e JONES, 1991; CLARKE, 1995; SAYOOD, 1996). Cada método explora uma determinada característica da imagem, manipulando-a de forma a alcançar alta taxa de compressão com a perda de qualidade visual menor possível.

As técnicas de compressão de interesse para este trabalho baseiam-se na modificação da transformada de uma imagem. Em codificação por transformada, uma transformada linear reversível, como a Transformada de Fourier, é usada para mapear a imagem a um conjunto de coeficientes de transformada que então, são quantizados e codificados (GONZALEZ, 2000).

A Figura 24 mostra um típico sistema de codificação por transformada. Na Figura 24(a) uma imagem de entrada $N \times N$ é subdividida em sub-imagens de tamanho $n \times n$. No estágio seguinte é aplicada a transformada nessas sub-imagens gerando $(N/n)^2$ sub-imagens $n \times n$ de transformadas. O objetivo do processo da transformada é descorrelacionar os pixels de cada sub-imagem, ou compactar o máximo possível a informação, em um número menor de coeficientes de transformada. O estágio de quantização elimina ou quantiza seletivamente de modo mais grosseiro os coeficientes que carregam menos informação, e que apresentam menor contribuição para a qualidade da imagem reconstruída. No estágio final são codificados os coeficientes quantizados, normalmente usando um código de tamanho variável.

Quando todos os passos para a codificação por transformada são fixos para todas as imagens, a codificação é denominada codificação não adaptativa por transformada. Se um ou todos os passos de codificação são adaptados para o conteúdo local da imagem a codificação é denominada codificação adaptativa por transformada.

É importante ressaltar que a compressão é alcançada durante a quantização dos coeficientes da transformada e não durante a transformada.

Na Figura 24(b) o decodificador realiza a seqüência inversa de passos do codificador, exceto pelo estágio de quantização.

Figura 24 - Sistema de codificação por transformada.
FONTE – GONZALEZ, (2000)

4.2.1 A seleção da transformada

A escolha de uma transformada para dada aplicação depende da quantidade de erro de reconstrução que pode ser tolerado, assim como dos recursos computacionais disponíveis.

Diversos sistemas de codificação por transformadas com base nas transformadas de Karhunen-Loève (KLT), Fourier discreta (DFT), Walsh-Hadamard (WHT), Cosseno discreta (DCT) e muitas outras têm sido construídos e/ou estudadas.

A maioria dos sistemas práticos de codificação por transformada baseia-se na DCT, que apresenta bom compromisso entre a habilidade de empacotar a informação e a complexidade computacional. A DCT tem a vantagem para a maioria das imagens naturais de empacotar a maior parte da informação no menor número de coeficientes, e de minimizar a aparência de blocos (artefatos de blocos), que resulta quando as fronteiras entre as sub-imagens se tornam visíveis (GONZALEZ 2000).

A DCT, por suas propriedades, tornou-se padrão internacional para sistemas de codificação por transformadas (usada no padrão JPEG (*Joint Photographic Experts Group*)). Outra técnica de compressão alternativa à DCT, usada mais recentemente, é a transformada *Wavelet*, presente no formato JPEG 2000 (SAHA, 2000).

4.2.2 Seleção do tamanho da sub-imagem

O tamanho da sub-imagem afeta o erro de codificação da transformada e a complexidade computacional. Na maioria das aplicações a dimensão da sub-imagem é escolhida como a potência inteira de 2, o que simplifica o cálculo das transformadas da sub-imagem. Geralmente tanto o nível de compressão quanto a complexidade computacional aumentam à medida que aumenta o tamanho da sub-imagem (GONZALEZ 2000; SANTOS 1994).

O valor do erro tende a estabilizar-se no caso da Transformada Discreta do Cosseno.

A Figura 25 mostra o gráfico do erro de reconstrução da codificação por transformada, em função do tamanho da sub-imagem, para três transformadas incluindo a do Cosseno. Observa-se que para as três transformadas o erro decresce com o aumento do tamanho da sub-imagem. Além disso, para a Transformada do Cosseno a curva de erro tende a se estabilizar a partir de sub imagens com tamanho 8x8. Assim, o tamanho de sub-imagens mais utilizado é 8x8 e 16x16.

Figura 25 - Erro de reconstrução x tamanho da sub-imagem.
FONTE -GONZALEZ, (2000)

4.2.3 Alocação de bits

O processo geral de truncamento, quantização e codificação dos coeficientes de uma sub-imagem transformada, normalmente é denominado alocação de bits.

A codificação por transformada explora a propriedade de compactação da energia e apenas uma pequena quantia dos coeficientes é codificada e quantizada.

Basicamente existem dois tipos de estratégias usadas para determinar quais coeficientes serão codificados: a amostragem por zona e a amostragem por limiar (SANTOS, 1994).

4.2.3.1 Amostragem por zona

Na amostragem por zona somente os coeficientes dentro de uma região especificada são codificados para a transmissão. A Figura 26 mostra duas formas típicas de amostragem por zona, usadas na DCT. Os coeficientes das regiões sombreadas são codificados enquanto os demais são descartados e definidos como zero.

Figura 26 - Exemplo de regiões usadas na amostragem por zona na DCT.
FONTE - SANTOS, (1994)

4.2.3.2 Amostragem por limiar

Na amostragem por limiar, é codificado cada coeficiente cuja magnitude ultrapasse um dado limiar.

Do ponto de vista da compactação de energia, amostragem por limiar é preferível à amostragem por zona, uma vez que na amostragem por zona alguns coeficientes com magnitudes pequenas podem ser codificados enquanto aqueles com magnitudes maiores são descartados, pois as zonas são pré-especificadas. Na amostragem por limiar somente os coeficientes com grandes magnitudes são selecionados. Contudo, além dos coeficientes, é necessário transmitir a informação de suas posições. Se por um lado este método melhora o desempenho da codificação, por

outro a complexidade pode aumentar pelo fato do número de coeficientes a serem transmitidos variarem com o bloco.

O método de amostragem por limiar pode ser considerado um método adaptativo de codificação, uma vez que os coeficientes a serem transmitidos podem variar de bloco para bloco (SANTOS, 1994; GONZALEZ, 2000).

4.3 Transformada Discreta do Cosseno (DCT)

A Transformada Discreta do Cosseno (DCT) representa uma imagem como uma soma de cossenos com diferentes frequências e magnitudes. A DCT tem a propriedade para uma dada imagem que a maioria da informação significativa visualmente estará concentrada em poucos coeficientes da DCT. Por esta razão, freqüentemente, ela é usada em aplicações de compressão de imagem.

Desenvolvida por Ahmed, Natarajan, e Rao em 1978 (WATSON, 1994), a DCT tem parentesco com a transformada discreta de Fourier (DFT), revela-se uma boa aproximação da transformada de *Karhunen-Loève*, e resulta em ótima compressão, pois converte um bloco de *pixels* em uma matriz de coeficientes, descorrelacionando a informação da imagem. Além disso, a imagem reconstruída (descomprimida) aproxima-se bastante da original (RIGOTTI, 2004).

A DCT bidimensional de uma matriz (A) com dimensões (MxN), é definida pela equação (2).

$$B_{pq} = \alpha_p \alpha_q \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{mn} \cos \frac{\pi (2m+1)p}{2M} \cos \frac{\pi (2n+1)q}{2N}, \quad (2)$$

onde: $0 \leq q \leq N-1$ e $0 \leq p \leq M-1$

$$\text{e: } \alpha_p = \begin{cases} 1/\sqrt{M}, & p=0 \\ \sqrt{2/M}, & 1 \leq p \leq M-1 \end{cases} \quad \alpha_q = \begin{cases} 1/\sqrt{N}, & q=0 \\ \sqrt{2/N}, & 1 \leq q \leq N-1 \end{cases}$$

Os valores B_{pq} são chamados coeficientes de DCT da matriz (A).

A transformada inversa da DCT é dada pela equação (3):

$$A_{mn} = \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \alpha_p \alpha_q B_{pq} \cos \frac{\pi (2m+1)p}{2M} \cos \frac{\pi (2n+1)q}{2N}, \quad (3)$$

onde: $0 \leq m \leq M-1$ e $0 \leq n \leq N-1$

$$\text{e: } \alpha_p = \begin{cases} 1/\sqrt{M}, & p=0 \\ \sqrt{2/M}, & 1 \leq p \leq M-1 \end{cases} \quad \alpha_q = \begin{cases} 1/\sqrt{N}, & q=0 \\ \sqrt{2/N}, & 1 \leq q \leq N-1 \end{cases}$$

A equação inversa da DCT pode ser interpretada como significando que qualquer matriz A, com dimensões M x N, pode ser escrita como uma soma de MN funções F como mostrado na equação 4.

$$F = \alpha_p \alpha_q \cos \frac{\pi (2m+1)p}{2M} \cos \frac{\pi (2n+1)q}{2N} \quad (4)$$

em que: $0 \leq p \leq M-1$ e $0 \leq q \leq N-1$

Estas funções são denominadas funções base da DCT. Os coeficientes B_{pq} podem então ser vistos como pesos aplicados a cada função base.

Como mencionado na seção 4.2, ao se usar DCT em codificação de imagens, não se costuma calcular uma única DCT para a imagem toda, pois isso exigiria um número muito grande de cálculos. A alternativa adotada é segmentar a imagem em blocos (Figura 27) e calcular a DCT para cada um deles. As seguintes considerações são importantes:

- um tamanho grande de bloco conduz à maior eficiência de codificação, mas requer maior poder computacional;
- são usados tipicamente blocos de 8x8 ou 16x16 *pixels*, sendo que blocos de 8x8 apresentam bom compromisso (*tradeoff*) entre a eficiência de compressão e a complexidade computacional;
- uma melhor eficiência de compressão pode ser alcançada com uso de blocos de diferentes dimensões, entretanto, isto aumenta a complexidade computacional.

Para bloco com tamanho de 8x8, as 64 funções base são ilustradas pela Figura 27. Nessa figura a frequência horizontal aumenta da esquerda para a direita e a frequência vertical aumenta de cima para baixo. A função base de valor constante no canto superior esquerdo é chamada função base DC; o coeficiente DCT correspondente B_{00} , chamado coeficiente DC, é o que apresenta a maior magnitude no bloco.

Figura 27- A matriz 8x8 das funções base
FONTE – (Toolbox do Matlab 07)

Os coeficientes (transformados) iniciais do bloco contêm as informações mais importantes da imagem; assim, deve-se garantir o armazenamento de certo número de coeficientes com baixos índices de posição. Por outro lado, como a transformada fornece uma série de cossenos (que no limite é convergente), os coeficientes diminuem em amplitude conforme crescem os índices. Portanto, pode-se, quantizar os coeficientes por zona, diminuindo-os e mesmo eliminando os menos significantes, obtendo o principal ganho na taxa de compressão (SILVA, 1998).

Na Figura 28 são mostradas quatro situações distintas, nas quais se podem notar sensíveis mudanças em relação à qualidade de imagem. Em todos os casos foi aplicada a DCT com blocos de tamanho 8 x 8 *pixels*. No primeiro caso, Figura 28 (a), apenas a componente DC da imagem foi utilizada e os outros 63 coeficientes foram considerados iguais a zero. No segundo caso, Figura 28(b), considerou-se a componente DC e mais dois componentes AC, melhorando a definição da imagem. No terceiro caso, Figura 28(c), considerou-se a componente DC e mais nove componentes AC, introduzindo mais detalhes na imagem reconstruída. Na Figura 28(d) são usados todos os

coeficientes, observando-se com isso cópia fiel em relação à figura original, sem perda de informações (HERZ et al., 2002).

(a) somente componente DC

(b) componente DC +2 AC mais baixos

(c) componente DC + 9 AC mais baixos

(d) todos os 64 coeficientes

Figura 28 - Exemplo de aplicação da DCT utilizando coeficientes pré-determinados na reconstrução da imagem.

FONTE - HERZ et al., (2002)

Segundo HERZ et al., (2002), ao se fazer um *download* de uma imagem no formato JPEG, esta vai se tornando progressivamente mais nítida, pelo fato de serem enviados primeiramente os coeficientes DC das transformadas DCT, e depois, gradativamente os coeficientes AC, iniciando por aqueles de frequência mais baixa.

4.4 Transformada de *Wavelets*

Nesta seção são apresentados os conceitos da Transformada de *Wavelets* e mais detalhadamente os seguintes tipos de *wavelets*: *wavelet* de *Haar* e *wavelets* de *Daubechies*.

4.4.1 Introdução

As *wavelets* são aproximações que usam superposição de funções. Existem desde o início do século XIX, quando Joseph Fourier descobriu ser possível representar funções periódicas através de funções seno e cosseno.

A Transformada de *Wavelets* pode ser vista como técnica por janelas, com dimensão variável da janela, o que permite avaliação do sinal sob análise, no espaço tempo x frequência, e a identificação de quais componentes espectrais existem em um dado intervalo de tempo. Esse é um dos aspectos que a diferencia da Transformada de Fourier por janelas (WFT - *Window Fourier Transform*), em que uma vez definido o tamanho da janela do tempo, ele permanece constante para todas as frequências. Essa característica da Transformada de *Wavelets* torna-a mais apropriada também, para aproximar funções com descontinuidade.

O procedimento de análise por *wavelets* consiste em adotar uma função base *wavelet*, denominada *wavelet* mãe, que serve como protótipo para todas as janelas usadas no processo. As janelas usadas são versões dilatadas ou comprimidas da *wavelet* mãe, também podendo ser transladadas no tempo.

As *wavelets* são usadas em diferentes campos da pesquisa aplicada tais como astronomia, acústica, engenharia nuclear, codificação em sub-bandas, neurofisiologia, música, ressonância magnética, reconhecimento de voz, ótica, fractais, turbulência, previsão de terremoto, radar, visão humana, equações diferencial parciais, processamento de sinais e imagem (GRASP, 1995).

4.4.2 Introdução Histórica

As raízes das *wavelets* encontram-se no trabalho de Karl Weierstrass que, em 1873, descreveu uma família de funções construídas a partir de uma função base, na qual foi aplicado um fator de escala, de forma a expandir ou comprimir a função base.

Outro marco importante foi a construção da primeira família *wavelet* ortonormal de suporte compacto (não nulas em um intervalo finito), em 1909, por Alfred Haar quando trabalhava na construção de bases para representar funções integráveis quadraticamente. Essa família *wavelet* ficou conhecida como base de *Haar*.

O termo "*wavelet*" veio do campo da sismologia, criado por Ricker em 1940, para descrever a perturbação proveniente de um impulso sísmico agudo ou de carga explosiva. Em 1982 Morlet mostrou como essas *wavelets* sísmicas podiam ser modeladas com as funções matemáticas definidas por Dennis Gabor em 1946. Mais à frente mostrou como quaisquer sinais podiam ser analisados em translações e escalas de uma única função *wavelet* mãe. As teorias de Morlet e seu colaborador, o físico Alex Grossman, revelaram os elementos unificadores de várias teorias já estabelecidas:

- Matemática aplicada: expansão em séries de funções (Alfred Haar, Yves Meyer, Ingrid Daubechies).
- Processamento de imagens: visão computacional, análise multi-resolução de imagens (para o reconhecimento de bordas e movimento), algoritmos piramidais (Stephane Mallat).
- Telecomunicações: codificação por sub-bandas e filtros em quadratura de fase, para transmissão de dados via linha telefônica (Stephane Mallat, Yves Meyer).

Em, 1986, S. Mallat e Y. Meyer desenvolveram a teoria da análise em multi - resolução, que permitiu uma documentação e gerou uma ferramenta para a construção de outras bases (DAUBECHIES, 1992).

Em 1987, Tchamitchian construiu o primeiro exemplo do que se pode chamar de base *wavelet* bi-ortogonal.

A descoberta de bases ortonormais na forma matemática e de suporte compacto (não nulas em um intervalo finito), é devida a Ingrid Daubechies, (1987), inspirada nos trabalhos de Mallat. Daubechies estendeu o trabalho de Haar, sintetizando a família de *wavelets* ortonormais, possibilitando análise e síntese mais eficientes do que a obtida com outros sistemas (como o de Haar). Desde então, ano após ano, o número de contribuições teóricas e práticas no campo das *wavelets*, cresceram exponencialmente, assim como a difusão de seu uso em inúmeras áreas, incluindo compressão de imagens e processamento gráfico em multi-resolução (KAVRAKI et. al., 1994 e 1995).

4.4.3 Transformada de *Wavelets*: contínua e discreta

Há duas versões diferentes da Transformada de *Wavelets*, a contínua e a discreta. A contínua, análoga à Transformada de Fourier, é usada principalmente em análise e caracterização de detalhes de sinais. A discreta, análoga à Transformada Discreta de Fourier, é mais apropriada para a compressão de dados e reconstrução de sinais.

A Transformada Contínua de *Wavelets* (CWT) é a soma, ao longo do tempo, do sinal, multiplicado pela *wavelet* em certa escala e deslocada de certa quantidade. Este processo produz coeficientes de *wavelets* que são funções da escala e da posição.

Matematicamente, pode-se definir a Transformada Contínua de *Wavelets* em $F(a, b)$ como:

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}(t) dt \quad (5)$$

Na Equação 6 as variáveis a e b são valores reais, em que a é um parâmetro de escala (contração ou dilatação) e b é um parâmetro de localização (deslocamento). A função $\psi_{a,b}(t)$ é denominada *wavelet* e é definida como:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a \neq 0, \quad b \in \mathbb{R} \quad (6)$$

A *Wavelet* mãe precisa satisfazer a seguinte propriedade:

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (7)$$

Na Figura 29 é mostrada a CWT de um sinal contínuo $f(t)$ em função do tempo.

Figura 29 - Transformada Contínua de *Wavelets*.
FONTE – FONSECA, (2004)

O efeito do parâmetro de escala a na função *wavelet* pode ser observado na Figura 30. Quanto menor a escala, mais comprimida será a função *wavelet*, e vice-versa. Então, existe uma relação entre a escala e a frequência revelada pela análise por *wavelet*:

- menor escala $a \Rightarrow$ *wavelet* comprimida $\Rightarrow$ detalhes mudando rapidamente $\Rightarrow$ alta frequência w .
- maior escala $a \Rightarrow$ *wavelet* dilatada $\Rightarrow$ características globais mudando lentamente $\Rightarrow$ baixa frequência w .

Figura 30 - Fator de escala de uma função *wavelet* Ψ .
FONTE – FONSECA, (2004)

Outro fator presente na análise por *wavelet* é o fator de deslocamento (b), representado matematicamente por $f(t-b)$. Pode-se observar o efeito de deslocamento na Figura 31.

Figura 31 - Fator de deslocamento: à direita função *Wavelet* $\Psi(t)$, à esquerda função *Wavelet* deslocada $\Psi(t-b)$.
FONTE – FONSECA, (2004)

Na Transformada Contínua de *Wavelets*, a obtenção dos coeficientes de *wavelets* para cada escala demanda uma grande quantidade de cálculo. A alternativa natural é procurar abordar a Transformada de *Wavelets* em sua forma matemática discreta, cuja

implementação computacional é direta, dispensando os estágios sensíveis a erros e de difícil implementação em tempo real. A Transformada de *Wavelets* pode ser tratada sob a forma discreta, sem prejuízo de suas qualidades e propriedades, e de maneira numericamente estável (SILVA, 2006).

Na Transformada Discreta de *Wavelets* o parâmetro de escala **a** e de deslocamento **b** (equação 8), assumem apenas valores discretos. Para **a** escolhe-se valores inteiros (positivos e negativos), potências de um parâmetro fixo a_0

$$a = a_0^{-j} \quad a_0 > 1 \text{ e } j \in \mathbb{Z} \quad (8)$$

Diferentes valores de **j** correspondem a *wavelets* de diferentes larguras.

A discretização do parâmetro **b** deve depender de **j**: *wavelets* estreitas (alta frequência) são transladadas por pequenas distâncias a fim de cobrir todo o domínio do tempo, enquanto que *wavelets* mais largas (frequências mais baixa), devem ser transladadas por uma distância maior. Assim, a escolha natural é:

$$b = kb_0 a_0^{-j} \quad b_0 > 0, \text{ fixo}, j, k \in \mathbb{Z} \quad (9)$$

A *wavelet* discreta fica então:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{j/2} \psi(a_0^j t - kb_0) \quad (10)$$

A Transformada de *Wavelets* para sinais discretos é então definida como:

$$F_{m,n}(a,b) = a_0^{-j/2} \int f(t) \psi(a_0^{-j} t - nb_0) \quad (11)$$

4.4.4 Diferenças entre a Transformada de *Fourier* e a Transformada de *Wavelets*.

A diferença mais interessante é que as funções individuais *wavelets* estão localizadas no espaço enquanto as funções seno e cosseno de Fourier não estão. Esta característica de localidade, junto com a localização em frequência das *wavelets*, levam

muitos operadores e funções usarem *wavelets* esparsas quando transformados para o domínio de *wavelet*. Desta característica resultam várias aplicações úteis como compressão de dados, detecção padrão em imagens e remoção de ruído de funções em sinais unidimensionais ou bidimensionais (FONSECA, 2004).

Um modo de ver as diferentes resoluções no espaço Tempo x Frequência entre a Transformada de *Fourier* e a Transformada de *Wavelets* é olhar a função base como uma representação Tempo x Frequência. A Figura 32 mostra a Transformada de Fourier por janela (WFT), onde a janela limita a largura do sinal, truncando a função seno e cosseno para que fique contida no tamanho da janela. Como uma única janela é usada para todas as frequências na WFT, a resolução da análise é a mesma em toda a localização no plano Tempo x Frequência (GRASP 1995).

Figura 32 - Funções base de Fourier descritas no plano Tempo x Frequência.
FONTE – FONSECA, (2004)

A vantagem da Transformada de *Wavelets* é a dimensão das janelas variarem. Dessa forma haverá funções de base pequena para alta frequência, (análise de descontinuidades) bem como funções bases maiores para baixas frequências. A Figura 33 mostra o plano Tempo x Frequência da função *wavelet* de *Daubechies* (GRASP 1995). A Transformada de *Wavelets* possui um conjunto muito grande de funções base, ao contrário da Transformada de Fourier que utiliza as funções seno e cosseno. Desta forma a Análise de *Wavelet* provê acesso imediato à informação que não pode ser evidenciada por outros métodos que usam Tempo x Frequência, como a análise de Fourier.

Figura 33 - Função base *Wavelet* de *Daubechies* descritas no plano Tempo x Freqüência.
FONTE - FONSECA, (2004)

Na Figura 34 pode-se observar a comparação entre a análise espectral da Transformada de Fourier e da Transformada de *Wavelets* entre dois sinais. O sinal (a) resulta da superposição dos sinais $\sin(10t)$ e $\sin(20t)$. O sinal (b) é constituído na primeira metade, pelo sinal $\sin(10t)$ e na segunda metade pelo sinal $\sin(20t)$.

