

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

JOAQUIM DE MIRA JÚNIOR

**ABORDAGEM BASEADA EM MORFOLOGIA MATEMÁTICA PARA
A IDENTIFICAÇÃO BIOMÉTRICA ATRAVÉS DA ÍRIS**

TESE

CURITIBA

2012

JOAQUIM DE MIRA JÚNIOR

**ABORDAGEM BASEADA EM MORFOLOGIA MATEMÁTICA
PARA A IDENTIFICAÇÃO BIOMÉTRICA ATRAVÉS DA ÍRIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Kurt Schneider

Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Borba Neves

CURITIBA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M671 Mira Júnior, Joaquim de

Abordagem baseada em morfologia matemática para a identificação biométrica através da íris. / Joaquim de Mira Júnior. Curitiba, 2012.
158 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Kurt Schneider
Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Borba Neves

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.
Área de Concentração: Engenharia Biomédica. Curitiba, 2012.

1. Identificação biométrica. 2. Reconhecimento de íris. 3. Morfologia matemática I. Schneider, Fábio Kurt. II. Neves, Eduardo Borba. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. IV. Título.

CDD 621.3

Título da Tese Nº. 74

**“Abordagem Baseada em Morfologia Matemática para
Identificação Biométrica Através da Íris”**