Pode-se observar que os gráficos (c) e (d) representam os espectros de Fourier dos sinais (a) e (b), respectivamente, obtidos pela Transformada de Fourier. Os gráficos (e) e (f) da Figura 34 representam a Transformada de *Wavelets* dos sinais (a) e (b), respectivamente, nos quais nota-se a propriedade de localização no tempo da Transformada de *Wavelets* (PROTÁZIO 2002).

Figura 34 - Comparação entre Transformada de *Fourier* e Transformada de *Wavelet*.
FONTE - FONSECA, (2004)

4.4.5 Aproximações e Detalhes

A análise de *wavelet* consiste em aproximações e detalhes. As aproximações representam os componentes de baixa frequência do sinal. Os detalhes são as componentes de alta frequência do sinal.

Como exemplo, a Figura 35 mostra a Árvore de Decomposição *Wavelet* até o terceiro nível, para um sinal S , decomposto em coeficientes de aproximação A_1 e coeficientes de detalhes D_1 do nível 1. A aproximação do nível 1 A_1 , é também decomposta em coeficientes de aproximação A_2 e coeficientes de detalhes D_2 do nível 2. Este processo ocorre, de forma recursiva, até o n -ésimo nível de decomposição.

Figura 35 - Árvore de Decomposição *Wavelet*.
FONTE - Toolbox do Matlab 07

Pode-se observar, na Figura 36, a mesma decomposição de um sinal contínuo S e seus diversos níveis de decomposição de aproximação e detalhes, representados pelos coeficientes cA e cD respectivamente.

Figura 36 - Árvore de Decomposição *Wavelet* de um sinal
FONTE - Toolbox do Matlab 07

A análise de *wavelet* aplicada à filtragem de imagens pode ser implementada a partir de um Banco de Filtros, denominados de filtros em Quadratura Conjugada (QMF – *Quadrature Mirror Filters*).

Os coeficientes do filtro passa-alta (H) são determinados pela função *wavelet* Ψ ou função mãe, enquanto os coeficientes do filtro passa baixa (L) são determinados pela função Φ ou função escala.

De forma resumida, pode-se entender que o processo de decomposição em multiresolução consiste em separar um sinal original em duas partes. Uma parte contém as componentes de grande escala do sinal e a outra contém as componentes de pequena escala representadas no diagrama da Figura 37. Esse diagrama consiste de um conjunto de filtros de Análise e Síntese, responsáveis pela decomposição e reconstrução da imagem. A letra **H** representa o filtro passa-alta e a letra **L** representa o filtro passa-baixa. Eles são seguidos por um estágio de sub-amostragem para geração dos coeficiente de aproximação e de detalhes horizontais, verticais e diagonais.

O processo de reconstrução da imagem ou do sinal, a partir dos coeficientes de aproximação **cA** e detalhes **cD**, é obtido após o estágio de super-amostragem, seguido por filtros passa-alta **H'** e passa-baixa **L'** de síntese.

Figura 37- Banco de Filtros
FONTE - Toolbox do Matlab 07

O processo de decomposição é recursivo, isto é, aplica-se tantas vezes quanto necessário, para obter os coeficientes de aproximação e detalhe de um sinal ou imagem.

4.4.6 Tipos de Wavelets

Há vários tipos de *wavelets* citados na literatura. O uso de cada um deles está associado à aplicação. Regras de construção de *wavelets* têm sido propostas por vários pesquisadores, segundo as restrições e necessidades impostas em cada aplicação específica. É possível, portanto, gerar uma infinidade de *wavelets* diferentes e, particularmente construir um conjunto de *wavelets* adequado ao processamento de um tipo de sinal ou ser aplicação específica. (SILVA, 2006).

Entre as diferentes *wavelets* conhecidas serão apresentadas nas seções seguintes apenas as *wavelets* de interesse para esse trabalho: a *wavelet* de *Haar* e a *wavelet* de *Daubechies*, Daub4.

A *wavelet* de *Haar*, que pode ser considerada uma D2 (*Daubechies* 2), é a primeira *wavelet*, com um único momento nulo. Existem limitações no uso da construção de *wavelet* de *Haar* (SILVA, 2006). Como as funções base de *Haar* são funções de passos descontínuos, não são muito adequadas para a análise de funções estáveis com derivações contínuas. Visto que as imagens geralmente contêm regiões estáveis, a Transformada de *wavelets* de *Haar* não provê resultados satisfatórios em muitas aplicações com imagens (STOLLINTZ, 1996; SILVA, 2006).

As *wavelets* de *Daubechies*, de suporte compacto e suavidade “regulável” apresentam capacidade de análise e síntese muito mais efetiva do que as de *Haar* por possuírem maior regularidade (suavidade) e por melhor aproximarem funções (suaves) em $L^2(\mathbf{R})$. Apresentam excelentes resultados no processamento de imagens devido às suas propriedades (DAUBECHIES, 1992; FARIA, 1997; SILVA, 2006).

4.5 A Transformada de Wavelet de Haar

Antes de se definir matematicamente a Transformada de *Wavelet* de *Haar*, serão apresentados alguns conceitos através do algoritmo para calcular a Transformada de *Haar* de uma matriz de n amostras, seguido de um exemplo numérico utilizando uma “imagem” unidimensional constituída por quatro *pixels* [9 7 3 5].

O algoritmo para uma matriz de n amostras descreve os passos para o cálculo dos coeficientes de aproximação e detalhes para cada nível. Os passos são os seguintes:

1. Calcular a média de cada par de amostras (ou *pixels*) ($n/2$ médias).
2. Encontrar a diferença entre cada par de amostras utilizadas no calculo do item 1 e

dividir por 2 ($n/2$ diferenças). Essas diferenças são denominadas coeficientes de detalhes.

3. Preencher a primeira metade do vetor com as médias.
4. Completar a segunda metade do vetor com as diferenças.
5. Repetir o processo para a primeira metade do vetor que contém as médias (o comprimento do vetor deve ser divisível por dois).

A média (a) e diferença (d) de duas amostras l e r , podem ser expressas como:

$$a = (l + r) / 2 \quad (12)$$

$$d = (l - r) / 2 \quad (13)$$

Partindo da média (a) e da diferença (d) é possível fazer o caminho inverso para encontrar o valor das amostras r e l :

$$r = a - d \quad (14)$$

$$l = a + d \quad (15)$$

Considerando como exemplo, um vetor imagem constituído por quatro *pixels* (9 7 3 5) podem ser obtidos médias e diferenças conforme apresentado no algoritmo para n amostras. Os resultados são apresentados na tabela 4. Na segunda linha dessa tabela, a imagem original foi decomposta em uma versão de resolução mais baixa (dois *pixels*) e um par de coeficientes de detalhes. Este processo é repetido recursivamente até a decomposição completa, conforme mostra a tabela 4.

Finalmente, a Transformada de *Wavelet* (ou a decomposição) da imagem original de quatro *pixels* é obtida com a simples representação da média global da imagem original, seguida pelos coeficientes de detalhe em ordem de resolução crescente. Portanto, para a base de *Haar* unidimensional, a Transformada de *Wavelet* da imagem de quatro *pixels* é dada por: [6 2 1 -1].

Tabela 4 - A Transformada de *Haar* para o vetor [9735]

Resolução	Vetor	Média	Coeficientes de Detalhes
4	[9 7 3 5]	$(9+7)/2 = 8$ $(3+5)/2 = 4$	$(9-7)/2 = 1$ $(3-5)/2 = -1$
2	[8 4 1 -1]	$(8+4)/2 = 6$	$(8-4)/2 = 2$
1	[6 2 1 -1]: Transformada de <i>Haar</i>		

FONTE - STOLLNITZ, et al., (1996)

O modo para cálculo da Transformada de *Wavelet* fazendo-se recursivamente as médias e diferenças dos coeficientes é denominado “Banco de Filtros”. Nenhuma informação foi ganha ou perdida por este processo. É interessante observar que, a partir da transformada, pode-se reconstruir a imagem para qualquer nível de resolução, através da soma e subtração recursiva dos coeficientes de detalhes dos níveis de menor resolução.

Armazenar a imagem *wavelet* transformada, em lugar da própria imagem, apresentam várias vantagens. Uma vantagem é que, freqüentemente, grande número de coeficientes de detalhe têm pequena magnitude. Truncando ou removendo esses pequenos coeficientes da representação, são introduzidos pequenos erros na imagem reconstruída, resultando “compressão de imagem com perda” (STOLLNITZ, 1995 (a)).

4.5.2 A Função *Haar* de base unidimensional

O conceito de análise em multi-resolução, criado por Mallat (1989), está amplamente difundido (DAUBECHIES, 1990; DEROSE, et al., 1994).

O primeiro componente para análise em multi-resolução é o espaço vetorial cujo conceito será apresentado a seguir. Para isso imagens serão vistas como funções de segmentos constantes no intervalo semi-aberto de $[0,1)$. Um intervalo semi-aberto $[a,b)$ contém todos os valores de x no intervalo $a \leq x < b$. Para essas funções, será usado o conceito de espaço vetorial.

Um espaço vetorial V é basicamente a coleção de vetores para os quais a adição e multiplicação escalares são definidas. Desta forma pode-se adicionar dois vetores, aplicar um fator de escala, etc.

Considerando uma imagem constituída por um *pixel* como uma função constante no intervalo $[0,1)$, pode-se pensar nesta função como um vetor, denotando-se por V^0 o espaço vetorial de todas estas funções. De forma similar, considerando uma imagem de dois pixels como uma função com dois segmentos constantes nos intervalos $[0,1/2)$ e $[1/2,1)$, pode-se pensar nesta função como um vetor, denotando-se por V^1 o espaço vetorial de todas estas funções.

Continuando desta maneira, o espaço V^j incluirá todas as funções constantes definidas no intervalo $[0,1)$, com segmentos constantes em cada 2^j subintervalo de igual tamanho.

Pode-se pensar em toda imagem unidimensional com 2^j *pixels*, como um elemento, ou vetor, em V^j . Pelo fato desses vetores serem funções definidas no intervalo unitário, cada vetor em V^j está contido em V^{j+1} . Assim os espaços V^j são aninhados, da forma como segue:

$$V^0 \subset V^1 \subset V^2 \subset V^J \quad (16)$$

A função de *Haar* utiliza os conceitos anteriormente apresentados. É necessário definir uma base para cada espaço vetorial V^j . Uma base consiste de um conjunto mínimo de vetores a partir dos quais outros vetores no espaço vetorial podem ser gerados através de combinações lineares. As funções base para os espaços V^j são denominadas função escala, normalmente denotadas pelo símbolo ϕ . Uma base simples para V^j é dada pelas funções tipo *box* transladadas e escaladas (em combinação linear):

$$\phi_i^j(x) := \phi(2^j x - i) \quad i = 0, \dots, 2^j - 1 \quad (17)$$

$$\text{em que} \quad \phi_i^j(x) := \begin{cases} 1 & \text{para } 0 \leq x < 1 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Como exemplo, a Figura 38 mostra as quatro funções tipo *box* que formam uma base para V^2 . O eixo horizontal representa o tempo ou posição e o eixo vertical a amplitude do sinal.

Figura 38 - A base tipo *box* para V^2
FONTE - STOLLNITZ et. al., (1995)

O suporte de uma função refere-se à região no domínio do parâmetro sobre o qual a função é diferente de zero. Por exemplo, o suporte de $\phi_0^2(x)$ é $[0, 1/4]$. Funções que têm suporte num intervalo limitado são ditas possuidoras de suporte compacto. Todas as funções tipo *box* são de suporte compacto.

A próxima etapa é escolher um “produto interno” definido no espaço vetorial V^j . O “produto interno padrão” é definido por:

$$\langle f | g \rangle := \int_0^1 f(x)g(x)dx \quad (18)$$

para dois vetores $f, g \in V^j$. Pode-se definir um novo espaço vetorial W^j como o complemento ortogonal de V^j em V^{j+1} . Em outras palavras, W^j é o espaço de todas as funções em V^{j+1} , que são ortogonais a todas as funções em V^j sob o produto interno escolhido. Informalmente, pode-se pensar na *wavelet* em W^j como a maneira de representar as partes de uma função em V^{j+1} que não podem ser representado em V^j .

Wavelet é uma coleção de funções $\psi_i^j x$ linearmente independente que geram o espaço W^j . Estas funções base têm as seguintes propriedades:

1. As *Wavelet* ψ_i^j bases de W^j , juntamente com as funções base ϕ_i^j de V^j formam a base V^{j+1} .
2. Toda função base ψ_i^j de W^j é ortogonal a todas as bases ϕ_i^j de V^j sob um certo produto interno escolhido.

Assim, os "coeficientes de detalhes" da tabela 4 são realmente coeficientes das funções base *Wavelet*.

As *Wavelet* que correspondem à base tipo *box* são conhecidas como *Wavelet de Haar*, dadas por:

$$\psi_i^j(x) := \psi(2^j x - i) \quad i = 0, \dots, 2^j - 1 \quad (19)$$

$$\text{onde} \quad \psi(x) := \begin{cases} 1 & \text{para } 0 \leq x < 1/2 \\ -1 & \text{para } 1/2 \leq x < 1 \\ 0 & \text{se } x < 0 \text{ ou } x \geq 1 \end{cases}$$

A Figura 39 mostra as duas *wavelets de Haar* que geram o espaço W^1 .

Referindo-se à imagem $I(x)$ de quatro *pixels* da Tabela 4, ela pode ser expressa como uma combinação linear das funções base tipo *box* em V^2 da forma como segue:

$$I(x) = c_0^2 \phi_0^2(x) + c_1^2 \phi_1^2(x) + c_2^2 \phi_2^2(x) + c_3^2 \phi_3^2(x) \quad (20)$$

Figura 39 - As Wavelet de Haar para W^1
FONTE - STOLLNITZ et al., (1995)

Uma representação gráfica desses quatro *pixels* é mostrada na Figura 40, em que os coeficiente $c_0^2, \dots, c_3^2$ são os quatro valores de *pixels* originais [9 7 3 5].

Figura 40 - Representação do grupo de função tipo *box* (parte 1)
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995)

Reescrevendo a expressão para $I(x)$ em termos de função base em V^1 e W^1 , usando coeficientes de média e diferença, obtém-se a expressão da equação 21:

$$I(x) = c_0^1 \phi_0^1(x) + c_1^1 \phi_1^1(x) + d_0^1 \psi_0^1(x) + d_1^1 \psi_1^1(x) \quad (21)$$

Figura 41 - Representação do grupo de função tipo *box* (parte 2)
FONTE - STOLLNITZ et. al., (1995)

As quatro funções ilustradas na Figura 41 constituem a base *Haar* para V^1 .

Finalmente $I(x)$ é reescrita como a soma das funções base em V^0 , W^0 , e W^1 obtendo-se a expressão 22. A Figura 42 ilustra essas funções base.

$$I(x) = c_0^0 \phi_0^0(x) + d_0^0 \psi_0^0(x) + d_0^1 \psi_0^1(x) + d_1^1 \psi_1^1(x) \quad (22)$$

Figura 42 - Representação do grupo de função tipo *box* (parte 3)
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995)

Os quatro coeficientes da Figura 42 são ou constituem a transformada *Wavelet de Haar* para a imagem original. As quatro funções ilustradas na Figura 42 constituem a base *Haar* para V^2 . Ao invés de usar as quatro funções tipo *boxs* habituais, pode-se usar $\phi_0^0, \psi_0^0, \psi_0^1$, e ψ_1^1 para representar a média global, a aproximação, e os dois tipos de detalhe, possíveis na função em V^2 . A base *Haar* para V^j com $j > 2$ inclui estas funções bem como, as versões mais próximas da *Wavelet* $\psi(x)$ (STOLLNITZ et. al., 1995).

4.5.3 Ortogonalidade

A base de *Haar* possui a propriedade de ortogonalidade, nem sempre comum em outras bases de *wavelet*. Uma base ortogonal é aquela em que todas as funções base, isto é, $\phi_0^0, \psi_0^0, \psi_0^1, \psi_1^1, \dots$ são ortogonais entre si. Pode-se notar que a ortogonalidade é uma exigência mais forte que o requisito, na definição de *wavelets*, que ψ_i^j seja ortogonal somente a todas as funções escala no mesmo nível de hierarquia j .

4.5.4 Normalização

Outra propriedade às vezes desejável é a “normalização”. Uma função base $u(x)$ é normalizada se $\langle u | u \rangle = 1$. Pode-se normalizar a base *Haar* substituindo as equações 21 e 22 respectivamente pelas equações (23) e (24), onde o fator constante $2^{j/2}$ é escolhido de forma a satisfazer $\langle u | u \rangle = 1$ para o produto interno padrão.

$$\phi_i^j(x) := 2^{j/2} \phi(2^j x - i), \quad i = 0, \dots, 2^j - 1 \quad (23)$$

$$\psi_i^j(x) := 2^{j/2} \psi(2^j x - i), \quad i = 0, \dots, 2^j - 1 \quad (24)$$

Com esta definição, os novos coeficientes normalizados são obtidos pela divisão por $2^{j/2}$, de cada coeficiente anterior com sobrescrito j . Portanto, no exemplo da função de base *Haar* unidimensional (Seção 3.5.1), os coeficientes não normalizados [6 2 1 -1] se tornam normalizados, da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 6 & 2 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Uma base ortonormal é aquela que é ortogonal e normalizada.

4.5.5 Compressão *Wavelet*

O objetivo da compressão é expressar um conjunto inicial de dados usando outro conjunto menor de dados, com ou sem perda de informação. Por exemplo, supondo que a função $f(x)$ seja expressa pela soma de funções base $u_1(x), \dots, u_m(x)$ como mostrada na equação 25:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m c_i u_i(x) \quad (25)$$

Neste caso, o conjunto de dados consiste de coeficientes $c_1, \dots, c_m$. O objetivo é encontrar uma função que aproxima $f(x)$, mas com menos coeficientes, talvez usando uma base diferente. Isto é, considerando um erro de tolerância ε determinada pelo usuário, (para a compressão sem perda, $\varepsilon=0$), busca-se por uma função como especificada na equação (26) tal que $\hat{m} < m$ e $\|f(x) - \hat{f}(x)\| \leq \varepsilon$ para alguma norma (“que é a função que mede o comprimento do vetor”).

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^{\hat{m}} \hat{c}_i \hat{u}_i(x) \quad (26)$$

Geralmente, pode-se tentar construir um grupo de funções base $\hat{u}_1, \dots, \hat{u}_{\hat{m}}$ que forneceria uma boa aproximação com poucos coeficientes. Ao invés disso será considerado o problema mais simples, encontrar uma boa aproximação em uma base fixa.

No que se refere à compressão, o interesse concentra-se na redução do número de coeficientes necessários para representar uma função e não no problema de codificar e armazenar a informação nos possíveis bits existentes.

Um dos problemas da compressão é na ordenação dos coeficientes $c_1, \dots, c_m$ de forma que para todo $\hat{m} < m$, os primeiros $\hat{m}$ elementos da seqüência resultem na melhor aproximação de $\hat{f}(x)$ para $f(x)$ como mensurado na norma L^2 . A solução para este problema é direta se a base é ortonormal, como é o caso da base normalizada de *Haar*.

Seja $\pi(i)$ a permutação (troca em matemática) de $1, \dots, m$ e seja $\hat{f}(x)$ uma função que usa os coeficientes correspondente aos primeiros números $\hat{m}$ da permutação $\pi(i)$:

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^{\hat{m}} c_{\pi(i)} u_{\pi(i)} \quad (27)$$

O quadrado do erro L^2 nesta aproximação é dado por

$$\begin{aligned} \left\| f(x) - \hat{f}(x) \right\|_2^2 &= \langle f(x) - \hat{f}(x) | f(x) - \hat{f}(x) \rangle \\ &= \left\langle \sum_{i=\hat{m}+1}^m c_{\pi(i)} u_{\pi(i)} \mid \sum_{j=\hat{m}+1}^m c_{\pi(j)} u_{\pi(j)} \right\rangle \\ &= \sum_{i=\hat{m}+1}^m \sum_{j=\hat{m}+1}^m c_{\pi(i)} c_{\pi(j)} \langle u_{\pi(i)} \mid u_{\pi(j)} \rangle \\ &= \sum_{i=\hat{m}+1}^m (c_{\pi(i)})^2 \end{aligned} \quad (28)$$

A última etapa considera que a base é ortonormal, ou seja $\langle u_i | u_j \rangle = \delta_{ij}$. Esse resultado indica que o quadrado do erro L^2 é a soma dos quadrados de todos os coeficientes excluídos. Conclui-se que, para minimizar esse erro para um dado $\hat{m}$, a melhor escolha para $\pi(i)$ é a permutação (ou troca de coeficientes) que ordena os coeficientes em ordem de magnitude decrescente, isto é, $\pi(i)$ satisfaz a desigualdade:

$$|c_{\pi(1)}| \geq \dots \geq |c_{\pi(m)}| \quad (29)$$

4.5.6 A Transformada de *Wavelet de Haar* Bidimensional

Há duas maneiras de se usar *wavelet* para transformar os valores de *pixels* de uma imagem. Cada uma dessas transformações é uma generalização da Transformada de *Wavelets* unidimensional. A primeira transformação é denominada decomposição padrão, e a segunda, decomposição não padrão.

Para se obter a decomposição padrão de uma imagem, primeiro aplica-se a *wavelet* unidimensional transformando cada linha da imagem (Figura 43 (a)). Esta operação resulta num valor médio mais os coeficientes de detalhes para cada linha. A seguir as linhas transformadas são tratadas como se fossem uma imagem, e aplica-se a transformada unidimensional a cada coluna. Os valores resultantes são todos coeficientes de detalhes com exceção do coeficiente de média global. A Figura 43 (a) ilustra cada passo da operação.

Na decomposição não padrão alterna-se entre operações nas linhas e nas colunas. Primeiramente, calcula-se o valor médio mais os coeficientes de detalhes para cada linha. Em seguida, na imagem resultante, calcula-se a média mais os coeficientes de detalhe para cada coluna. Repete-se, recursivamente, o processo no quadrante que contém as médias em ambas as direções até completar a transformação. Esta decomposição também é conhecida como Decomposição Piramidal da imagem. A Figura 35 (b) mostra todos os passos envolvidos no procedimento de decomposição não padrão (STOLLNITZ, 1995(a)).

Figura 43 - (a) Decomposição padrão, (b) Decomposição não padrão
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995)

A decomposição padrão de uma imagem é atrativa por ser de implementação mais fácil, pelo fato de realizar somente a transformada 1-D em todas as linhas e depois em todas as colunas. Por outro lado, a decomposição não-padrão é um pouco mais eficiente porque requer somente $8/3 (m*m-1)$ operações de atribuição, enquanto a padrão requer $4(m*m-m)$, para uma imagem $(m \times m)$.

4.5.7 Função *Haar* de base bidimensional

A construção padrão de uma *wavelet* de base bidimensional consiste de todos possíveis produtos tensoriais de funções base unidimensional. Por exemplo, quando se começa com a base unidimensional *Haar* para V^2 , como mostrada na Figura 44, obtém-se a base bidimensional para V^2 . Aplicando-se a construção padrão para uma base ortonormal em uma dimensão, obtém-se uma base ortonormal em duas dimensões.

Para a construção não padrão de uma base bidimensional define-se uma função escala bidimensional como na equação 30 e três funções *wavelet*, como nas equações 31.

$$\phi\phi(x, y) := \phi(x)\phi(y) \tag{30}$$

$$\begin{aligned} \phi\psi(x, y) &:= \phi(x)\psi(y) \\ \psi\phi(x, y) &:= \psi(x)\phi(y) \\ \psi\psi(x, y) &:= \psi(x)\psi(y) \end{aligned} \tag{31}$$

Figura 44 - A construção padrão de uma base *Wavelet Haar* bidimensional para V^2 . No caso não normalizado, as funções são +1 onde mostram sinal de mais, -1 onde mostra sinal de menos, e 0 na região cinza.

FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995)

Denotam-se níveis de escala com o expoente j (como feito no caso unidimensional) e as translações horizontal e vertical com o par de sub-escritos k e l . A base não padrão (Figura 45) consiste de uma única função de escala $\phi\phi_{0,0}^0(x, y) := \phi\phi(x, y)$ junto com escalas e translações de três funções *wavelet* e $\phi\psi, \psi\phi$, e $\psi\psi$:

$$\begin{aligned}
 \phi\psi_{kl}^j(x, y) &:= 2^j \phi\psi(2^j x - k, 2^j y - l) \\
 \psi\phi_{kl}^j(x, y) &:= 2^j \psi\phi(2^j x - k, 2^j y - l) \\
 \psi\psi_{kl}^j(x, y) &:= 2^j \psi\psi(2^j x - k, 2^j y - l)
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

Figura 45 - A construção não padrão de uma base bidimensional *Wavelet de Haar* para V^2
FONTE - STOLLNITZ et. al. (1995)

A constante 2^j normaliza a *Wavelet* para dar uma base ortonormal.

4.5.6 A Transformada de Wavelets de Daubechies

Ingrid Daubechies, uma das mais brilhantes pesquisadoras sobre *wavelet* no mundo, criou o que é chamado “*wavelet* ortonormal com suporte compacto”. As *wavelets* de *Daubechies* são numeradas em função do número de momentos nulos que possuem. O índice em si corresponde ao número de coeficientes que os filtros associados possuem, que é também, o número de derivadas nulas do filtro associado à função escaladora em $\omega = \pi$ (o filtro tem um zero em $\omega = \pi$ de ordem $N-1$). Assim, a *wavelet* D4 possui 2 momentos nulos, e os filtros associados possuem 4 zeros em $\omega = \pi$, e 4 coeficientes.

A notação usada pela ferramenta *Matlab Wavelet Toolbox* para esses filtros é: db1, db2, db3, db4, db5,

Note que a notação utilizada pela ferramenta usa a metade do número dos coeficientes na notação D_j . As *wavelets* de *Daubechies* têm sempre um número par de coeficientes (SILVA, 2006).

A Figura 46 mostra alguns modelos de *wavelets*- mães da família *Daubechies* com a notação utilizada pela ferramenta *Matlab Wavelet Toolbox*. Pode-se perceber que

conforme a ordem da *wavelet* mãe aumenta, seu suporte compacto também sofre um aumento significativo. Estas *wavelets* não têm qualquer expressão explícita, à exceção de db1, que é a *wavelet* de *Haar*. Elas também não são simétricas.

Figura 46 - Famílias Daubechies.
FONTE - SILVA (2006)

Entre as *wavelets* de *Daubechies*, nesse trabalho foi utilizada a Daub4, detalhada a seguir.

A Figura 47 apresenta a matriz Daub 4, que deve ser multiplicada por um vetor de dados (os espaços em branco implicam em zeros). Os valores dos coeficientes são:

- $C_0 = 0.482962$
- $C_1 = 0.8365163$
- $C_2 = 0.2241138$
- $C_3 = 0.1294095$

$$\begin{bmatrix} C_0 & C_1 & C_2 & C_3 & & & & \\ C_3 & -C_2 & C_1 & -C_0 & & & & \\ & & C_0 & C_1 & C_2 & C_3 & & \\ & & & C_3 & -C_2 & C_1 & -C_0 & \\ C_2 & C_3 & & & & & C_0 & C_1 \\ C_1 & -C_0 & & & & & C_3 & -C_2 \end{bmatrix}$$

Figura 47 - Matriz de coeficientes da DAUB4.
FONTE - ANDRADE (2001)

Para aplicar a Daub4 sobre uma imagem, o primeiro passo consiste da transformada da imagem em uma matriz de dados. Em seguida, é definido um vetor de matriz imagem, formado pela primeira coluna da matriz. Multiplica-se, então a matriz de coeficientes pelo vetor da imagem, como mostrado na Figura 48.

$$\begin{bmatrix} 0 & \dots & 255 \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ 255 & \dots & 255 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 255 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 255 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Matriz dos Vetor da Vetor da
coeficientes imagem transformada

Figura 48 - Primeiro passo da Transformada de Wavelet Daub4.
FONTE - ANDRADE (2001)

A seguir, multiplica-se apenas a metade inferior do vetor resultante pela matriz de coeficientes e repete-se esse passo enquanto o vetor for maior que o número de

coeficientes da transformada. A Figura 49 mostra os valores da matriz da imagem a serem multiplicados.

$$128 \begin{bmatrix} 0 \\ -127 \\ -191 \\ 255 \end{bmatrix} 64$$

Figura 49- Vetor da imagem a ser transformada.
FONTE - ANDRADE (2001)

4.6 Consideração final

Este capítulo apresentou a base teórica sobre Transformada Discreta do Cosseno (DCT) e a Transformada de *Wavelets* e, mais detalhadamente a *wavelet* de *Haar* e as *wavelets* de *Daubechies*. Estas transformadas serão utilizadas nesse trabalho para a compressão de imagens de impressão digital, e será avaliado o desempenho de cada uma delas.

5 Metodologia

5.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a comparação entre as seguintes técnicas de compressão para imagens de impressão digital: Transformada Discreta do Cosseno, Transformada de *Wavelets de Haar* e a Transformada de *Wavelets de Daubechies*. A técnica WSQ (*Wavelet Scalar Quantization*) também foi implementada, por ser o padrão de compressão adotado pelo FBI, sendo então utilizada nesse trabalho como referência na comparação dos resultados.

5.2 Metodologia

O trabalho foi dividido em quatro módulos, mostrados no diagrama da Figura 50. As imagens de impressão digital obtidas do banco de dados (COSTA, 2001) passam pelas seguintes etapas:

1. Compressão da imagem usando a Transformada Discreta do Cosseno.
2. Compressão da imagem usando a Transformada de *Wavelets de Daubechies*, Daub4 e Daub8.
3. Compressão da imagem usando a Transformada de *Wavelets de Haar*.
4. Compressão da imagem usando a técnica *Wavelet Scalar Quantization* (WSQ), utilizada pelo FBI.
5. Comparação dos resultados para as diferentes técnicas.

Figura 50 - Etapas do sistema desenvolvido.

As imagens de entrada foram obtidas do banco de dados de Costa (2001), que contém 232 imagens de impressão digital (tipo bmp) com qualidade variada, adquiridas dos seguintes bancos de dados:

- *Nist Special Database 4* (BRISLAWN, 2002) - banco de dados fornecido pelo FBI (FBI, 1984), contendo 50 amostras de imagens de impressões digitais na escala de cinza, e resolução de 256×256 pixels. Essas imagens foram agrupadas em cinco classes, sendo 13 imagens de presilha esquerda, 10 de presilha direita, 7 verticilos, 4 arcos angulares e 16 arcos planos.

- *Biometric Systems Lab* (BRISLAWN, 2002) – contém imagens de dois outros bancos de dados o *Fingdb* e o *DsPami97*. O *Fingdb* possui 168 imagens na escala de cinza, sendo 8 amostras de cada pessoa (21 pessoas), resolução de 256×256 pixels, com 4 imagens de presilha esquerda, 8 de presilha direita, 4 verticilos, 2 arcos angulares, 1 arco plano e 2 imagens indeterminadas.

- *DsPami97* (BRISLAWN, 2002) - contém 14 imagens em tons de cinza, resolução de 256×256 pixels, sendo 4 imagens de presilha esquerda, 2 de presilha direita, 3 verticilos, 2 arcos angulares e 3 arcos planos.

A taxa de compressão utilizada foi a mesma definida no algoritmo WSQ, que varia entre 91% e 94%. Mas para algumas técnicas como a Daub4 e Daub8 a variação da taxa de compressão foi de 91% a 98%.

Nas próximas seções será descrita a metodologia para cada um dos módulos e será apresentado o software de desenvolvimento do trabalho.

5.2.1 Software de Desenvolvimento

Para aplicação das técnicas de compressão foi utilizado o MATLAB (*Matrix Laboratory*) na versão 7.0, com o *Toolbox* de processamento de imagens, no qual estão incluídas as funções de compressão por DCT, Transformada de *Wavelets* de *Haar* e a Transformada de *Wavelets* de *Daubechies*. O ambiente de programação do MATLAB permite o uso de sua própria linguagem de programação, com chamadas de funções de processamento de imagens, agilizando o desenvolvimento dos algoritmos e a análise dos resultados.

5.2.2 Transformada Discreta do Cosseno

A Transformada Discreta do Cosseno bidimensional foi aplicada sobre blocos de tamanho 8x8, como mostra a Figura 51. Os resultados obtidos após a aplicação da transformada são mostrados na Figura 52. Em seguida a imagem foi reconstruída usando a DCT inversa bidimensional para cada bloco. Foram utilizadas as funções do MATLAB para esta técnica (Anexo C).

Figura 51 - (a) Imagem original “A20” (b) primeiro bloco 8x8 da imagem a ser transformada.

Figura 52 - Imagem após a aplicação da transformada do Cosseno (blocos de tamanho 8x8)

Os coeficientes da DCT foram quantificados por zona, utilizando uma máscara como a mostrada na Figura 53(a). Os valores “1” da máscara referem-se aos coeficientes preservados, enquanto os valores “0” referem-se aos coeficientes descartados. Desta forma, aumentando-se a quantidade de “1” na máscara, reduz-se a taxa de compressão, pois mais coeficientes são considerados. Para a máscara mostrada na Figura 53 (b), a taxa de compressão obtida foi de 91%.

```
mask = [1 1 1 0 0 0 0 0
        1 1 0 0 0 0 0 0
        1 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0];
```

(a)

(b)

Figura 53 - (a) Máscara para quantificação por zona (b) representação da máscara aplicada na imagem.

A Figura 54 mostra a imagem reconstruída usando a transformada DCT inversa bidimensional.

Taxa de Compressao: 16 para 1 ou 94%

Figura 54 - Imagem com taxa de compressão de 91%.

5.2.3 Transformada Wavelet de Haar

Para a compressão de imagens utilizando a Transformada de *Wavelets de Haar* foi utilizada a função correspondente do MATLAB (Anexo B), e foi implementado o algoritmo apresentado em Stollnitz et. al. (1995) que se encontra no Anexo D. Os dois algoritmo permitem a escolha da taxa de compressão. O algoritmo Stollnitz usa a norma L^2 (v. Anexo A) e pode ser resumido em três passos:

1. cálculo dos componente $c_1, \dots, c_m$ que representam a imagem em uma base de *Haar* bidimensional normalizada;
2. ordenação dos coeficientes em ordem decrescente de magnitude para gerar a seqüência $c_{\pi(1)}, \dots, c_{\pi(m)}$;
3. determinação do menor $\hat{m}$ para o qual vale a desigualdade:

$$\sum_{i=\hat{m}+1}^m (c_{\pi(i)})^2 \leq \varepsilon^2 \quad (34)$$

considerando um erro pré estabelecido ε de L^2 , e iniciando com $\hat{m} = m$.

O primeiro passo é realizado aplicando a transformada *Wavelet de Haar* bidimensional (seção 4.5.6), utilizando funções base normalizadas.

A seguir, para os passos 2 e 3 é apresentado um pseudocódigo que implementa um método mais eficiente, que usa uma estratégia de busca binária para encontrar um limiar τ , abaixo do qual os coeficientes podem ser truncados (arredondamento para

mais). O procedimento considera como entrada o arranjo unidimensional de coeficientes c (com cada coeficiente correspondendo a uma função base bidimensional) e um erro de tolerância ε .

Para cada valor proposto no limiar τ , o algoritmo calcula o quadrado do erro de L^2 que resultaria em coeficientes descartados menores do que τ . Esse erro quadrado s é comparado com ε^2 em cada iteração para decidir se a pesquisa binária deve continuar acima ou abaixo da metade do intervalo atual. O algoritmo pára quando o intervalo atual é tão pequeno que o número de coeficientes a serem descartados não muda mais.

Procedure *Compress* (c :array [1..m] of reals; ε :real)

```

 $\tau_{\min} \leftarrow \min\{|c[i]|\}$ 
 $\tau_{\max} \leftarrow \max\{|c[i]|\}$ 
do
   $\tau \leftarrow (\tau_{\min} + \tau_{\max})/2$ 
   $s \leftarrow 0$ 
  for  $i \leftarrow 1$  to  $m$  do
    if  $|c[i]| < \tau$  then  $s \leftarrow s + |c[i]|^2$ 
  end for
  if  $s < \varepsilon^2$  then  $\tau_{\min} \leftarrow \tau$ 
  else  $\tau_{\max} \leftarrow \tau$ 
until  $\tau_{\min} \approx \tau_{\max}$ 
for  $I \leftarrow 1$  to  $m$  do
  if  $|c[I]| < \tau$  then  $c[I] \leftarrow 0$ 
end for
end procedure

```

5.2.4 Transformada de Wavelets de Daubechies Daub4 e Daub8

Para esta técnica de compressão foram utilizadas as funções do MATLAB conforme apresentado no Anexo B. A taxa de compressão obtida com essa técnica é retornada pela função PERFL2 do MATLAB.

5.2.5 Wavelet Scalar Quantization (WSQ)

Para a técnica WSQ foi utilizada a versão “*WSQ viewer v. 24*” encontrada em COGNAXON (2007) que é um demo da versão do software do FBI. Uma explicação sobre esta técnica é encontrada no capítulo 3, no trabalho de Bradley e Brislawn (1994).

Como a técnica WSQ é o padrão de compressão adotado pelo FBI, ela é utilizada nesse trabalho como referência na comparação dos resultados.

5.2.6 Métricas para Avaliação das Técnicas de Compressão

Para quantificar a perda de dados nas imagens comprimidas para cada técnica utilizada, foram usadas as seguintes funções de avaliação (CONCI, 1998; AQUINO, 1998):

- Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* - RMSE)
- Relação Sinal Ruído rms (*Signal to Noise Ratio rms* - SNRrms)
- Relação Sinal Ruído de Pico (*Peak Signal to Noise Ratio* - PSNR) em decibel.

Considerando M e N o número de *pixels* de uma imagem nas direções vertical e horizontal, $F(x,y)$ a imagem original e $G(x,y)$ a imagem reconstruída, tem-se que as funções de avaliação de erro podem ser expressas a partir da diferença em cada *pixel* (x,y) por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [G(x, y) - F(x, y)]^2} \quad (35)$$

$$SNR_{ms} = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} G(x, y)^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [G(x, y) - F(x, y)]^2}; \quad SNR_{rms} = \sqrt{SNR_{ms}} \quad (36)$$

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{2^P - 1}{RMSE} \right) \quad (37)$$

Na função 37 P representa o número de bits por pixel.

Para a função RMSE, quanto maior o valor obtido, pior a qualidade da imagem (maior perda), pois maior será o Erro Médio Quadrático. Conseqüentemente, quanto menor o erro, melhor o desempenho da técnica.

Para a função SNRrms, quanto maior o valor obtido, melhor será o desempenho da técnica de compressão (menor perda). Conseqüentemente, quanto menor a Relação Sinal Ruído, pior o desempenho da técnica.

Para a função PSNR em decibel, quanto maior o valor obtido, melhor o desempenho da técnica, ou quanto menor a Relação Sinal Ruído de Pico, pior o desempenho da técnica.

Além dessas métricas foi utilizado um software denominado “GrFinger 4.2” (GRIAULE, 2003), que avalia as imagens de impressão digital classificando-as como de qualidade boa, média, ruim ou sem utilidade. Esse software foi aplicado sobre as imagens originais e as imagens reconstruídas. A classificação por ele retornada, foi substituída pelos seguintes valores numéricos para facilitar a construção de gráficos:

- 1 é igual a boa;
- 2 é igual a média;
- 3 é igual a ruim;
- 4 é igual a sem utilidade.

Utilizando esta avaliação foi determinado para cada técnica em cada banco, o número de imagens reconstruídas com qualidade igual ou superior à qualidade da imagem original.

5.3 Consideração final

Este capítulo apresentou a metodologia utilizada para a comparação entre as seguintes técnicas de compressão para imagens de impressão digital: Transformada Discreta do Cosseno, Transformada de *Wavelets de Haar*, Transformada de *Wavelets de*

Daubechies, e a Transformada de *Wavelets* de Quantização Escalar (WSQ). Apresenta também as funções de avaliação para o desempenho de cada técnica utilizada.

6. Resultados e Discussões

6.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta e discute os resultados das técnicas de compressão aplicadas sobre as imagens dos bancos de dados *Nistdb*, *DsPami* e *Fingdb*.

6.2 Resultados e Discussões

Para a obtenção dos resultados apresentados nesta seção inicialmente os algoritmos de compressão foram aplicados sobre as imagens de cada banco: o *Nistdb*, o *DsPami* e o *Fingdb*. Foi utilizada um computador Pentium 4, de 1.7GHz e com 256 Mbytes de RAM. Para cada métrica foi avaliado o resultado da compressão. Os resultados foram colocados em tabelas, para cada banco e cada métrica; a partir das tabelas foram levantados gráficos, para ilustrar o resultado de cada métrica para todas as imagens de cada banco. As tabelas encontram-se no Anexo E.

A técnica WSQ, por ser a técnica adotada pelo FBI, foi utilizada como uma referência de comparação com as demais técnicas. Esta técnica realiza a compressão entre 91% e 93%.

Como mencionado na seção 5.2.6, além das métricas foi utilizado o *software* “GrFinger 4.2” para classificar as imagens originais e as imagens recuperadas em boa, média, ruim e sem utilidade.

A seguir são apresentados os resultados gráficos para cada métrica.

6.3 Banco DsPami

6.3.1 Tempo de compressão para cada técnica

A Figura 55 apresenta, de forma gráfica, o tempo de compressão para cada técnica para o banco *DsPami*. Na figura 55(i) é apresentada a comparação dos tempos médio, mínimo e máximo para cada técnica. O menor tempo de compressão foi obtido com a técnica Haar do Matlab, seguida pela WSQ. O pior tempo de compressão foi para a técnica DCT. É interessante observar que a técnica WSQ apresenta o mesmo tempo de compressão para qualquer imagem, o que não acontece com as demais técnicas.

técnicas	Tempo (segundos)		
	Min.	Max	Méd.
Daub4	1,89	2,5	2,29
Daub8	1,73	3,06	2,49
DCT 91%	4,40	5,28	4,94
DCT 94%	4	5,07	4,80
Haar 91%	4,42	5,15	4,78
Haar 94%	4,35	4,98	4,53
Haar do matlab	1,5	1,89	1,71
WSQ	2,00	2,00	2,00

(i) Comparação dos tempos de execução

Figura 55 - Banco *DsPami*: tempo de execução das seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91% ; d) DCT 94% ; e) Haar 91% ; f) Haar 94% ; g) Haar Matlab; (h) WSQ.

6.3.2 Avaliação dos resultados com a métrica RMSE

Para a métrica *RMSE*, o menor valor obtido corresponde ao melhor resultado.

Analisando os gráficos da Figura 56, para o banco *DsPami*, observa-se que os menores valores foram obtidos para a técnica DCT, com grande diferença em relação às demais técnicas. A figura 56(i) facilita essa análise, apresentando o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica. Em seguida vem a técnica WSQ. As demais técnicas apresentam valores próximos para esta métrica.

técnicas	RMSE		
	Min.	Max	Méd.
Daub4	9,51	10,73	10,31
Daub8	9,50	10,74	10,20
DCT 91%	0,046	0,120	0,075
DCT 94%	0,061	0,160	0,099
Haar 91%	8,35	11,06	9,277
Haar 94%	8,18	13,62	9,73
Haar do matlab	9,52	10,74	10,19
WSQ	3,38	7,39	5,17

(i) Comparação da métrica RMSE para cada técnica

Figura 56 - Banco *DsPami*: resultados da métrica RMSE para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.

6.3.3 Avaliação dos resultados com a métrica SNR_{rms}

Para a métrica SNR_{rms} o maior valor da métrica corresponde ao melhor resultado. Para o banco *DsPami* são apresentados os gráficos para esta métrica, na Figura 57. A figura 57(i) facilita a análise desses gráficos, apresentando o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica. Os resultados evidenciam que a técnica DCT apresenta o melhor resultado, com grande diferença em relação às demais técnicas. Em seguida vem a técnica WSQ. As demais técnicas, Daub4, Daub8 e *Haar*, apresentam valores próximos para essa métrica.

técnicas	SNRrms		
	Min.	Max	Méd.
Daub4	1,48	1,67	1,54
Daub8	1,48	1,67	1,56
DCT 91%	5,11	14,64	9,37
DCT 94%	3,85	10,30	6,91
Haar 91%	1,64	2,04	1,78
Haar 94%	1,59	1,95	1,71
Haar do matlab	1,48	1,67	1,56
WSQ	2,15	4,41	3,19

(i) Comparação da métrica SNRrms para cada técnica

Figura 57 - Banco *DsPami*: resultados da métrica SNRrms para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; i) WSQ.

6.3.4 Avaliação dos resultados com a métrica PSNR

Para a métrica PSNR o maior valor da métrica corresponde ao melhor resultado.

Para o banco *DsPami*, os gráficos para cada técnica são apresentados na Figura 58. A figura 58(i) facilita essa análise, apresentando o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica. Os resultados evidenciam que o melhor resultado foi conseguido com a técnica DCT. Em seguida vem a técnica WSQ. As demais técnicas, Daub4, Daub8 e *Haar*, apresentam valores próximos para essa métrica.

técnicas	PSNR(db)		
	Min.	Max.	Méd.
Daub4	27,51	28,56	27,86
Daub8	27,50	28,56	27,96
DCT 91%	66,53	74,87	70,98
DCT 94%	64,00	72,37	68,45
Haar 91%	27,25	29,69	28,80
Haar 94%	25,44	29,87	28,44
Haar do matlab	27,50	28,55	27,96
WSQ	30,75	37,54	34,11

(i) Comparação da métrica PSNR para cada técnica

Figura 58 - Banco *DsPami*: resultados da métrica PSNR para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab h) WSQ .

6.4 Banco Fingdb

6.4.1 Tempo de compressão para cada técnica

A Figura 59 apresenta os tempos de compressão para cada técnica, para o banco *Fingdb*. A figura 59(i) facilita a análise desses gráficos, apresentando o tempo médio, mínimo e máximo para cada técnica. O menor tempo de compressão foi obtido com a técnica WSQ, seguida de Daub4. O pior tempo de compressão foi para a Haar do matlab em seguida da DCT. Novamente observa-se que a técnica WSQ apresenta o mesmo tempo de compressão para qualquer imagem, o que não acontece com as demais técnicas.

técnicas	Tempo(segundos)		
	Min.	Max.	Méd.
Daub4	2,01	2,82	2,22
Daub8	2,28	4,57	3,08
DCT 91%	4,81	6,25	5,02
DCT 94%	4,84	5,34	5,01
Haar 91%	3,43	4,29	3,80
Haar 94%	3,31	11,51	7,95
Haar do Matlab	2,01	3,93	2,44
WSQ	2,00	2,00	2,00

(i) Comparação dos tempos de execução

Figuras 59 - Banco *Fingdb*: tempo de execução das seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.

6.4.2 Avaliação dos resultados com a métrica RMSE

A análise dos gráficos da Figura 60, para o banco *Fingdb*, mostra que os menores valores foram obtidos para a técnica DCT, com grande diferença em relação às demais. A figura 60(i) facilita a análise desses gráficos, apresentando o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica. A segunda melhor técnica foi a WSQ. As demais técnicas apresentam valores próximos para essa métrica.

(a) DAUB4

(b) DAUB8

(c) DCT 91%

(d) DCT 94%

(e) HAAR 91%

(f) HAAR 94%

(g) HAAR do Matlab

(h) WSQ

técnicas	RMSE		
	Mín.	Max	Méd.
Daub4	9,27	10,46	10,04
Daub8	9,36	11,06	10,35
DCT 91%	0,094	0,148	0,122
DCT 94%	0,125	0,200	0,161
Haar 91%	8,99	11,20	9,82
Haar 94%	9,14	10,48	10,00
Haar do Matlab	9,30	10,16	9,90
WSQ	5,92	10,53	6,87

(h) Comparação da métrica RMSE para cada técnica

Figura 60 - Banco *Fingdb*: resultados da métrica *RMSE* para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.

6.4.3 Avaliação dos resultados com a métrica *SNRrms*

Para o banco *Fingdb* são apresentados os gráficos para essa métrica, na Figura 61. A figura 61(i) apresenta o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica, facilitando a análise desses gráficos. Os resultados evidenciam que a técnica DCT apresenta o melhor resultado com grande diferença em relação às demais técnicas. Em

seguida vem a técnica WSQ. As demais, Daub4, Daub8 e *Haar*, apresentam valores próximos.

técnicas	SNRrms		
	Min.	Max	Méd.
Daub4	1,50	1,72	1,58
Daub8	1,46	1,57	1,54
DCT 91%	3,61	6,54	4,76
DCT 94%	2,75	5,00	3,50
Haar 91%	1,55	1,77	1,63
Haar 94%	1,51	1,74	1,59
Haar do Matlab	1,56	1,71	1,61
WSQ	1,50	2,67	2,32

(i) Comparação da métrica SNRrms para cada técnica

Figuras 61 - Banco *Fingdb*: resultados da métrica SNRrms para as seguintes técnicas a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 84; d) DCT 94; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.

6.4.4 Avaliação dos resultados com a métrica PSNR

Para o banco *Fingdb*, os gráficos para cada técnica são apresentados na Figura 62. A figura 62(i) apresenta o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica, facilitando a análise desses gráficos. Os resultados evidenciam que a técnica DCT apresenta o melhor resultado para a métrica PSNR, seguida pela técnica WSQ. As demais técnicas, Daub4, Daub8 e *Haar*, apresentam valores próximos para esta métrica.

(g) HAAR Matlab

(h) WSQ

técnicas	PSNR(db)		
	Min.	Max.	Méd.
Daub4	27,73	28,78	28,08
Daub8	27,25	28,70	27,83
DCT 91%	64,71	68,64	64,44
DCT 94%	62,10	66,16	64,02
Haar 91%	27,13	29,04	28,28
Haar 94%	27,72	28,90	28,13
Haar do Matlab	27,99	28,75	28,21
WSQ	27,67	32,67	31,41

(i) Comparação da métrica PSNR para cada técnica

Figuras 62 - Banco *Fingdb*: resultados da métrica PSNR para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haat Matlab; h) WSQ.

6.5 Banco Nistdb

6.5.1 Tempo de compressão para cada técnica

A Figura 63 apresenta o tempo de compressão para cada técnica para o banco *Nistdb*. A figura 63(i) apresenta o tempo médio, mínimo e máximo para cada técnica, facilitando a análise desses gráficos. O menor tempo de compressão foi obtido com a

técnica WSQ, seguida por Haar do Matlab e Daub4. O pior tempo de compressão foi para DCT.

(a) DAUB4

(b) DAUB8

(c) DCT 91%

(d) DCT 94%

(e) HAAR 91%

(f) HAAR 94%

(g) HAAR do Matlab

(h) WSQ

Técnicas	Tempo(segundos)		
	Min.	Max.	Méd.
Daub4	2,31	5,14	2,88
Daub8	2,23	6,42	3,37
DCT 91%	5	5,68	5,22
DCT 94%	4,06	6,37	5,08
Haar 91%	3,84	5,45	4,46
Haar 94%	1,53	5	3,85
Haar do Matlab	2,10	3,76	2,82
WSQ	2,00	2,00	2,00

(h) Comparação dos tempos de execução

Figuras 63 - Banco *Nistdb*: tempo de execução das seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) WSQ.

6.5.2 Avaliação dos resultados com a métrica RMSE

Analisando os gráficos da Figura 64, para o banco *Nistdb*, observa-se que os menores valores foram obtidos para a técnica DCT, com grande diferença em relação às demais. Em seguida vem a técnica WSQ. A figura 64(i) apresenta o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica, facilitando a análise desses gráficos. Para essa métrica as demais técnicas apresentam valores próximos.

(a) DAUB4

(b) DAUB8

(c) DCT 91%

(d) DCT 94%

(e) HAAR 91%

(f) HAAR 94%

(g) HAAR Matlab

(h) WSQ

técnicas	RMSE		
	Min.	Max.	Méd.
Daub4	7,34	10,66	9,49
Daub8	6,82	10,52	9,29
DCT 91%	0,02	0,089	0,05
DCT 94%	0,03	0,113	0,07
Haar 91%	4,96	9,22	7,85
Haar 94%	5,48	9,36	8,24
Haar do Matlab	8,10	10,82	9,87
WSQ	2,16	7,70	3,80

(i) Comparação da métrica RMSE para cada técnica

Figura 64 - Banco *Nistdb*: resultados da métrica RMSE para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.

6.5.3 Avaliação dos resultados com a métrica SNRrms

Para o banco *Nistdb*, os gráficos para cada técnica estão apresentados na Figura 65. A figura 65(i) apresenta o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica, facilitando a análise desses gráficos. Os resultados evidenciam que a técnica DCT apresenta o melhor resultado para a métrica PSNR, seguida pela técnica WSQ. As demais técnicas, Daub4, Daub8 e *Haar*, apresentam valores próximos para esta métrica.

(a) DAUB4

(b) DAUB8

(c) DCT 91%

(d) DCT 94%

(e) HAAR 91%

(f) HAAR 94%

(g) HAAR do Matlab

técnicas	SNRrms		
	Min.	Max.	Méd.
Daub4	1,49	2,17	1,169
Daub8	1,51	2,33	1,731
DCT 91%	3,91	19,87	9,51
DCT 94%	3,41	15,93	7,36
Haar 91%	1,73	3,40	2,08
Haar 94%	1,42	2,91	1,92
Haar do Matlab	1,47	1,96	1,62
WSQ	2,07	7,36	4,52

(i) Comparação da métrica SNRrms para cada técnica

Figuras 65 - Banco *Nistdb*: resultados da métrica SNRrms para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.

6.5.4 Avaliação dos resultados com a métrica PSNR

Para o banco *Nistdb*, os gráficos para cada técnica então apresentados na Figura 66. A figura 66(i) apresenta o valor médio, mínimo e máximo para cada técnica, facilitando a análise desses gráficos. Os resultados evidenciam que a técnica DCT apresenta o melhor resultado para a métrica PSNR, seguida pela técnica WSQ. As demais técnicas, Daub4, Daub8 e *Haar*, apresentam valores próximos para esta métrica.

(b) DAUB8

(c) DCT 91%

(d) DCT 94%

(e) HAAR 91%

(f) Haar 94%

(g) Haar do Matlab

(h) WSQ

técnicas	PSNR(db)		
	Min.	Max.	Méd.
Daub4	27,56	30,81	28,56
Daub8	27,68	31,44	28,79
DCT 91%	69,10	79,64	73,62
DCT 94%	67,03	77,72	71,48
Haar 91%	28,82	34,69	30,30
Haar 94%	5,00	33,34	29,30
Haar do Matlab	27,44	29,95	28,25
WSQ	30,40	41,41	36,85

(i) Comparação da métrica PSNR para cada técnica

Figuras 66 - Banco *Nistdb*: resultados da métrica PSNR para as seguintes técnicas em a) Daub4; b) Daub8; c) DCT 91%; d) DCT 94%; e) Haar 91%; f) Haar 94%; g) Haar Matlab; h) WSQ.

6.6 Resultado final

Nas tabela 5, 6 e 7 são apresentados os resumos dos resultados para cada técnica e cada banco, evidenciando que a técnica WSQ e Haar do Matlab apresentaram o menor tempo de compressão, e a técnica DCT seguida da WSQ apresentaram os melhores resultados para as métricas utilizadas.

- **Banco *DSPAMI***

Tabela 5 - Resumo dos resultados para cada técnica contendo o mínimo, o máximo e a média.

técnicas	Tempo(segundos)			RMSE			SNRrms			PSNR(db)		
	Min.	Max	Méd.	Min.	Max	Méd.	Min.	Max	Méd.	Min.	Max.	Méd.
Daub4	1,89	2,5	2,29	9,51	10,73	10,31	1,48	1,67	1,54	27,51	28,56	27,86
Daub8	1,73	3,06	2,49	9,50	10,74	10,20	1,48	1,67	1,56	27,50	28,56	27,96
DCT 91%	4,40	5,28	4,94	0,046	0,120	0,075	5,11	14,64	9,37	66,53	74,87	70,98
DCT 94%	4	5,07	4,80	0,061	0,160	0,099	3,85	10,30	6,91	64,00	72,37	68,45
Haar 91%	4,42	5,15	4,78	8,35	11,06	9,277	1,64	2,04	1,78	27,25	29,69	28,80
Haar 94%	4,35	4,98	4,53	8,18	13,62	9,73	1,59	1,95	1,71	25,44	29,87	28,44
Haar do Matlab	1,5	1,89	1,71	9,52	10,74	10,19	1,48	1,67	1,56	27,50	28,55	27,96
WSQ	2,00	2,00	2,00	3,38	7,39	5,17	2,15	4,41	3,19	30,75	37,54	34,11

- **Banco *Fingdb***

Tabela 6 - Resumo dos resultados para cada técnica. contendo o mínimo, o máximo e a média.

técnicas	Tempo(segundos)			RMSE			SNRrms			PSNR(db)		
	Min	Max.	Méd.	Min	Max	Méd.	Min.	Max	Méd	Min.	Max.	Méd.
Daub4	2,01	2,82	2,22	9,27	10,46	10,04	1,50	1,72	1,58	27,73	28,78	28,08
Daub8	2,28	4,57	3,08	9,36	11,06	10,35	1,46	1,57	1,54	27,25	28,70	27,83
DCT 91%	4,81	6,25	5,02	0,094	0,148	0,122	3,61	6,54	4,76	64,71	68,64	64,44
DCT 94%	4,84	5,34	5,01	0,125	0,200	0,161	2,75	5,00	3,50	62,10	66,16	64,02
Haar 91%	3,43	4,29	3,80	8,99	11,20	9,82	1,55	1,77	1,63	27,13	29,04	28,28
Haar 94%	3,31	11,51	7,95	9,14	10,48	10,00	1,51	1,74	1,59	27,72	28,90	28,13
Haar do Matlab	2,01	3,93	2,44	9,30	10,16	9,90	1,56	1,71	1,61	27,99	28,75	28,21
WSQ	2,00	2,00	2,00	5,92	10,53	6,87	1,50	2,67	2,32	27,67	32,67	31,41

- **Banco *NistDB***

Tabela 7 - Resumo dos resultados para cada técnica. contendo o mínimo, o máximo e a média.

Técnicas	Tempo(segundos)			RMSE			SNRrms			PSNR(db)		
	Min.	Max.	Méd.	Min.	Max.	Méd.	Min.	Max.	Méd.	Min.	Max.	Méd.
Daub4	2,31	5,14	2,88	7,34	10,66	9,49	1,49	2,17	1,169	27,56	30,81	28,56
Daub8	2,23	6,42	3,37	6,82	10,52	9,29	1,51	2,33	1,731	27,68	31,44	28,79
DCT 91%	5,00	5,68	5,22	0,02	0,089	0,05	3,91	19,87	9,51	69,10	79,64	73,62
DCT 94%	4,06	6,37	5,08	0,03	0,113	0,07	3,41	15,93	7,36	67,03	77,72	71,48
Haar 91%	3,84	5,45	4,46	4,96	9,22	7,85	1,73	3,40	2,08	28,82	34,69	30,30
Haar 94%	1,53	5,00	3,85	5,48	9,36	8,24	1,42	2,91	1,92	5,00	33,34	29,30
Haar do Matlab	2,10	3,76	2,82	8,10	10,82	9,87	1,47	1,96	1,62	27,44	29,95	28,25
WSQ	2,00	2,00	2,00	2,16	7,70	3,80	2,07	7,36	4,52	30,40	41,41	36,85

6.7 Avaliação da qualidade das imagens

A qualidade das imagens originais e das imagens recuperadas foram comparadas utilizando o software “GrFinger 4.2”, para cada banco e para cada técnica. A técnica WSQ apresentou os melhores resultados, mantendo a qualidade da imagem. As demais técnicas oscilaram de qualidade, mantendo ou degradando a qualidade das imagens originais.

Tabela 8 - Comparação da qualidade das imagens originais e das recuperadas com o software “GrFinger 4.2”.

técnicas	Banco		
	<i>DsPami</i>	<i>Fingdb</i>	<i>Nistdb</i>
Daub4	1/10	12/51	1/39
Daub8	1/10	6/51	1/39
DCT 91%	5/10	15/51	5/39
DCT 94%	2/10	12/51	3/39
Haar 91%	3/10	35/51	4/39
Haar 94%	2/10	16/51	6/39
Haar do Matlab	0/10	17/51	1/39
WSQ	9/10	43/51	33/39

7 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

7.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

7.2 Conclusões sobre os Resultados

Nesse trabalho foi realizada a comparação entre as seguintes técnicas de compressão: Transformada Discreta do Cosseno, Transformada de *Wavelets de Haar*, Transformada de *Wavelets de Daubechies* (Daub4 e Daub8), e a WSQ.

As técnicas foram comparadas através das métricas RMSE, *SNRrms* e *PSNR*, do tempo de compressão, e da qualidade das imagens. A técnica WSQ foi adotada como referência, por ser utilizada pelo FBI.

O resultado da comparação através das métricas mostrou que a técnica DCT foi a que apresentou os melhores resultados, seguida pela técnica WSQ. Por outro lado a Daub4 e a Daub8, realizaram a compressão com maior variação na taxa de compressão, (91% a 98%).

A qualidade das imagens recuperadas, avaliadas pelo software “GrFinger 4.2”, é mantida com a técnica WSQ para a maioria das imagens de todos os bancos. Para as demais técnicas a qualidade oscilou.

No que se refere ao tempo de compressão, a técnica WSQ foi a que apresentou melhores resultados. De acordo com Bradley e Brislawn (1994) essa técnica é a que

produz maiores taxas de compressão com melhor qualidade da imagem recuperada para imagens de impressão digital.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se a avaliação das técnicas de compressão através da análise ROC, utilizando um sistema que compara a imagem original com a recuperada, conforme apresentado em Figueroa-Villanueva et al., (2003).

Outras técnicas mais recentes também podem ser avaliadas como aquela apresentada em Grasemann e Miikkulainen (2005).

É interessante lembrar ainda, que o padrão JPEG 2000, também foi considerado perfeitamente adequado para a compressão de impressões digitais conforme apresentado em Figueroa-Villanueva et al., (2003), portanto é interessante utilizá-lo na comparação com outras técnicas.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE, L. A. (2001). *Estudos em transmissões Multicasting de Vídeo comprimido*, Instituto de Ciências Matemática e Computação, Universidade de São Paulo (USP- São Carlos).
- AQUINO, F. R., (1998). Um Estudo sobre Metodologias de Codificação Fractal, *Universidade Federal Fluminenses (UFF)*.
- ARANTES, M. (2002). *Procedimento Para Reconhecimento De Impressões Digitais Combinando Neocognitron E MLP*. - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).
- ARAÚJO, M. E. C.; BOSSOIS, L. M; SANTANA, J. L. (2003). “O Arquivo Datiloscópico Criminal Brasileiro: Os Tipos Fundamentais e Suas Frequências”. XIII Congresso Mundial de Criminologia, Sociedade Internacional de Criminologia, Criminologia Clínica.
- ARID (2006). Centro de tecnologia de Software. Disponível em: <http://cts.bancobrasil.com.br/Arid.htm>. Acesso em: 26 março 2007.
- ASHINO, R.; MORIMOTO, A.; NAGASE, M.; VAILLANCOURT, R. (2003). “Comparing Multiresolution SVD with Other Methods for image Compression”. Fourth ISAAC Congress (York University). Conselho de pesquisa da engenharia do Canadá e os matemáticos do centro da Universidade de Kyoiku de Osaka de Universidade de Montreal, Kashiwara, Universidade do Osaka no Japão. pp.1-15.
- BELC, D.V.; FOO, S.Y.; ROBERTS, R.G. (2005). “Comparisons of multi-resolution analysis methods for Mammogram and fingerprint image compression “- *IEEE. Center for Innovative and Advanced Signal Processing (CIASP)* Florida State University Tallahassee, Florida, (USA).

- BOMBONATTI, J. (1984). Manual de Classificação do Arquivo Monodactilar, vol 1, pp.1-17.
- BOUCHARD T. (1997). Iq Similarity in Twins Reared Apart: Findings and Responses to Critics. Disponível em: <http://galton.org/index.html>. Acesso 30 março 2006.
- BRADLEY, J. N.; BRISLAWN, C. M. (1994). "The Wavelet /Scalar Quantization Compression Standard for Digital Fingerprint Images". *IEEE*, pp 205-208; Los Alamos Nacional Laboratory, Los Alamos, New Mexico USA.
- BRISLAWN, C. (2002). The FBI Fingerprint Image Compression Standard. Disponível em: <http://www.c3.lanl.gov/~brislawn/FBI/FBI.html>; Acesso em 18 janeiro 2006).
- CHEN W.H.; SMITH C. H. (1977). "Adaptive Coding of Monochrome and Color image". *IEEE Transactions on Communications*, vol. com-25, no.11 pp.1285 - 1292.
- CHONG, M. M. S.; GAY, R. K. L.; TAN, H. N.; LIU, J.(1992). "Automatic Representation of Fingerprints for Data Compression by B-Spline Functions. *Pattern Recognition*, vol. 25, no.10, pp. 1199-1210.
- CLARKE, R. J. (1995). "Digital Compression of Still Images and Video", *Series in Signal Proc. and its App., Ed. Academic Press*.
- COETZEE, L.; BOTHA, E.C.(1993). "Fingerprint Recognition in Low Quality Images". *Pattern Recognition/ Elsevier Science* vol. 26, no.10 pp. 1441-1460.
- COGNAXON, (2007). "WSQ viewer v. 24". Disponível em: [http:// www.Cognaxon.com](http://www.Cognaxon.com). Acesso em: 02 fevereiro 2007.
- CONCI, A., (1998). Codificação Fractal. Disponível em: <http://www.ic.uff.br/~aconci/compressão /fractal.htm>. Acesso em: 02 fevereiro 2006.

- COSTA, J. P. (2000). Origens Da Medicina Legal. Disponível em: <http://www.geocities.com/rjaf2000/origens.html>. Acesso em 30 março 2006.
- COSTA, S. M. F. (2001). *Classificação E Verificação De Impressões Digitais*, Engenharia Elétrica de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2001.
- DAUBECHIES, I (1990). "The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization And Signal Analysis". *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.36, no.5, pp. 961-1005.
- DAUBECHIES, I (1992). "The wavelet transform, time – frequency localization e sinal analysis", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.36, no.5, pp. 961-1005.
- DEROSE, T. D.; STOLLNITZ, E. J.; SALESIN. D. H. (1994). *Wavelets for Computer Graphics: A Primer*, Dep. of Comp. Sci. and Eng., University of Washington.
- ELECCIÓN, M. (1973). "Pattern Recognition - Automatic Fingerprint Identification". *IEEE Spectrum*, pp. 36-45.
- ESAKKIRAJAN, S.; VEERAKUMAR T.; MURUGAN S. V. R.; SUDHAKAR (2006). "Fingerprint Compression Using Contourlet Transform and Multistage Vector Quantization". *International Journal of Biomedical Sciences*, vol. 1, no. 2, pp.1306-1216.
- FARIA, R. R. A. (1997) *Aplicação De Wavelets Na Análise De Gestos Musicais Em Timbres De Instrumentos Acústicos Tradicionais*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- FBI (1984) "FBI: Federal Bureau of Investigation. The Science of Fingerprints: Classification and Uses". *Government Printing Office*, Washington.

- FIGUEROA-VILLANUEVA, M. A.; RATHA N. K.; BOLLE R. M. (2003). "A Comparative Performance Analysis of JPEG 2000 vs. WSQ for Fingerprint Image Compression", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 385–392.
- FONSECA M. S. (2004). *Um estudo sobre a Influência das Famílias wavelets na Compressão de Imagem*. Universidade Federal Fluminense de Niterói – RJ.
- FVC. (2000 e 2001). Fingerprint Verification Competition. Disponível em: fvc2000@csr.unibo.itou. Acesso em julho 2004.
- GÖKMEN, M. (1993). "Edge detection and surface reconstruction using refined regularization," *IEEE Trans.Patt. Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-15, no. 5, pp.492-499.
- GÖKMEN, M.; Jain, A.K. (1995). " $\lambda\tau$ -space representation of image and generalized edge detection". *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*
- GÖKMEN, M.; ERSO, I. Y.; JAIN A, K. (1996). *Compression of Fingerprint Images Using Hybrid Image Model*. Department of Computer Science, Electrical and Electronics Faculty Istanbul Technical University.
- GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. (2000). *Processamento de imagens Digitais*. Editora Edgard Blicher Ltda.
- GRASEMANN, U.; MIIKKULAINEN, R. (2005). "Effective Image Compression Using Evolved Wavelets ". *ACM*, pp. 1961 - 1968 Washington.
- GRASP, A., (1995). "An Introduction to Wavelets", *IEEE Computational Science and Engineering*. vol 2, no 2.
- GRGIC, S.; MRAK, M. GRGIC, M.; ZOVKO-CIHLAR B. (2003). Comparative Study of Jpeg and Jpeg 2000 Image Coders. University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing Unska 3 / XII, HR-10000 Zagreb, pp. 109- 112. CROATIA.

- GRIAULE (2003). *Software de Classificação “GrFinger 4.2”*. Disponível em: http://paginas.terra.com.br/informatica/jscatena/UNIP/Software/Gr_FingerPrint.zip. Acesso em: 13 novembro 2006).
- HENRY, E. R. (1905). *Classification and Uses of Fingerprints*, Wyman and Sons Ltda.
- HERZ D.; OSÓRIO P. L.; GÖRGEN, J. (2002). *Introdução da tecnologia digital na Comunicação Social Eletrônica- Relatório TV Digital*. Instituto de Estudos e Pesquisas em Comunicação (EPCOM). Análise do processo de implementação da tecnologia digital na mídia eletrônica do Brasil.
- HONG, L; JAIN, A; PANKANTI, S.; BOLLE, R. (1996). “Fingerprint Enhancement”. *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp. 202 - 207.
- HRECHAK, A. K.; MCHUGH, J. A. (1990). “Automated Fingerprint Recognition Using Structural Matching”. *Pattern Recognition*, vol. 23, no. 8, pp. 893-904. <http://bias.csr.unibo.it/fvc2000/databases.asp>, (Acesso - 06/08/2006).
- HUFFMAN, D. (1952). “A Method for the Construction of Minimum Redundancy Codes”. *IEEE*, vol. 40, no. 9, pp. 1098-1101.
- JAIN, K. (1997). “An Identity-Authentication System Using Fingerprints”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.85, no. 9, pp.1365b - 1388.
- KARU, K.; JAIN, A. J. (1992). “Fingerprint Classification. Pattern”. *Recognition*, vol. 29, no. 3, pp. 389 - 404.
- KAVRAKI, L. E.; SVESTKA, P.; LATOMBE, J.C.; OVERMARS, M. H. (2004). “Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High- Dimensional Configuration Spaces”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Dept. of Comput. Sci., Univ CA. Stanford. Vol. 12, pp. 566-580.

- KAZIENKO, J. F. (2003). *Assinatura Digital de Documentos Eletrônicos Através da Impressão Digital*. Universidade Federal de Santa Catarina Programa de pós - graduação em Ciência da Computação, Florianópolis.
- KEHD, Y. C. (1968). *Exercícios de Datiloscopia*. Editora Sugestões Literárias.
- LEE, H. C.; GAENSSLEN, R. E. (1991). *Advances in Fingerprint Technology*. Elsevier New York.
- LIU, S.; SILVERMAN, M. (2001). "A Practical Guide to Biometric Security Technology". *IT Professional e IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.3, no.1, pp.27-32.
- LUMINI, A.; MAIO, D.; MALTONI, D. (1997). "Continuous Versus Exclusive Classification for Fingerprint Retrieval". *Pattern Recognition Letters*, no.18, pp. 1027 - 1034.
- MALLAT, S.G. (1989). "A Theory For Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.11, no.7, pp. 674-93.
- MALTONI D.; MAIO D.; JAIN A. K.; PRABHAKAR S. (2003). *Handbook of Fingerprint Recognition*, Springer Professional Computing, pp. 85.
- MARK, N. (1992). *The Data Compress in Book*, MA&T Books.
- MOAYER, B.; FU, K. S. (1975). "A Syntactic Approach to Fingerprint" *Pattern Recognition*, vol. 7, pp.1-23.
- MVF. (2006). Mvfsoftware - Empresa de Software comercial. Disponível em: <http://www.mvfsoftware.com/index.php?link=hardware&hardware=torniquetes>. Acesso em 07 de junho 2006.

- NAVARRO, P.L.K.G. (2001), “AFIS - Automated Fingerprint Identification System CAC. Disponível em: <http://www.pr.gov.br/batebyte/edicoes/2001/bb111/afis.htm>. Acesso 18 janeiro 2006.
- PEREIRA, M. (2005). Tecnologia Multimídia. Disponível em: <http://www.di.ubi.pt/cursos/mestrados/mei/5052/fichs/ChapterCompress.pdf?PHPSESSID7a7ccdffed8821536cd017a5b51caa38>. Acesso 13 junho 2006.
- PROTÁZIO, J. M. B(2002). *Análise Wavelet Aplicada a Sinail Geofísicos*, Universidade de Campinas (UNICAMP).
- RABBANI, M.; JONES, P. W. (1991). “Digital Image Compression Techniques, Tutorial Texts in Optical Engineering”, *SPIE Press*, vol. TT7.
- RABELLO, E. (1996). *Curso De Criminalística*. Cidade Baixa Porto alegre RS: Sagra - Dc Luzzatto.
- RAO, K.; BALCK, K. (1978). “Finding the Core Point in a Fingerprint”. *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-27, no.1.
- RATHA, N. K.; CHEN, S.; JAIN, A. K. (1995). “Adaptative Flow Orientation – Based Feature Extraction in Fingerprint Images”. *Pattern Recognition*, vol. 28, no.11, pp. 165- 1672.
- RIGOTTI H. G. (2004). *Codificação de Imagem Usando Transformada Cosseno*. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.
- SAHA, S. (2000). Image Compression - From DCT to Wavelets: A Review. Disponível em: <http://www.acm.org/crossroads/xrds6-3/sahaimgcoding.html>. Acesso em: 26 março 2005.
- SANTOS, A. C. (1994). *Uma técnica por transformada para compressão de imagens*. Instituto de Ciências Matemática e Computação, Universidade de São Paulo (USP- São Carlos).

SAYOOD, K. (1996). *Introduction to Data Compression*. Morgan Kaufmann Pub.

SHNAIDER, I.; PAPLIRISKI, A. P. (1996). "Compression of Fingerprint Images Using Wavelet Transform and Vector Quantization". *International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA)*, pp. 437 - 440, Australia, Gold Coast.

SILVA, C. Y. V. W. (2006). *Extração de Características de Imagens Médicas Utilizando Wavelets para Mineração de Imagens e Auxílio ao Diagnóstico. Ciência da Computação, como requisito parcial para a conclusão*. Universidade Federal de São Carlos.

SILVA, F. A. (1998). *Imagens Utilizando a Transformada Discreta do Cosseno. Ciência da Computação, como requisito parcial para a conclusão*. - Universidade do Oeste Paulista – Presidente Prudente (Unoeste).

STOLLNITZ, E. J.; DEROSE, A. D.; SALESIN, D. H. (1995). "Wavelets for Computer Graphics: A Primer.1". *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol.15, no.3, pp.76-84. Disponível em: <http://www.software995.com/>. Acesso em: 26 agosto 2006.

STOLLNITZ, E.J.; DEROSE, A. D.; SALESIN, D.H. (1996). *Wavelets for Computer Graphics Theory and Applications*; Morgan Kaufmann Publishers, California, San Francisco.

TAVARES JUNIOR, G. S. A. (1991). *A Papiloscopia nos Locais De Crime: Datiloscopia, Quiroscopia, Podoscopia*. Editor Ícone São Paulo.

TOCHETTO, D.(1999). *Identificação Humana*. Editora Sagra Luzzatto, Porto Alegre/RS.

TOOLBOX, (2001) Toolbox do Matlab da versão 7.0.

TURK, M; PENTHAND, A. (1991). "Eigenfaces for Recognition". *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol 3, no.1, pp. 1207 - 1214.

WATSON, A. B. (1994). "Image Compression Using the Discrete Cosine Transform". *Mathematica Journal*, pp 81–88.

XIAO, Q.; RAAFAT, H. (1991). "Fingerprint Image Post Processing: A Combined Statistical and Structural Approach". *Pattern Recognition*, vol. 24, no.10, pp. 985-992.

Anexo A - Norma e normalização

A norma é uma função que mede o tamanho de vetores. Em um espaço vetorial de dimensão finita, usa-se normalmente a norma $\|u\| := \sqrt{u \cdot u}$. Esta norma é denominada norma-2, e é um dos membros da família de p-normas, as quais são definidas como segue:

$$\|u\|_p := \left(\sum_i |u_i|^p \right)^{1/p} \quad (38)$$

No limite, quando p vai para o infinito, obtém-se o que é conhecido como max-norma:

$$\|u\|_\infty := \max_i |u_i| \quad (39)$$

Quando se trabalha com um espaço de função (como por exemplo, funções que são contínuas em $[0,1]$) usa-se frequentemente uma das L^p normas, definidas como:

$$\|u\|_p := \left(\int_0^1 |u(x)|^p dx \right)^{1/p} \quad (40)$$

A max-norma para funções no intervalo $[0,1]$ é dada por:

$$\|u\|_\infty := \max_{x \in [0,1]} |u(x)| \quad (41)$$

A norma que é utilizada com maior frequência para funções é a norma L^2 , a qual pode também ser escrita como $\|u\| := \sqrt{u \cdot u}$, se for usado o produto interno padrão.

Um vetor u com $\|u\| = 1$ é dito ser normalizado. Se uma base ortogonal for composta por vetores que são normalizados na norma L^2 , essa base é denominada ortonormal. Dessa forma, a base $u_1, u_2, \dots$ é ortonormal se

$$\langle u_i | u_j \rangle = \delta_{i,j} \quad (42)$$

onde $\delta_{i,j}$ é chamado de delta de Kronecker, e é definido como 1 se $i=j$ e 0 caso contrário.

Exemplo: Os vetores $e_1=[100]^T$, $e_2=[010]^T$, $e_3=[001]^T$ formam uma base orthonormal para o espaço de produto interno $\Re^3$ dotado com a equação de produto escalar.

Anexo B - Algoritmo de compressão da Transformada de Daub 4, Daub 8 e Haar do Matlab

```
clear all
close all
clc
Im = imread('AA7.bmp');
t=cputime;

x=Im

n = 4; w = 'haar'; % coloca - se a db2 ou db4;
[c,l] = wavedec2 (x,n,w); % Usa-se o wdencmp para comprimir imagens. Decomposição Wavelet de x.
thr=200; % thresholding dos coeficientes Wavelet.
[xd,cxd,lxd,perf0,perf12] = wdencmp('gbl',c,l,w,n,thr,'h',3);

erms=0;
snrms=0;
snrrms=0;
psnr=0;

xd= uint8(xd)

[lin col] = size(Im);

erms = sqrt((1/(lin*col)) * ( sum(sum( (xd - Im).^2 ) ) ))
snrms = ( sum( sum(xd.^2) ) ) / ( sum(sum( (xd - Im).^2 ) ) );
snrrms = sqrt(snrms)
psnr = 20*log10(255/erms)%255 é o numero de bits/pixel

disp('haar = Tempo de processamento:')
sprintf('%5.3f',cputime-t)
imshow ([xd],[]);
display(perf12);
```


Anexo C - Algoritmo de compressão da Transformada de DCT

```

clc;
clear all;
close all;
t=cputime;
I = imread('E13.bmp');
I = im2double(I);%Converte a intensidade da image I para real(double,
%rescalando o dado se necessario.
T = dctmtx(8);
B = blkproc(I,[8 8],'P1*x*P2',T,T');
% Descarta 58 dos 64 coeficientes para cada bloco 8x8
mask = [1 1 0 0 0 0 0 0
        1 1 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0
        0 0 0 0 0 0 0 0];
B2 = blkproc(B,[8 8],'P1.*x',mask);
I2 = blkproc(B2,[8 8],'P1*x*P2',T',T);
%imshow(I)
figure, imshow(I2)
disp('Tempo de processamento 94:')
sprintf('%5.3f',cputime-t)

erms=0;
snrms=0;
snrrms=0;
psnr=0;

[lin col] = size(I);

erms = sqrt((1/(lin*col)) * ( sum(sum( (I2 - I).^2 ) ) ))
snrms = ( sum( sum(I2.^2) ) ) / ( sum(sum( (I2 - I).^2 ) ) );
snrrms = sqrt(snrms)
psnr = 20*log10(255/erms)

```

Anexo D - Algoritmo de compressão da Transformada de *Wavelet de Haar*

```

clc;
clear all;
close all;
Im = imread('Vruim10.bmp');
a = (Im);

t=cputime;
dim=size(a);
dimx=dim(1,1);
dimy=dim(1,2);

inix=(dimx-256)/2;
inix=int16(inix);
inix=double(inix);

iniy=(dimy-256)/2;
iniy=int16(iniy);
iniy=double(iniy);

fimx=inix+256;
fimy=iniy+256;
for j=inix+1:fimx
    for i=iniy+1:fimy
        C(j-inix,i-iniy)= a(j,i);
    end
end

dim1=size(C);
dimy=dim1(1,1);
dimx=dim1(1,2);

imshow(C);
imwrite(C,'original.jpeg','bmp');
title('Imagem original');

%aplicar a transformada de wavelets:

C=double(C);

C=C./512;

g=dimx;

erro=input('Entre com o erro desejado em porcentagem %:');
erro=erro/100;
%
while g>=2
    for i=1:(g)
        for j=1:g/2
            D(i,j)=(C(i,2*j-1)+C(i,2*j))/sqrt(2);

```

```

        D(i,g/2+j)=(C(i,2*j-1)-C(i,2*j))/sqrt(2);
    end
end

for j=1:(g)
    for i=1:g/2
        E(i,j)=(D(2*i-1,j)+D(2*i,j))/sqrt(2);
        E(g/2+i,j)=(D(2*i-1,j)-D(2*i,j))/sqrt(2);
    end
end

for i=1:g
    for j=1:g
        C(i,j)=E(i,j);
    end
end

g=g/2;

end

% imshow(C,[]);
%
% %fim da transformada de Wavelet
%
tamanho=0;
for i=1:dimy
    for j=1:dimx
        tamanho=tamanho+(C(i,j))^2;
    end
end
%erro relativo L2
error=tamanho*erro^2;

numzero=0;

lmin=0;
lmax=256;
w=4;
dif1=0;
while w~=1
    limiar=(lmin+lmax)/2
    dif2=dif1;
    dif1=int32(10000*limiar);
    if dif1==dif2
        w=w-1;
    else
        w=4;
    end

s=0;
for i=1:dimy
    for j=1:dimx
        if abs(C(i,j))<=limiar
            s=s+(C(i,j))^2;
        end
    end
end
if s<error
    lmin=limiar;

```

```

        else
            lmax=limiar;
        end
    end

    for j=1:dimx
        for i=1:dimy
            if abs(C(i,j))<=limiar
                C(i,j)=0;
                numzero=numzero+1;
            end
        end
    end
end

%Compactacao da imagem com o erro estipulado (Cria o vetor MacCompact):

MatVet=[];

for i=1:dimx
    MatVet=[MatVet,C(i,:)];
end

MatCompact(1,1)=MatVet(1);

k=1;

for i=2:(dimx*dimy) %começa a compactação
    if MatVet(i)==0
        nada=1;
    else
        MatCompact(2,k)=i;
        MatCompact(1,k+1)=MatVet(i);
        k=k+1;
    end
end

MatCompact(1,k+1)=0;
MatCompact(2,k)=dimx*dimy;
dim2=size(MatCompact)
dimCompact=dim2(1,2);

##### RESULTADOS #####
'Tamanho da figura: 256x256'tamanho do arquivo compactado:'
dim=size(MatCompact)
save compac MatCompact dimy dimx
'Total de pixel:'
256*256
'Erro utilizado em %:'
erro*100
'limiar:'
limiar
'Total de zeros depois do truncamento:'
numzero
'Tamanho do arquivo compactado:'
T=dim(1,1)*dim(1,2)
'Porcentagem de Compactacao'
(65536-T)*100/65536
#####
disp('Tempo de processamento:')
sprintf('%5.3f',cputime-t)

```

```

%%Descompactacao do vetor gerado no programa 'compressao'
clear all;
close all;
load compac

dim=size(MatCompact);
%Reconstrução da imagem
VetReconst(1)=MatCompact(1,1);
dimCompact=dim(1,2);
for i=2:dimCompact
    VetReconst(MatCompact(2,i-1))=MatCompact(1,i);
end
k=1;
for i=1:dimy
    for j=1:dimx
        MatRec(i,j)=VetReconst(k);
        k=k+1;
    end
end

C=MatRec;

g=2;

D1(dimx,dimy)=0;
E1(dimx,dimy)=0;

while g<=dimx

    for j=1:g
        for i=1:g/2
            D1(2*i-1,j)=(C(i,j)+C(g/2+i,j))/sqrt(2);
            D1(2*i,j)=(C(i,j)-C(g/2+i,j))/sqrt(2);
        end
    end

    for i=1:g
        for j=1:g/2
            E1(i,2*j-1)=(D1(i,j)+D1(i,g/2+j))/sqrt(2);
            E1(i,2*j)=(D1(i,j)-D1(i,g/2+j))/sqrt(2);
        end
    end

    for i=1:g
        for j=1:g
            C(i,j)=E1(i,j);
        end
    end
    g=g*2;
end
C=C.*512;
figure(2)
F=uint8(C);
imwrite(F,'resultado','bmp');
imshow(F); title('Imagem compactada');
G=F

```

```
Im = imread('Vruim10.bmp')
F1 =(Im);

erms=0;
snrms=0;
snrrms=0;
psnr=0;

[lin col] = size(F1);

erms = sqrt((1/(lin*col)) * ( sum(sum( (G - F1).^2 ) ) ))
snrms = ( sum( sum(G.^2) ) ) / ( sum(sum( (G - F1).^2 ) ) );
snrrms = sqrt(snrms)
psnr = 20*log10(255/erms)
```

Anexo E – Tabelas dos resultados dos algoritmos de compressão

Tabela 9 – Resultados do software classificador “GrFinger 4.2”, para as imagens originais e as recuperadas, do banco de dados *DsPami*.

imagem Original	Pontos de classificação	Daub4	Daub8	DCT 91%	DCT 94%	Haar do Matlab	Haar 91%	Haar 94%	WSQ
A1	Media 278	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 292	Ruim 282	Sem utilização	Ruim 284	Ruim 296	Media 99
A4	Ruim 328	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 912	Sem utilização	Ruim 290	Ruim 308	Ruim 288
A5	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 814	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 288	Sem utilização
AA12	Media 310	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 814	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 298	Ruim 304
AA7	Media 874	Ruim 288	Sem utilização	Média 292	Ruim 444	Sem utilização	Média 284	Ruim 396	Media 670
E13	Ruim 310	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 288	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 296
E3	Ruim 296	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 280	Ruim 262	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 288	Ruim 288
E8	Boa 302	Sem utilização	Sem utilização	Media 308	Ruim 286	Sem utilização	Média 290	Media 258	Boa 312
E9	Ruim 340	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 478
Vruim	Ruim 284	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 302	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 278

Tabela 10 – Banco de dados DsPami: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica Daub 4.

Imagem	Taxa de compressão perfl2	n. de níveis	thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A1	93.94	3	2500	1.891	10.4741	1.5246	27.7285
A4	93.87	3	2500	2.500	10.5800	1.5093	27.6411
A5	94.12	3	8000	2.188	10.7383	1.4871	27.5121
AA12	91.59	5	300	2.172	10.5954	1.5021	27.6285
AA7	94.83	5	300	2.375	10.1484	1.5716	28.0028
E13	97.99	4	1800	2.281	9.5100	1.6792	28.5672
E3	96.61	4	5000	2.391	10.4037	1.5349	27.7870
E8	92.24	4	5000	2.203	10.4039	1.5349	27.7869
E9	95.52	5	5000	2.500	10.0931	1.5821	28.0504
Vruim10	97.26	3	2500	2.438	10.1685	1.5704	27.9857

Tabela 11 - Banco de dados *DsPami*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica Daub 8.

Imagem	Taxa de compressão perfl2	n. de níveis	thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A1	94.29	3	1000	2.031	10.4959	1.5214	27.7104
A4	94.46	3	1000	1.734	9.9056	1.6121	28.2132
A5	95.63	3	1000	3.063	10.3500	1.5429	27.8320
AA12	93.13	5	500	3.000	10.7498	1.4827	27.5028
AA7	91.51	4	1500	2.578	10.5989	1.5066	27.6256
E13	98.40	3	1000	2.578	9.5072	1.6796	28.5698
E3	97.16	4	2000	2.578	10.1134	1.5790	28.0328
E8	93.02	3	500	2.484	10.3617	1.5411	27.8222
E9	96.16	3	2000	2.297	9.9568	1.6038	28.1684
Vruim10	97.76	3	2000	2.563	9.9695	1.6018	28.1573

Tabela 12 - Banco de dados *DsPami*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica DCT.

Nome da imagem	Tempo da compressão 91%	RMSE 91%	SNRrms 91%	PSNR 91%	Tempo da compressão 94%	RMSE 94%	SNRrms 94%	PSNR 94%
A1	4.953	0.0759	7.4271	70.5210	4.000	0.0975	5.7524	68.3529
A4	5.281	0.0684	9.8585	71.4290	4.172	0.0975	6.8763	68.3464
A5	5.063	0.0565	12.3316	73.0854	4.938	0.0855	8.1148	69.4875
AA12	5.047	0.0906	5.1186	68.9896	4.938	0.1186	3.8568	66.6510
AA7	5.000	0.1202	5.3676	66.5341	4.891	0.1608	3.9566	64.0056
E13	4.859	0.0476	13.3044	74.5790	5.078	0.0613	10.3089	72.3795
E3	4.891	0.0460	14.6454	74.8720	5.078	0.0703	9.5548	71.1894
E8	4.984	0.0882	6.3449	69.2248	5.016	0.1183	4.6805	66.6694
E9	4.969	0.0978	7.6247	68.3268	5.031	0.1119	6.6437	67.1537
Vruim10	4.406	0.0623	11.6914	72.2417	4.938	0.0777	9.3582	70.3259

Tabela 13 - Banco de dados *DsPami*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica, *Wavelet de Haar* com 91%.

Nome da imagem	Valor do erro	t. da % comp.	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A1	16	90.79%	5.156	9.1455	1.7461	28.9066
A4	14	90.08%	4.594	8.8790	1.7985	29.1635
A5	13	91.44%	4.422	9.0355	1.7673	29.0118
AA12	24	91.11%	4.766	9.6718	1.6499	28.4207
AA7	22	90.65%	4.938	9.7249	1.6420	28.3731
E13	9	90.63%	4.672	11.0613	2.0400	27.2547
E3	10	91.21%	4.781	8.3534	1.9116	29.6935
E8	16	90.91%	4.703	8.9608	1.7208	29.0839
E9	15	92.05%	4.641	9.3888	1.7007	28.6786
Vruim10	10	90.09%	5.141	8.5551	1.8666	29.4863

Tabela 14 - Banco de dados *DsPami*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica, *Wavelet de Haar* com 94%.

Nome da imagem	Valor do erro	t. da % comp.	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A1	18	94%	4.359	13.6294	1.6850	25.4412
A4	17	94.34%	4.484	9.2777	1.7212	28.7820
A5	15	94.36%	4.391	9.3674	1.7047	28.6985
AA12	26	93.06%	4.594	9.8742	1.6160	28.2407
AA7	26	94.78%	4.984	9.9976	1.5972	28.1329
E13	10	93.24%	4.766	8.1843	1.9511	29.8712
E3	12	94.97%	4.359	8.9529	1.7836	29.0915
E8	20	93.56%	4.500	9.5190	1.6776	28.5590
E9	15	92.05%	4.531	9.3888	1.7007	28.6786
Vruim10	12	94.58%	4.375	9.1316	1.7487	28.9198

Tabela 15 - Banco de dados *DsPami*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica Haar do Matlab.

Imagem	Taxa de compressão perfl2	n. de níveis	thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A1	93.94	3	2500	1.891	10.4741	1.5246	27.7285
A4	93.92	3	1000	1.672	9.9015	1.6128	28.2167
A5	93.78	4	1500	1.500	10.7489	1.4856	27.5035
AA12	92.21	4	150	1.719	10.0336	1.5903	28.1017
AA7	92.71	4	200	1.688	10.0382	1.5907	28.0977
E13	97.58	5	280	1.766	9.5267	1.6762	28.5519
E3	96.29	5	1500	1.719	10.4455	1.5288	27.7523
E8	91.19	5	1500	1.719	10.3961	1.5360	27.7934
E9	94.78	5	1500	1.688	10.1006	1.5810	28.0438
Vruim10	96.85	5	750	1.781	10.2639	1.5558	27.9045

Tabela 16 - Banco de dados *DsPami*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica WSQ.

Nome da imagem	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A1	2.000	5.4923	2.9075	33.3357
A4	2.000	4.4854	3.5602	35.0949
A5	2.000	3.9722	4.020.2	36.1503
AA12	2.000	6.3831	2.4807	32.0302
AA7	2.000	7.3951	2.1558	30.7519
E13	2.000	3.7267	4.2849	36.7043
E3	2.000	3.3835	4.7196	37.5434
E8	2.000	5.7637	2.7704	32.9168
E9	2.000	6.5115	2.4480	31.8572
Vruim10	2.000	4.6508	3.4335	34.7802

Tabela 17 - Resultados do software classificador “GrFinger 4.2”, para as imagens originais e as recuperadas, do banco de dados *Fingdb*.

imagem Original	Pontos de classificação	Daub4	Daub8	DCT 91%	DCT 94%	Haar Matlab	Haar 91%	Haar 94%	WSQ
1_1AA	Média 286	Ruim 400	Ruim 366	Média 288	Ruim 800	Sem utilização	Média 256	Ruim 408	Média 276
1_8AA	Média 68	Ruim 658	Ruim 296	Média 302	Ruim 800	Médio 402	Média 480	Ruim 344	Média 300
10_5anormal	Média 470	Ruim 286	Sem utilização	Ruim 302	Ruim 304	Ruim 296	Ruim 280	Ruim 294	Média 464
10_8anormal	Média 45	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 264	Ruim 298	Sem utilização	Ruim 298	Ruim 284	Média 332
11_5E	Média 300	Ruim 290	Ruim 270	Ruim 286	Ruim 328	Média 72	Média 272	Ruim 272	Média 292
11_8E	Média 100	Ruim 45	Ruim 290	Ruim 60	Ruim 328	Média 278	Ruim 260	Ruim 272	Média 58
12_7D	Média 296	Ruim 356	Sem utilização	Ruim 282	Ruim 604	Ruim 328	Média 322	Ruim 270	Média 276
13_7D	Ruim 296	Ruim 530	Ruim 294	Ruim 282	Ruim 732	Ruim 376	Ruim 282	Ruim 278	Média 296
14_1E	Média 374	Ruim 292	Sem utilização	Ruim 290	Ruim 688	Ruim 304	Ruim 316	Ruim 302	Média 416
14_5E	Média 382	Média 412	Ruim 292	Ruim 280	Ruim 566	Média 65	Média 292	Ruim 302	Média 416
14_6E	Média 476	Ruim 832	Sem utilização	Ruim 288	Ruim 1034	Ruim 370	Média 292	Média 496	Média 430
14_7E	Média 488	Sem utilização	Ruim 312	Ruim 332	Ruim 1034	Ruim 296	Ruim 332	Ruim 376	Média 66
15_4A	Média 284	Ruim 264	Sem utilização	Ruim 298	Ruim 680	Ruim 338	Ruim 263	Ruim 302	Média 286
16_1Druim	Média 294	Ruim 272	Ruim298	Média 264	Ruim 430	Ruim 294	Média 280	Ruim 274	Média 308
16_3Druim	Média 278	Ruim 288	Sem utilização	Ruim 310	Ruim 430	Ruim 292	Ruim 278	Ruim 282	Média 50
16_7Druim	Média 306	Ruim 298	Ruim 288	Média 292	Ruim 560	Ruim 276	Média 289	Média 278	Média 80
17_2Vruim	Média 346	Sem utilização	Ruim 288	Média 300	Ruim 304	Ruim 288	Média 288	Média 274	Média 346
17_4Vruim	Média 338	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 278	Ruim 514	Ruim 298	Média 265	Ruim 248	Média 346
17_7Vruim	Boa 78	Sem utilização	Sem utilização	Média 314	Ruim 288	Média 270	Média 282	Ruim 286	Média 72
18_1Eruim	Média 282	Ruim 314	Sem utilização	Ruim 296	Ruim 288	Ruim 290	Média 296	Ruim 292	Média 302
18_3E	Média 312	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 264	Ruim 288	Ruim 286	Ruim 296	Ruim 292	Média 370
18_6Eruim	Média 292	Ruim 290	Sem utilização	Ruim 300	Ruim 318	Ruim 306	Média 284	Ruim 288	Média 282
18_7E	Média 302	Ruim 298	Sem utilização	Ruim 284	Sem utilização	Ruim 286	Ruim 280	Ruim 304	Média 274
19_1AA	Média 376	Ruim 758	Ruim 292	Média 274	Ruim 802	Média 284	Média 302	Ruim 306	Média 66
19_7AA	Média 58	Médio 626	Ruim 292	Média 304	Ruim 582	Média 344	Média 284	Média 379	Média 680
2_2Druim	Média 280	Ruim 366	Ruim 286	Ruim 302	Sem utilização	Média 300	Média 284	Ruim 791	Média 69
2_7Druim	Média 97	Ruim 304	Ruim 300	Média 278	Ruim 420	Média 300	Média 332	Ruim 338	Média 70
20_1Vruim	Média 358	Ruim 286	Sem utilização	Ruim 316	Ruim 306	Ruim 276	Média 316	Ruim 284	Média 76
20_5Vruim	Média 410	Ruim 278	Sem utilização	Ruim 302	Ruim 316	Ruim 286	Ruim 302	Ruim 376	Média 63
21_7D	Média 666	Ruim 346	Sem utilização	Ruim 292	Ruim 526	Ruim 278	Média 672	Ruim 290	Média 642
3_8AA	Boa 312	Ruim 380	Sem utilização	Médi a 306	Ruim 598	Médio 108	Medi a 288	Média 272	Média 130
4_3Vruim	Média 986	Ruim 798	Sem utilização	Ruim 400	Ruim 902	Ruim 310	Média 716	Ruim 546	Média 100
4_5Vruim	Média 570	Ruim 288	Sem utilização	Média 268	Média 446	Ruim 320	Média 360	Média 446	Média 332
5_2Vruim	Média	Ruim 292	Ruim 296	Ruim 310	Ruim 520	Ruim 88	Média 432	Ruim 334	Média 418
5_4Vruim	Média 352	Ruim 600	Ruim 280	Ruim 300	Média 366	Ruim 518	Ruim 462	Ruim 344	Ruim 346
5_7Vruim	Média 94	Ruim 338	Sem utilização	Ruim 296	Ruim 452	Média 119	Média 388	Ruim 328	Média 62
6_5D	Média 738	Ruim 760	Ruim 276	Ruim 540	Ruim 978	Média 98	Ruim 425	Ruim 472	Média 97
7_2AAruim	Ruim 290	Ruim 318	Ruim 290	Ruim 292	Ruim 1006	Ruim 416	Ruim 300	Ruim 326	Ruim 45
7_3Aaruim	Ruim 63	Ruim 1038	Ruim 418	Ruim 288	Media 1052	Ruim 288	Ruim 288	Ruim 596	Ruim 92
7_4AA	Ruim 63	Ruim 732	Ruim 374	Ruim 298	Ruim 994	Ruim 350	Ruim 560	Ruim 274	Ruim 57
7_6AA	Ruim 356	Ruim 736	Sem utilização	Ruim 294	Ruim 866	Ruim 432	Ruim 560	Ruim 538	Ruim 48
7_8AA	Ruim 306	Ruim 548	Ruim 290	Ruim 286	Ruim 1006	Ruim 364	Ruim 322	Ruim 366	Ruim 51
8_1anormal	Ruim 372	Ruim 276	Sem utilização	Ruim 254	Ruim 522	Ruim 290	Ruim 286	Sem utilização	Ruim 314
8_5 anormal	Média 406	Ruim 368	Ruim 286	Média 312	Ruim 904	Ruim 518	Ruim 360	Ruim 400	Média 528
8_6anormal	Média 284	Média 1032	Ruim 294	Ruim 286	Ruim 1024	Média 426	Média 614	Ruim 401	Média 284
8_7anormal	Média 418	Média 882	Ruim 308	Média 414	Ruim 958	Média 88	Média 414	Média 560	Média 526
8_8anormal	Média 478	Ruim 584	Ruim 302	Ruim 286	Ruim 496	Ruim 316	Ruim 292	Ruim 454	Média 418
9_1Druim	Ruim 278	Ruim 288	Sem utilização	Ruim 288	Ruim 310	Ruim 286	Ruim 286	Ruim 302	Média 260
9_5D	Ruim 452	Ruim 524	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 780	Média 88	Sem utilização	Ruim 580	Média 326
9_7Druim	Ruim 292	Ruim 762	Ruim 294	Ruim 288	Ruim 866	Ruim 486	Ruim 456	Ruim 392	Média 296
9_8 ruim	Ruim 342	Ruim 740	Sem utilização	Média 296	Ruim 848	Ruim 356	Ruim 351	Ruim 360	Média 296

Tabela 18 - Banco de dados *Fingdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica *Daub 4*.

Nome da imagem	t. da % comp. PERFL2	n. de níveis	thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
1_1AA	92.61	4	250	2.828	9.7906	1.6101	28.3146
1_8AA	93.07	4	250	2.141	9.8371	1.6073	28.2735
10_5anormal	93.45	4	350	2.078	10.1462	1.5737	28.0048
10_8anormal	93.40	4	800	2.109	10.0889	1.5828	28.0539
11_5E	93.37	4	200	2.156	10.0860	1.5656	28.0564
11_8E	93.08	4	200	2.188	10.1724	1.5531	27.9824
12_7D	92.50	4	300	2.234	9.8755	1.6144	28.2396
13_7D	93.24	4	300	2.125	9.4427	1.6877	28.6289
14_1E	91.21	4	300	2.281	10.1163	1.5722	28.0304
14_5E	92.22	4	250	2.172	10.0997	1.5730	28.0446
14_6E	91.69	4	250	2.063	10.1898	1.5531	27.9675
14_7E	94.97	4	150	2.172	9.7534	1.6186	28.3477
15_4A	93.28	4	350	2.469	9.2735	1.7213	28.7860
16_1Druim	91.23	4	350	2.016	9.9685	1.6004	28.1582
16_3Druim	91.64	4	350	2.078	9.8308	1.6236	28.2790
16_7Druim	91.03	4	350	2.047	9.9291	1.6073	28.1926
17_2Vruim	91.77	4	350	2.063	10.2680	1.5538	27.9010
17_4Vruim	92.55	4	350	2.219	10.1311	1.5731	28.0177
17_7Vruim	93.87	4	200	2.359	10.1253	1.5686	28.0226
18_1Eruim	93.70	4	200	2.141	10.0521	1.5849	28.0857
18_3E	92.86	4	200	2.047	10.2655	1.5524	27.9032
18_6Eruim	92.21	4	200	2.109	10.4585	1.5197	27.7415
18_7E	92.03	4	200	2.094	10.4431	1.5221	27.7543
19_1AA	92.44	4	200	2.188	10.1455	1.5629	28.0053
19_7AA	92.36	4	200	2.344	10.1441	1.5650	28.0065
2_2Druim	91.08	4	200	2.141	10.1958	1.5543	27.9623
2_7Druim	91.01	4	200	2.078	10.3097	1.5338	27.8659
20_1Vruim	92.95	4	200	2.328	10.3230	1.5423	27.8547
20_5Vruim	93.01	4	200	2.266	10.2925	1.5455	27.8804
21_7D	91.60	4	200	2.094	10.4660	1.5078	27.7352
3_8AA	91.34	4	200	2.203	10.1280	1.5652	28.0203
4_3Vruim	93.22	4	200	2.063	9.8786	1.6068	28.2369
4_5Vruim	91.89	4	350	2.109	9.7781	1.6314	28.3257
5_2Vruim	91.09	4	350	2.094	9.9966	1.5950	28.1338
5_4Vruim	92.13	4	250	2.375	9.9877	1.5880	28.1415
5_7Vruim	92.54	4	250	2.375	9.9345	1.6001	28.1879
6_5D	92.97	4	250	2.453	9.8185	1.6192	28.2899
7_2AAruim	92.96	4	300	2.422	9.8835	1.6102	28.2326
7_3AAruim	92.14	4	300	2.422	10.0471	1.5806	28.0900
7_4AA	91.18	4	300	2.453	10.2342	1.5472	27.9297
7_6AA	91.74	4	300	2.453	10.1909	1.5519	27.9666
7_8AA	93.04	4	300	2.016	9.7992	1.6218	28.3069
8_1anormal	92.56	4	300	2.797	9.9762	1.5989	28.1515
8_5anormal	92.53	4	300	2.266	10.0969	1.5788	28.0471
8_6anormal	93.70	4	200	2.047	9.9824	1.5771	28.1461
8_7anormal	92.95	4	250	2.156	10.1658	1.5647	27.9879
8_8anormal	92.38	4	250	2.172	10.1121	1.5718	28.0340
9_1Druim	93.26	4	300	2.281	10.0384	1.5887	28.0975
9_5D	91.76	4	300	2.219	10.1158	1.5681	28.0308
9_7Druim	92.58	4	250	2.297	10.1986	1.5475	27.9600
9_8Druim	93.36	4	200	2.219	9.9504	1.5923	28.1740

Tabela 19 - Banco de dados *Fingdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica *Daub 8*.

Nome da imagem	t. da % comp. PERFL2	n. de níveis	thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
1_1AA	92.04	4	400	3.344	10.0471	1.5783	28.0900
1_8AA	91.75	4	400	3.797	10.1247	1.5709	28.0232
10_5anormal	93.27	3	1000	3.219	10.2354	1.5601	27.9287
10_8anormal	94.86	3	800	3.359	10.0105	1.5952	28.1217
11_5E	91.92	4	3000	2.750	10.4247	1.5318	27.7695
11_8E	92.99	4	300	3.484	10.2461	1.5475	27.9197
12_7D	91.83	4	500	3.734	10.0904	1.5822	28.0527
13_7D	91.65	4	500	4.578	9.6250	1.6586	28.4627
14_1E	92.03	4	400	3.719	10.1674	1.5679	27.9866
14_5E	91.30	4	400	4.047	10.3084	1.5463	27.8670
14_6E	91.22	4	400	4.125	10.3971	1.5271	27.7925
14_7E	91.51	5	500	3.250	10.7049	1.4867	27.5392
15_4A	93.48	4	500	3.203	9.3622	1.7056	28.7033
16_1Druim	91.31	4	500	3.297	10.0878	1.5828	28.0549
16_3Druim	91.67	4	500	3.297	9.9894	1.5985	28.1400
16_7Druim	91.96	4	500	3.375	9.9982	1.5971	28.1323
17_2Vruim	93.35	4	500	3.406	10.2921	1.5512	27.8807
17_4Vruim	92.68	4	500	2.281	10.2234	1.5608	27.9389
17_7Vruim	91.67	4	500	3.422	10.7677	1.4816	27.4883
18_1Eruim	93.21	4	500	3.453	10.3435	1.5436	27.8375
18_3E	93.05	4	500	3.766	10.6126	1.5045	27.6143
18_6Eruim	92.97	4	500	3.531	10.8778	1.4676	27.3999
18_7E	91.78	4	500	3.266	10.8778	1.4676	27.3999
19_1AA	91.59	4	400	3.641	10.4082	1.5302	27.7833
19_7AA	92.08	4	400	2.750	10.3777	1.5348	27.8087
2_2Druim	92.16	5	500	2.703	10.5226	1.5143	27.6883
2_7Druim	91.59	5	500	3.031	10.7960	1.4749	27.4656
20_1Vruim	93.64	4	400	2.703	10.6392	1.4991	27.5926
20_5Vruim	93.66	4	400	2.688	10.5672	1.5085	27.6516
21_7D	92.21	4	400	2.766	10.8499	1.4619	27.4223
3_8AA	92.28	5	500	2.656	10.5058	1.5165	27.7022
4_3Vruim	93.21	5	500	2.672	10.1871	1.5654	27.9698
4_5Vruim	93.89	5	500	2.672	9.8974	1.6130	28.2204
5_2Vruim	94.40	5	500	2.688	10.1166	1.5778	28.0301
5_4Vruim	92.29	5	500	3.000	10.3371	1.5419	27.8428
5_7Vruim	93.22	5	500	2.734	10.2305	1.5596	27.9329
6_5D	93.07	5	500	2.750	10.1195	1.5766	28.0276
7_2Aaruim	93.88	5	500	2.719	10.2187	1.5615	27.9429
7_3Aaruim	93.68	5	500	2.625	10.3323	1.5437	27.8469
7_4AA	92.33	5	500	2.938	10.5808	1.5049	27.6405
7_6AA	92.38	5	500	2.984	10.4755	1.5168	27.7273
7_8AA	93.79	5	500	2.750	10.1199	1.5760	28.0273
8_1anormal	93.42	5	500	2.734	10.2155	1.5628	27.9457
8_5 anormal	93.72	5	500	2.781	10.3734	1.5382	27.8124
8_6anormal	92.03	5	500	2.688	10.6170	1.4933	27.6108
8_7anormal	93.33	5	500	2.703	10.6365	1.4992	27.5949
8_8anormal	93.95	5	500	2.703	10.6265	1.5013	27.6030
9_1Druim	93.53	5	500	2.563	10.3552	1.5418	27.8276
9_5D	92.52	5	500	2.531	10.4635	1.5228	27.7373
9_7Druim	93.15	5	700	2.688	11.0610	1.7226	27.2550
9_8Druim	91.77	5	700	2.688	10.7539	1.4840	27.4995

Tabela 20 - Banco de dados *Fingdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica DCT.

Nome da imagem	Tempo da compressão 91%	RMSE 91%	SNRrms 91%	PSNR 91%	Tempo da compressão 94%	RMSE 94%	SNRrms 94%	PSNR 94%
1_1AA	6.250	0.1459	4.1791	64.8475	5.000	0.2002	2.9682	62.1009
1_8AA	4.969	0.1216	4.7988	66.4295	4.969	0.1768	3.2214	63.1827
10_5anormal	4.875	0.1009	6.0513	68.0548	5.063	0.1324	4.5634	65.6902
10_8anormal	4.906	0.0967	6.5420	68.4243	4.938	0.1254	5.0028	66.1642
11_5E	5.000	0.1443	3.7268	64.9465	4.875	0.1815	2.8993	62.9517
11_8E	4.922	0.1451	3.6701	64.8961	4.938	0.1791	2.9152	63.0680
12_7D	4.859	0.1186	5.0471	66.6461	4.922	0.1540	3.8367	64.3826
13_7D	5.063	0.1115	5.8221	67.1831	5.016	0.1533	4.1785	64.4175
14_1E	4.938	0.1273	4.4683	66.0317	4.891	0.1617	3.4650	63.9582
14_5E	5.047	0.1371	4.1132	65.3913	4.938	0.1778	3.1074	63.1342
14_6E	5.000	0.1276	4.2038	66.0117	4.938	0.1614	3.2683	63.9747
14_7E	5.031	0.1372	3.7643	65.3860	4.938	0.1713	2.9539	63.4555
15_4A	4.969	0.1048	6.3639	67.7253	5.031	0.1456	2.9539	64.8675
16_1Druim	4.891	0.1156	5.2779	66.8680	4.844	0.1578	3.8088	64.1709
16_3Druim	5.344	0.1146	5.4295	66.9480	5.094	0.1550	3.9564	64.3229
16_7Druim	5.016	0.1266	5.0328	66.0824	4.938	0.1690	3.7125	63.5755
17_2Vruim	4.875	0.1178	4.8061	66.7088	5.000	0.1499	3.7253	64.6143
17_4Vruim	4.813	0.1056	5.6658	67.6584	4.891	0.1443	4.0883	64.9432
17_7Vruim	4.844	0.1223	4.1505	66.3820	5.141	0.1576	3.1586	64.1796
18_1Eruim	4.859	0.1111	4.7826	67.2127	5.203	0.1426	3.6749	65.0487
18_3E	4.906	0.1207	4.3155	66.5000	5.000	0.1458	3.5280	64.8584
18_6Eruim	4.906	0.1190	3.8687	66.6200	4.875	0.1480	3.0538	64.7270
18_7E	4.859	0.1181	4.1797	66.6861	5.078	0.1487	3.2640	64.6860
19_1AA	5.000	0.1237	4.4669	66.2863	5.047	0.1716	3.1427	63.4389
19_7AA	5.016	0.1271	4.3313	66.0500	5.063	0.1709	3.1512	63.4782
2_2Druim	5.234	0.1386	3.7948	65.2957	5.156	0.1792	2.8655	63.0636
2_7Druim	5.078	0.1466	3.6189	64.8065	4.953	0.1878	2.7559	62.6578
20_1Vruim	5.281	0.1228	4.4898	66.3444	5.125	0.1582	3.4284	64.1461
20_5Vruim	5.031	0.1261	4.3117	66.1193	5.344	0.1650	3.2308	63.7821
21_7D	5.219	0.1336	3.7113	65.6138	5.047	0.1726	2.8015	63.3875
3_8AA	4.859	0.1482	3.6678	64.7155	5.031	0.1867	2.8464	62.7074
4_3Vruim	5.078	0.1234	4.8560	66.3066	4.859	0.1671	3.5201	63.6688
4_5Vruim	5.078	0.1093	5.6890	67.3561	5.125	0.1549	3.9529	64.3310
5_2Vruim	4.859	0.1226	4.9309	66.3601	5.000	0.1630	3.6497	63.8861
5_4Vruim	4.969	0.1270	4.4820	66.0543	5.000	0.1685	3.3134	63.5981
5_7Vruim	5.156	0.1296	4.3144	65.8794	5.156	0.1676	3.2741	63.6430
6_5D	4.906	0.1249	4.7215	66.1997	4.953	0.1663	3.4841	63.7133
7_2AAruim	5.078	0.1090	5.5907	67.3858	4.844	0.1468	4.0942	64.7948
7_3AAruim	4.938	0.1130	5.3123	67.0715	5.109	0.1626	3.6207	63.9097
7_4AA	4.875	0.1285	4.5775	65.9505	5.063	0.1716	3.3633	63.4385
7_6AA	5.031	0.1193	4.9092	66.5972	5.109	0.1568	3.6789	64.2244
7_8AA	5.125	0.1165	5.4592	66.8012	5.063	0.1543	4.0697	64.3611
8_1anormal	4.953	0.1079	5.5834	67.4717	5.000	0.1440	4.1308	64.9646
8_5 anormal	4.938	0.1098	5.5411	67.3192	4.922	0.1545	3.8756	64.3549
8_6anormal	5.109	0.1359	4.0202	65.4659	4.984	0.1821	2.9259	62.9253
8_7anormal	5.000	0.1168	4.8473	66.7856	5.156	0.1610	3.4479	63.9965
8_8anormal	5.219	0.1182	4.6238	66.6807	5.047	0.1566	3.4267	64.2347
9_1Druim	4.922	0.0942	6.2211	68.6471	4.984	0.1267	4.5780	66.0749
9_5D	5.047	0.1197	4.8952	66.5656	5.047	0.1568	3.6820	64.2234
9_7Druim	5.109	0.1208	4.5320	66.4868	4.984	0.1621	3.3127	63.9369
9_8Druim	4.922	0.1194	5.0184	66.5912	5.094	0.1617	3.6431	63.9557

Tabela 21- Banco de dados *Fingdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica *Wavelet de Haar*, com 91%

Nome da imagem	Valor do erro	t. da % comp.	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
1_1AA	29	91.40%	4.047	9.8766	1.6125	28.2387
1_8AA	26	91.04%	3.922	9.8055	1.6265	28.3014
10_5anormal	19	92.38 %	3.875	9.4116	1.6873	28.6575
10_8anormal	17	92 %	4.000	9.2046	1.7349	28.8507
11_5E	28	92 %	4.172	10.0257	1.5906	28.1085
11_8E	31	91.97 %	3.953	10.2294	1.5595	27.9338
12_7D	19	92.31 %	3.875	9.6483	1.6560	28.4418
13_7D	22	91.15 %	3.875	9.2241	1.7306	28.8323
14_1E	26	91.37 %	4.031	9.7984	1.6293	28.3077
14_5E	27	91.09 %	3.875	9.9325	1.6073	28.1896
14_6E	29	91.68 %	3.906	10.0658	1.5851	28.0739
14_7E	29	91%	4.250	10.9692	1.5867	27.3273
15_4A	20	91.99 %	4.109	8.9959	1.7750	29.0499
16_1Druim	23	91.61 %	3.953	9.5493	1.6722	28.5314
16_3Druim	23	91.64 %	4.047	9.5165	1.6780	28.5613
16_7Druim	23	91.09 %	4.297	9.5262	1.6762	28.5524
17_2Vruim	22	90.93 %	4.109	9.6083	1.6619	28.4779
17_4Vruim	21	91.70 %	3.875	9.5420	1.6723	28.5380
17_7Vruim	26	91.55 %	4.109	9.9238	1.6081	28.1973
18_1Eruim	24	91.86 %	3.641	9.6735	1.6507	28.4191
18_3E	24	91.57 %	3.703	9.8053	1.6282	28.3016
18_6Eruim	27	91.52 %	3.641	9.8848	1.6126	28.2315
18_7E	26	91.78%	3.703	9.9713	1.5997	28.1558
19_1AA	28	91.90 %	3.719	10.0230	1.5925	28.1109
19_7AA	27	91.32 %	3.766	9.9386	1.6064	28.1843
2_2Druim	29	91.27 %	3.688	10.0207	1.5916	28.1128
2_7Druim	30	91.10%	3.875	10.2081	1.5624	27.9519
20_1Vruim	24	91.14 %	3.641	9.8683	1.6173	28.2459
20_5Vruim	26	91.47 %	3.734	10.0023	1.5958	28.1288
21_7D	30	91.71 %	3.719	10.1646	1.5661	27.9890
3_8AA	29	91.43 %	3.813	10.0268	1.5908	28.1075
4_3Vruim	25	91.67 %	3.641	9.8101	1.6270	28.2973
4_5Vruim	21	91.04 %	3.750	9.3921	1.7000	28.6755
5_2Vruim	24	91.73 %	3.688	9.7079	1.6446	28.3883
5_4Vruim	26	91.42 %	3.656	11.2089	1.6170	27.1395
5_7Vruim	26	91.91 %	3.578	9.7616	1.6352	28.3404
6_5D	25	91.33 %	3.578	9.7007	1.6456	28.3948
7_2AAruim	24	91.51 %	3.719	9.6424	1.6555	28.4471
7_3AAruim	25	91.13%	3.672	9.7577	1.6358	28.3439
7_4AA	28	91.44 %	3.469	9.9958	1.5945	28.1345
7_6AA	28	91.47 %	3.578	10.0109	1.5927	28.1214
7_8AA	25	91.98 %	3.438	9.6726	1.6506	28.4199
8_1anormal	22	90.90%	3.766	9.5347	1.6947	28.5446
8_5 anormal	22	91.17%	3.656	9.6001	1.6633	28.4852
8_6anormal	29	91.61%	3.578	10.0803	1.5806	28.0614
8_7anormal	25	91.73%	3.531	9.9112	1.6108	28.2082
8_8anormal	25	91.29%	3.797	9.8243	1.6244	28.2848
9_1Druim	21	91.15%	3.813	9.4700	1.6859	28.6038
9_5D	26	91.03 %	3.703	9.8431	1.6207	28.2682
9_7Druim	28	91.20 %	3.734	10.0282	1.5891	28.1064
9_8Druim	26	91.74 %	3.656	9.9211	1.6077	28.1996

Tabela 22 - Banco de dados *Fingdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica *Wavelet de Haar*, com 94%

Nome da imagem	Valor do erro	t. da % comp.	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
1_1AA	33	94.29 %	3.313	10.0846	1.5808	28.0576
1_8AA	30	94.15 %	8.656	10.0259	1.5912	28.1083
10_5anormal	20	93.63 %	7.306	9.5871	1.6656	28.4970
10_8anormal	19	94.65%	7.140	9.4560	1.6887	28.6166
11_5E	35	94.95 %	7.932	10.4454	1.5276	27.7523
11_8E	35	94.93 %	8.079	10.4434	1.5279	27.7539
12_7D	25	93.29 %	7.553	9.7013	1.6460	28.3942
13_7D	25	93.94 %	8.344	9.4393	1.6915	28.6320
14_1E	28	93.24%	8.484	9.9364	1.6069	28.1862
14_5E	30	93.73%	9.141	10.1014	1.5805	28.0432
14_6E	31	93.30 %	8.025	10.2026	1.5637	27.9566
14_7E	33	94.44 %	7.969	10.3303	1.5440	27.8485
15_4A	22	94%	7.625	9.1438	1.7464	28.9083
16_1Druim	25	93.60%	8.578	9.6749	1.6505	28.4179
16_3Druim	26	94.56 %	8.297	9.6872	1.6484	28.4069
16_7Druim	25	93.26 %	11.516	9.6648	1.6522	28.4270
17_2Vruim	24	94.65 %	8.047	9.7789	1.6329	28.3250
17_4Vruim	24	94.65 %	7.016	9.7692	1.6339	28.3336
17_7Vruim	30	94.96%	8.109	10.2282	1.5605	27.9348
18_1Eruim	26	93.83 %	7.031	9.8241	1.6254	28.2849
18_3E	26	93.71 %	8.234	9.9857	1.5990	28.1432
18_6Eruim	30	94.24%	5.438	10.1727	1.5680	27.9820
18_7E	28	93.58 %	8.219	10.1237	1.5760	28.0240
19_1AA	30	93.54 %	9.219	10.1637	1.5709	27.9897
19_7AA	30	93.84 %	8.735	10.1639	1.5709	27.9896
2_2Druim	32	93.78%	9.063	10.1991	1.5644	27.9596
2_7Druim	34	94.22 %	7.094	10.4327	1.5284	27.7629
20_1Vruim	28	94.78 %	7.900	10.2291	1.5607	27.9341
20_5Vruim	30	94.84 %	8.110	10.2817	1.5526	27.8895
21_7D	34	94.30 %	8.578	10.4812	1.5189	27.7226
3_8AA	33	94.68 %	8.281	10.2341	1.5189	27.9298
4_3Vruim	28	94.18 %	7.266	9.9310	1.6068	28.1909
4_5Vruim	24	94%	7.502	9.5941	1.6643	28.4907
5_2Vruim	26	93.63 %	8.172	9.8152	1.6267	28.2929
5_4Vruim	30	94.72 %	8.125	10.1060	1.5789	28.0393
5_7Vruim	28	93.67 %	8.469	9.8627	1.6184	28.2509
6_5D	28	93.99 %	8.501	9.8699	1.6176	28.2446
7_2AAruim	28	94.80 %	7.260	9.9227	1.6086	28.1982
7_3AAruim	30	94.95 %	7.407	10.0892	1.5824	28.0537
7_4AA	30	93.07 %	8.782	10.1152	1.5762	28.0313
7_6AA	32	94.43 %	7.922	10.2223	1.5599	27.9398
7_8AA	28	94.40 %	7.031	9.8708	1.6176	28.2438
8_1anormal	25	94%	8.609	9.7774	1.6332	28.3263
8_5 anormal	25	94%	8.609	9.8299	1.6245	28.2798
8_6anormal	32	93.87%	8.844	10.2370	1.5571	27.9273
8_7anormal	28	94.21%	8.812	10.1393	1.5747	28.0106
8_8anormal	30	95.27%	8.016	10.1270	1.5763	28.0212
9_1Druim	26	95.58 %	7.850	9.8955	1.6133	28.2221
9_5D	30	94.20 %	7.047	10.1330	1.5743	28.0160
9_7Druim	32	94.24 %	8.118	10.3216	1.5449	27.8558
9_8Druim	30	94.80 %	7.907	10.1525	1.5720	27.9994

Tabela 23 - Banco de dados *Fingdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica Haar do Matlab.

Nome da imagem	t. da % comp. PERFL2	n. de níveis	thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
1_1AA	93.52	5	150	2.828	9.3060	1.7160	28.7555
1_8AA	93.84	5	150	2.141	10.1372	1.5742	28.0125
10_5anormal	93.28	3	250	2.078	10.0506	1.5888	28.0870
10_8anormal	92.49	4	1250	2.109	10.1632	1.5712	27.9902
11_5E	91.72	4	150	2.156	10.0852	1.5817	28.0571
11_8E	91.71	4	150	2.188	10.0745	1.5833	28.0663
12_7D	92.19	4	200	2.234	9.8708	1.6178	28.2437
13_7D	93.30	4	200	2.125	9.4483	1.6898	28.6237
14_1E	93.28	4	150	2.281	9.7855	1.6314	28.3191
14_5E	92.89	4	150	2.172	9.8953	1.6133	28.2222
14_6E	92.29	4	150	2.063	9.9911	1.5968	28.1386
14_7E	91.53	4	150	2.172	10.0597	1.5857	28.0791
15_4A	92.66	4	250	2.469	9.3287	1.7118	28.7344
16_1Druim	92.43	4	200	2.016	9.8044	1.6286	28.3024
16_3Druim	92.55	4	200	2.078	9.7519	1.6375	28.3490
16_7Druim	92.50	4	200	2.047	9.7848	1.6320	28.3198
17_2Vruim	91.88	4	200	2.406	10.0778	1.5845	28.0634
17_4Vruim	93.02	4	200	2.375	9.9232	1.6088	28.1978
17_7Vruim	92.45	4	150	2.391	10.0392	1.5900	28.0968
18_1Eruim	93.35	4	150	2.344	9.8010	1.6292	28.3054
18_3E	92.84	4	150	2.391	10.0256	1.5927	28.1086
18_6Eruim	91.11	4	150	2.250	10.1605	1.5702	27.9925
18_7E	92.16	4	150	2.359	10.1238	1.5758	28.0239
19_1AA	92.93	4	150	2.797	9.9025	1.6116	28.2159
19_7AA	92.92	4	150	2.313	9.9122	1.6106	28.2074
2_2Druim	91.81	4	150	2.609	9.9890	1.5970	28.1404
2_7Druim	91.68	4	150	2.344	10.1166	1.5765	28.0301
20_1Vruim	93.52	4	150	2.391	10.0176	1.5938	28.1156
20_5Vruim	92.97	4	150	2.328	10.0283	1.5918	28.1062
21_7D	91.22	4	150	2.344	10.1429	1.5699	28.0075
3_8AA	92.10	4	150	2.453	9.9515	1.6028	28.1730
4_3Vruim	91.98	4	200	2.344	9.9577	1.6025	28.1676
4_5Vruim	91.51	4	150	2.891	9.7814	1.6325	28.3228
5_2Vruim	94.32	4	150	2.375	9.6889	1.6477	28.4053
5_4Vruim	93.42	4	150	2.406	9.8491	1.6197	28.2628
5_7Vruim	93.35	4	150	2.406	9.7527	1.6365	28.3483
6_5D	93.93	4	150	2.438	9.6702	1.6506	28.4221
7_2AAruim	92.39	4	200	2.422	9.8782	1.6159	28.2372
7_3AAruim	92.01	4	200	2.500	9.9818	1.5992	28.1466
7_4AA	93.50	4	150	2.656	9.7863	1.6290	28.3184
7_6AA	93.63	4	150	2.859	9.7801	1.6302	28.3239
7_8AA	92.60	4	200	2.266	9.7991	1.6294	28.3071
8_1anormal	92.86	4	200	2.359	9.8659	1.6186	28.2481
8_5 anormal	92.86	4	200	3.938	9.9453	1.6056	28.1785
8_6anormal	92.61	4	150	3.031	9.9601	1.5995	28.1655
8_7anormal	93.82	4	150	3.078	9.9021	1.6123	28.2163
8_8anormal	93.42	4	150	3.625	9.8791	1.6156	28.2365
9_1Druim	92.85	4	200	2.406	9.9481	1.6047	28.1760
9_5D	93.82	4	150	2.391	9.7582	1.6351	28.3434
9_7Druim	92.78	4	150	2.391	9.9430	1.6021	28.1804
9_8Druim	91.72	4	200	2.875	10.0896	1.5816	28.0533

Tabela 24 - Banco de dados *Fingdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica WSQ.

Nome da imagem	Tempo da comp.	RMSE	SNRrms	PSNR
1_1AA	2.000	6.7308	2.3255	31.5694
1_8AA	2.000	6.0156	2.6264	32.5453
10_5anormal	2.000	6.6482	2.4016	31.6767
10_8anormal	2.000	6.3481	2.5153	32.0780
11_5E	2.000	7.2477	2.1772	30.9267
11_8E	2.000	7.3772	2.1408	30.7730
12_7D	2.000	6.5349	2.4394	31.8261
13_7D	2.000	6.5065	2.4445	31.8639
14_1E	2.000	10.5388	1.5047	27.6750
14_5E	2.000	7.0686	2.2435	31.1441
14_6E	2.000	7.1168	2.2229	31.0851
14_7E	2.000	7.4862	2.1088	30.6456
15_4A	2.000	6.1294	2.5994	32.3825
16_1Druim	2.000	6.7012	2.3761	31.6077
16_3Druim	2.000	6.8225	2.3354	31.4519
16_7Druim	2.000	6.9128	2.3033	31.3377
17_2Vruim	2.000	6.6713	2.3904	31.6466
17_4Vruim	2.000	5.9274	2.6760	32.6735
17_7Vruim	2.000	7.1447	2.2245	31.0512
18_1Eruim	2.000	6.2587	2.5454	32.2012
18_3E	2.000	7.2674	2.1888	30.9033
18_6Eruim	2.000	7.0039	2.2530	31.2240
18_7E	2.000	7.0209	2.2572	31.2030
19_1AA	2.000	6.9028	2.2968	31.3503
19_7AA	2.000	6.9177	2.2992	31.3316
2_2Druim	2.000	6.6449	2.3767	31.6811
2_7Druim	2.000	7.2887	2.1653	30.8778
20_1Vruim	2.000	7.2351	2.2006	30.9419
20_5Vruim	2.000	7.2791	2.1837	30.8892
21_7D	2.000	7.6447	2.0521	30.4636
3_8AA	2.000	6.8548	2.3061	31.4109
4_3Vruim	2.000	6.8178	2.3244	31.4580
4_5Vruim	2.000	6.4556	2.4692	31.9320
5_2Vruim	2.000	7.0584	2.2558	31.1567
5_4Vruim	2.000	7.0365	2.2472	31.1837
5_7Vruim	2.000	7.1717	2.2082	31.0184
6_5D	2.000	6.8324	2.3208	31.4394
7_2AAruim	2.000	6.1528	2.5891	32.3494
7_3AAruim	2.000	6.2159	2.5593	32.2608
7_4AA	2.000	6.8369	2.3139	31.4337
7_6AA	2.000	6.6139	2.3954	31.7217
7_8AA	2.000	6.5294	2.4390	31.8333
8_1anormal	2.000	6.6817	2.3847	31.6330
8_5anormal	2.000	6.6927	2.3825	31.6188
8_6anormal	2.000	7.2664	2.1607	30.9044
8_7anormal	2.000	6.8380	2.3277	31.4322
8_8anormal	2.000	6.8669	2.3102	31.3956
9_1Druim	2.000	6.0075	2.6565	32.5570
9_5D	2.000	6.7999	2.3330	31.4808
9_7Druim	2.000	6.7351	2.3440	31.5639
9_8Druim	2.000	6.7239	2.3569	31.5783

Tabela 25 - Resultados do software classificador “GrFinger 4.2”. para as imagens originais e as recuperadas,do banco de dados *Nistdb*.

imagem Original	Pontos de classificação	Daub2	Daub8	DCT 91%	DCT 94%	Haar do Matlab	Haar 91%	Haar 94%	WSQ
A06	Média 284	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 276	Ruim 296	Sem utilização	Média 288	Ruim 296	Média 109
A08	Média 292	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 308	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 292	Ruim 292	Média 115
A12	Média 292	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 260	Sem utilização	Ruim 1670	Ruim 312	Ruim 314	Média 127
A18	Média 298	Ruim 282	Sem utilização	Ruim 260	Ruim 272	Ruim 1685	Ruim 264	Ruim 292	Média 147
A19	Média 328	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 274	Ruim 314	Sem utilização	Ruim 288	Ruim 314	Média 108
A20	Média 296	Sem utilização	Sem utilização	Média 290	Média 390	Ruim 1677	Ruim 278	Ruim 292	Média 168
A25	Ruim 312	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Média 72
AA05	Média 276	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 306	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 286	Média 86
D09	Boa 392	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 282	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 312	Ruim 286	Média 229
D13	Média 302	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 290	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 82	Ruim 278	Média 147
D17	Média 256	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 288	Ruim 320	Sem utilização	Ruim 278	Ruim 296	Média 97
D23	Média 274	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 240	Ruim 286	Sem utilização	Ruim 288	Ruim 282	Média 92
E04	Média 296	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 258	Sem utilização	Média 115
E07	Média 318	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 276	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Média 71
E15	Média 304	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 292	Ruim 280	Sem utilização	Ruim 300	Ruim 294	Média 124
E16	Média 302	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 292	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 308	Ruim 298	Média 82
E22	Média 284	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 298	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 53	Ruim 288	Média 153
SA01	Média 28	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 302	Ruim 274	Sem utilização	Ruim 286	Média 296	Média 123
SA06	Ruim 274	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 280	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 302	Ruim 282	Média 87
SA08	Ruim 308	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 72	Ruim 272	Média 95
SA18	Boa 470	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 282	Ruim 269	Média 1678	Média 51	Média 286	Média 470
sA20	Média 304	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 290	Média 610	Ruim 1669	Ruim 300	Ruim 292	Média 104
sA25	Média 302	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 264	Ruim 286	Sem utilização	Ruim 268	Média 294	Média 354
sAA05	Ruim 312	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 306
sAA24	Média 286	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 294	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 278	Ruim 302	Média 103
sD03	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização
sD09	Média 258	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 310	Ruim 278	Sem utilização	Ruim 296	Ruim 296	Média 170
sD17	Média 312	Sem utilização	Sem utilização	Média 292	Ruim 278	Sem utilização	Ruim 278	Ruim 302	Média 96
sD23	Média 286	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 284	Ruim 298	Sem utilização	Ruim 294	Ruim 282	Média 140
sE04	Média 366	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 286	Ruim 293	Sem utilização	Ruim 56	Ruim 302	Média 366
sE07	Ruim 272	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Média 272
sE14	Média 394	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 292	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 81	Média 304	Média 432
sE15	Média 280	Sem utilização	Sem utilização	Média 290	Ruim 302	Sem utilização	Ruim 256	Ruim 290	Média 304
sE22	Média 280	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 276	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 256	Média 284	Média 288
sV02	Boa 776	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 292	Sem utilização	Ruim 1680	Ruim 67	Ruim 288	Boa 668
sV10	Média 310	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 45	Ruim 278	Média 338
sV11	Média 326	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 290	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 286	Ruim 290	Média 317
V02	Boa 64	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 308	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 270	Ruim 1020	Boa 57
V11	Média 276	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 290	Sem utilização	Sem utilização	Ruim 90	Ruim 290	Média 188

Tabela 26 - Banco de dados *Nistdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica *Daub4*

Nome da imagem	t. da % comp. PERF12	N. de níveis	thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A06	97.22	4	1170	3.148	9.4015	1.6985	28.6669
A08	96.56	4	1174	3.188	9.6254	1.6590	28.4624
A12	92.9	5	200	3.328	9.5169	1.6779	28.5609
A18	93.51	5	300	3.125	10.0250	1.5926	28.1091
A19	98.50	3	1200	2.438	7.7539	2.0594	30.3404
A20	90.66	4	1256	2.422	10.3974	1.5358	27.7923
A25	98.81	4	2313	2.313	8.3935	1.9025	29.6519
AA05	91.63	4	2465	2.797	10.1744	1.5695	27.9806
D09	93.25	4	2453	2.453	10.0366	1.5910	28.0990
D13	94.78	4	2465	2.406	9.8214	1.6259	28.2873
D17	95.84	4	1465	2.438	9.5648	1.6695	28.5173
D23	95.58	4	1465	2.484	9.6880	1.6483	28.4061
E04	95.43	4	1465	4.859	9.9767	1.6006	28.1510
E07	98.44	4	2465	2.719	9.9767	1.6006	28.1510
E15	90.98	4	2465	2.469	10.4856	1.5229	27.7189
E16	92.34	4	2465	2.547	9.9152	1.6105	28.2048
E22	96.62	4	2465	2.703	9.3627	1.7056	28.7028
SA01	97.37	4	2465	2.813	8.7180	1.8317	29.3225
SA06	97.75	4	2465	2.750	8.7892	1.8168	29.2518
SA08	98.59	4	2465	2.516	8.6493	1.8462	29.3911
SA18	89.18	4	2465	2.563	10.0885	1.5829	28.0543
sA20	93.55	4	2465	2.578	10.6676	1.4969	27.5695
sA25	97.20	4	2465	2.531	10.1589	1.5719	27.9938
sAA05	98.88	4	2465	2.531	8.4626	1.8870	29.5807
sAA24	97.11	4	2465	2.828	9.2819	1.7204	28.7781
sD03	98.55	4	2465	2.547	9.0306	1.7683	29.0164
sD09	93.77	4	2465	2.563	9.8207	1.6260	28.2880
sD17	95.16	4	3225	5.141	9.6627	1.6526	28.4288
sD23	96.40	4	3225	5.141	9.5094	1.6793	28.5677
sE04	96.03	4	3225	2.406	9.5094	1.5813	28.0455
sE07	99.17	4	2465	2.766	7.3421	2.1750	30.8144
sE14	96.28	4	2465	2.688	9.2675	1.7231	28.7916
sE15	94.18	4	2465	2.578	10.0924	1.5823	28.0509
sE22	95.27	4	2465	2.594	9.5829	1.6664	28.5009
sV02	91.08	4	2465	2.500	10.1927	1.5667	27.9650
sV10	97.86	4	2465	3.000	8.8502	1.8043	29.1917
sV11	97.94	4	3550	2.625	8.8486	1.8047	29.1933
V02	95.64	4	2270	3.797	9.7007	1.6461	28.3947
V11	95.10	5	2500	3.141	9.7978	1.6298	28.3082

Tabela 27 - Banco de dados *Nistdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica *Daub8*.

Nome da imagem	t. da % comp. PERF12	N. de níveis	thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A06	97.54	3	550	2.281	9.3168	1.7140	28.7454
A08	97.10	3	550	2.297	9.4006	1.6987	28.6677
A12	90.73	3	550	2.234	9.7049	1.6454	28.3910
A18	91.30	3	550	2.563	10.0608	1.5872	28.0782
A19	98.59	3	278	2.484	7.7635	2.0569	30.3297
A20	91.48	3	578	3.281	10.3571	1.5418	27.8260
A25	99.03	3	380	3.297	8.2959	1.9249	29.7535
AA05	92.87	3	578	3.938	9.9549	1.6041	28.1701
D09	93.55	3	578	3.297	9.9641	1.6026	28.1621
D13	95.06	3	678	3.469	9.7699	1.6345	28.3330
D17	96.35	3	678	3.328	9.5044	1.6801	28.5723
D23	95.78	3	678	3.250	9.5598	1.6704	28.5218
E04	97.23	3	678	3.750	9.7853	1.6319	28.3193
E07	98.70	3	280	3.406	8.3566	1.9109	29.6902
E15	93.36	3	280	3.578	10.0673	1.5859	28.0725
E16	93.87	3	578	3.344	9.7976	1.6299	28.3084
E22	97.17	3	280	3.031	9.1842	1.7387	28.8699
SA01	97.51	3	280	3.016	8.6270	1.8510	29.4137
SA06	98.30	3	700	4.766	8.6745	1.8409	29.3659
SA08	98.97	3	700	5.328	8.3095	1.9218	29.7394
SA18	89.94	3	578	3.734	10.0096	1.5953	28.1225
sA20	94.19	3	578	3.578	10.5273	1.5169	27.6845
sA25	97.53	3	700	3.953	10.0068	1.5958	28.1249
sAA05	99.22	3	800	3.391	7.7884	2.0503	30.3018
sAA24	97.73	3	800	3.797	9.0253	1.7693	29.0216
sD03	98.83	3	800	3.484	8.6462	1.8469	29.3943
sD09	94.00	3	578	3.281	9.7682	1.6348	28.3345
sD17	95.83	3	700	6.422	9.4942	1.6820	28.5817
sD23	96.78	3	700	2.906	9.4045	1.6980	28.6641
sE04	97.31	3	700	2.484	9.7161	1.6435	28.3810
sE07	99.37	4	1800	3.375	6.8246	2.3399	31.4493
sE14	97.34	3	700	2.984	9.0619	1.7622	28.9864
sE15	94.5	3	578	3.719	10.0023	1.5965	28.1288
sE22	95.87	3	700	2.938	9.3702	1.7042	28.6958
sV02	91.41	3	578	3.391	10.0023	1.5965	28.1288
sV10	98.08	3	700	2.891	8.7577	1.8234	29.2830
sV11	98.37	3	700	3.172	8.6303	1.8503	29.4103
V02	96.15	3	578	3.359	9.6476	1.6552	28.4424
V11	96.93	3	578	2.656	9.5027	1.6804	28.5739

Tabela 28 - Banco de dados *Nistdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica DCT.

Nome da imagem	Tempo da compressão 91%	RMSE 91%	SNRrms 91%	PSNR 91%	Tempo da compressão 94%	RMSE 94%	SNRrms 94%	PSNR 94%
A06	5.313	0.0401	12.3230	76.0700	6.375	0.0580	8.4821	72.8571
A08	5.125	0.0575	9.1292	72.9402	5.313	0.0714	7.3252	71.0564
A12	5.281	0.0638	4.4355	72.0339	6.141	0.0777	3.5989	70.3261
A18	5.234	0.0700	6.2403	71.2251	5.984	0.0903	4.7977	69.0161
A19	5.156	0.0350	13.7441	77.2436	5.125	0.0464	10.3587	74.8048
A20	5.219	0.0646	6.5777	71.9319	4.063	0.0913	4.5954	68.9184
A25	5.297	0.0438	15.0274	75.3065	4.922	0.0535	12.2865	73.5669
AA05	5.203	0.0571	6.8748	73.0033	5.172	0.0759	5.1245	70.5226
D09	5.188	0.0728	5.5748	70.8936	4.828	0.0865	4.6580	69.3912
D13	5.313	0.0592	6.6229	72.6776	4.891	0.0737	5.2888	70.7785
D17	5.063	0.0686	7.3910	71.3984	5.016	0.0843	5.9880	69.6107
D23	5.203	0.0401	9.9635	76.0629	4.859	0.0605	6.5706	72.5027
E04	5.547	0.0567	9.3752	73.0664	4.828	0.0694	7.6354	71.3083
E07	5.156	0.0393	12.6954	76.2475	4.922	0.0489	10.1878	74.3510
E15	5.219	0.0591	6.1267	72.7048	5.172	0.0779	4.5983	70.2987
E16	5.141	0.0600	6.3482	72.5649	4.875	0.0778	4.8533	70.3067
E22	5.453	0.0572	8.3649	72.9833	5.391	0.0698	6.8273	71.2497
SA01	5.109	0.0431	9.3835	75.4407	4.906	0.0545	7.3902	73.3962
SA06	5.094	0.0388	13.7466	76.3510	5.063	0.0560	9.5020	73.1683
SA08	5.172	0.0337	18.6884	77.5773	4.984	0.0476	13.2061	74.5738
SA18	5.109	0.0894	4.8814	69.1043	5.000	0.1134	3.7984	67.0379
sA20	5.484	0.0601	8.1762	72.5472	4.875	0.0832	5.8690	69.7272
sA25	5.688	0.0583	10.9109	72.8179	5.109	0.0784	8.0822	70.2410
sAA05	5.094	0.0314	18.9913	78.2060	4.906	0.0401	14.8469	76.0753
sAA24	5.094	0.0385	11.8560	76.4191	5.156	0.0523	8.7059	73.7628
sD03	5.234	0.0419	15.0032	75.6930	5.219	0.0525	11.9540	73.7306
sD09	5.156	0.0701	6.8974	71.2215	5.078	0.0886	5.4178	69.1794
sD17	5.203	0.0534	8.4365	73.5807	5.078	0.0707	6.3347	71.1383
sD23	5.188	0.0479	9.4608	74.5158	4.953	0.0636	7.1014	72.0611
sE04	5.172	0.0579	9.3509	72.8821	5.172	0.0704	7.6625	71.1764
sE07	5.234	0.0266	19.8759	79.6413	5.047	0.0331	15.9355	77.7282
sE14	5.125	0.0607	7.8077	72.4664	4.938	0.0721	6.5535	70.9747
sE15	5.250	0.0593	7.4356	72.6681	5.094	0.0790	5.5447	70.1806
sE22	5.563	0.0537	7.1321	73.5256	4.922	0.0680	5.5993	71.4758
sV02	5.422	0.0880	3.9126	69.2369	5.031	0.0998	3.4179	68.1446
sV10	5.000	0.0511	9.2812	73.9618	4.984	0.0595	7.9540	72.6394
sV11	5.094	0.0578	9.3011	72.8957	4.938	0.0665	8.0712	71.6800
V02	5.172	0.0758	5.9323	70.5337	4.969	0.0864	5.1818	69.3959
V11	5.172	0.0667	7.7082	71.6485	5.109	0.0856	5.9745	69.4830

Tabela 29 - Banco de dados *Nistdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica *Wavelet de Haar*, 91%

Nome da imagem	Valor do erro	t. da % comp.	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A06	10	90.73	4.422	7.3216	2.1811	30.8387
A08	12	92.05	4.281	8.1316	1.9638	29.9273
A12	23	91.82	4.359	8.1316	1.9638	29.9273
A18	20	92.53	4.281	9.1060	1.7535	28.9442
A19	8	92.85	4.563	6.1515	2.5959	32.3512
A20	20	92.75	4.563	9.0743	1.7598	28.9746
A25	7	89.89	4.484	6.9387	2.3014	31.3053
AA05	18	92.79	4.234	8.6401	1.8482	29.4004
D09	18	91.64	4.063	8.7757	1.8196	29.2651
D13	16	91.82	4.234	8.3186	1.9196	29.7298
D17	14	91.62	4.656	8.4724	1.8848	29.5707
D23	13	92.17	4.078	7.4323	2.1486	30.7084
E04	12	91.79	4.938	8.3243	1.9183	29.7239
E07	9	92.12	3.891	6.9498	2.2977	31.2914
E15	19	91.73	4.078	8.5509	1.8675	29.4906
E16	18	91.16	4.531	8.5065	1.8772	29.5357
E22	13	91.63	4.281	8.1326	1.9635	29.9262
SA01	11	91.00	5.063	6.9229	2.3067	31.3251
SA06	9	91.07	4.250	7.0555	2.2633	31.1603
SA08	7	92.03	4.797	6.8616	2.3273	31.4023
SA18	22	91.42	4.531	9.1178	1.7511	28.9330
sA20	16	91.89	4.422	8.9141	1.7914	29.1293
sA25	11	92.01	4.172	6.4476	1.8702	31.9428
sAA05	6	90.26	4.625	5.9147	2.6998	32.6921
sAA24	11	92.90	4.813	7.3972	2.1587	30.7494
sD03	8	92.52	4.500	7.4203	2.1520	30.7224
sD09	16	91.46	5.125	8.7157	2.7930	29.3248
sD17	14	91.47	4.531	8.1625	1.9563	29.8943
sD23	12	91.04	4.563	7.6088	2.0987	30.5045
sE04	11	90.47	4.500	8.0310	1.9884	30.0354
sE07	5	87.72	5.109	4.6948	3.4014	34.6985
sE14	13	92.34	4.453	8.1463	1.9602	29.9116
sE15	16	92.62	3.844	8.6242	1.8516	29.4164
sE22	15	92.73	4.391	7.9878	1.9991	30.0823
sV02	24	92.45	4.109	9.2270	1.7306	28.8295
sV10	10	89.26	4.859	7.2596	2.1997	30.9126
sV11	10	89.32	5.453	7.5898	2.1040	30.5262
V02	16	91.41	4.141	8.7379	1.8275	29.3026
V11	14	92.66	4.094	8.6052	1.8557	29.4356

Tabela 30 - Banco de dados *Nistdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica *Wavelet de Haar*, 94%

Nome da imagem	Valor do erro	t. da % comp.	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A06	12	94.88%	3.797	9.2983	1.7174	28.7627
A08	13	94%	4.4021	8.4192	1.8967	29.6254
A12	25	94.82%	4.219	8.7122	1.8329	29.3283
A18	22	94.84%	3.766	9.3401	1.7096	28.7238
A19	9	95.47%	3.688	6.6366	2.4061	31.6919
A20	22	94.81%	3.891	9.3697	1.7043	28.6963
A25	8	93.66%	3.688	7.4105	2.1549	30.7338
AA05	20	94%	3.813	9.0249	1.7694	29.0219
D09	20	94.69%	3.609	9.1572	1.7438	28.8955
D13	17	93.64%	3.938	8.5585	1.8658	29.4829
D17	15	93.63%	4.781	8.6988	1.8357	29.3416
D23	14	93.72%	1.5314	7.7345	2.0646	30.3622
E04	13	93.96%	4.141	8.6431	1.8476	29.3974
E07	10	94.76%	3.391	7.3642	2.1684	30.7883
E15	22	95.17%	3.453	9.0839	1.7579	28.9654
E16	20	93.87%	3.797	8.8571	1.8029	5.109
E22	14	93.63%	3.922	8.3783	1.9060	29.6677
SA01	12	93.53%	5.000	7.2941	2.1893	30.8714
SA06	10	93.47%	4.109	7.4403	2.1463	30.6990
SA08	7	92.03%	4.094	6.8616	2.3273	31.4023
SA18	22	93.75%	3.453	9.1178	1.7511	28.9330
sA20	17	93.27%	3.328	8.8286	1.8005	29.2130
sA25	12	94.%	3.750	8.8286	1.8088	29.2130
sAA05	7	94	3.641	6.5881	1.4219	31.7556
sAA24	12	94.82%	3.484	7.7375	2.0638	30.3588
sD03	9	95.28%	3.219	7.8774	2.0272	30.2032
sD09	18	94.54%	4.797	9.0687	1.7609	28.9799
sD17	15	93.18%	4.000	9.0687	1.8992	28.9799
sD23	14	94.81%	3.484	8.2276	1.9409	29.8253
sE04	12	93%	4.656	8.2276	1.9090	31.3590
sE07	6	93.1%	3.375	5.4843	2.9117	33.3484
sE14	14	94.41	4.672	8.3939	1.9024	29.6515
sE15	17	94%	3.969	8.8355	1.8073	29.2062
sE22	16	94.42	3.938	8.2479	1.9361	29.8040
sV02	25	93.83%	3.672	9.3590	1.7062	28.7062
sV10	11	92.67%	3.844	5.7828	2.0883	32.8880
sV11	11	92.58%	3.938	7.8999	2.0214	30.1784
V02	17	93.58%	3.875	8.9296	1.7883	29.1142
V11	14	92.66%	4.156	8.6052	1.8557	29.4356

Tabela 31 - Banco de dados *Nistdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica Haar do Matlab.

Nome da imagem	t. da % comp. PERFI2	número	Thr	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A06	93.34	8	4800	2.484	9.9878	1.5988	28.1414
A08	91.85	7	4800	2.578	10.8207	1.4758	27.4457
A12	93.64	3	80	2.438	8.7131	1.8326	29.3274
A18	91.06	4	280	2.719	10.0382	1.5908	28.0977
A19	97.34	4	1800	2.766	8.1091	1.9692	29.9514
A20	92.86	3	180	3.016	9.8816	1.6160	28.2342
A25	97.30	8	1600	3.703	8.9103	1.7922	29.1329
AA05	92.35	3	1600	3.344	9.9836	1.5995	28.1451
D09	93.31	3	1600	3.234	9.9849	1.5993	28.1440
D13	93.78	7	600	3.453	9.9371	1.6070	28.1856
D17	93.83	7	1600	3.531	10.0302	1.5921	28.1046
D23	93.07	7	1600	3.109	9.8860	1.6153	28.2304
E04	95.06	8	6800	3.422	10.4262	1.5316	27.7683
E07	95.69	8	2600	3.641	9.6762	1.6503	28.4167
E15	91.33	3	3109	3.109	10.2287	1.5612	27.9344
E16	92.26	3	3109	3.500	9.8409	1.6227	28.2701
E22	93.62	8	2600	2.953	10.0989	1.5812	28.0453
SA01	95.59	7	2600	2.234	10.2606	1.5563	27.9074
SA06	95.87	7	2600	2.109	9.4618	1.6877	28.6113
SA08	96.50	8	3600	3.234	9.6854	1.6487	28.4085
SA18	92.66	4	140	2.547	9.6269	1.6588	28.4611
sA20	93.69	4	240	2.688	10.4620	1.5264	27.7385
sA25	96.03	4	2400	2.250	10.1855	1.5678	27.9711
sAA05	97.14	8	2800	2.188	9.5569	1.6709	28.5245
sAA24	95.08	8	2800	2.172	9.9395	1.6066	28.1835
sD03	96.30	8	4800	2.203	10.2246	1.5618	27.9379
sD09	93.76	4	4800	2.172	9.6859	1.6487	28.4080
sD17	93.28	6	4800	2.891	9.9295	1.6082	28.1923
sD23	93.37	8	4800	2.250	10.1640	1.5711	27.9895
sE04	95.04	7	4600	2.250	10.6010	1.5063	27.6238
sE07	97.63	7	4600	2.922	8.9256	1.7891	29.1180
sE14	91.19	7	4600	2.453	10.2265	1.5615	27.9362
sE15	92.27	7	4600	3.109	10.3668	1.5404	27.8179
sE22	93.35	7	4600	2.719	9.9202	1.6097	28.2004
sV02	93.76	4	80	3.766	9.3585	1.7063	28.7066
sV10	96.24	8	5800	2.641	9.1378	1.7475	28.9139
sV11	92.49	8	4600	3.375	10.2635	1.5559	27.9049
V02	93.69	7	2006	2.547	9.9704	1.6016	28.1565
V11	91.92	7	2600	2.563	10.4247	1.5318	27.7695

Tabela 32 - Banco de dados *Nistdb*: tempo de compressão e resultados das métricas para a técnica WSQ.

Nome da imagem	Tempo da compressão	RMSE	SNRrms	PSNR
A06	2.000	2.5321	6.3066	40.0613
A08	2.000	4.3290	3.6888	35.4030
A12	2.000	4.4273	3.6057	35.2080
A18	2.000	4.1058	3.8886	35.8629
A19	2.000	2.3498	6.7958	40.7102
A20	2.000	3.6131	4.4197	36.9732
A25	2.000	3.5845	4.4550	37.0423
AA05	2.000	3.5608	4.4846	37.0999
D09	2.000	4.2594	3.7491	35.5439
D13	2.000	4.4379	3.5982	35.1872
D17	2.000	4.3103	3.7048	35.4406
D23	2.000	2.7120	5.8883	39.4651
E04	2.000	3.7956	4.2071	36.5452
E07	2.000	2.7993	5.7045	39.1897
E15	2.000	4.0961	3.8984	35.8833
E16	2.000	3.7153	4.2975	36.7309
E22	2.000	3.6849	4.3336	36.8024
SA01	2.000	3.2602	4.8980	37.8659
SA06	2.000	2.6943	5.9270	39.5220
SA08	2.000	2.3603	6.7657	40.6716
SA18	2.000	5.2374	3.0416	33.7485
sA20	2.000	3.3269	4.7999	37.6900
sA25	2.000	3.9755	4.0168	36.1429
sAA05	2.000	2.3123	6.9059	40.8498
sAA24	2.000	2.7657	5.7738	39.2946
sD03	2.000	3.3007	4.8380	37.7588
sD09	2.000	3.8014	4.2007	36.5318
sD17	2.000	3.1601	5.0533	38.1369
sD23	2.000	3.0057	5.3128	38.5719
sE04	2.000	4.2194	3.7846	35.6257
sE07	2.000	2.1672	7.3685	41.4130
sE14	2.000	3.8456	4.1525	36.4315
sE15	2.000	7.7006	2.0736	30.4003
sE22	2.000	3.4361	4.6473	37.4094
sV02	2.000	6.2082	2.5707	32.2715
sV10	2.000	3.8568	4.1404	36.4062
sV11	2.000	4.9211	3.2450	34.2896
V02	2.000	5.7981	2.7541	32.8651
V11	2.000	4.8231	3.3109	34.4642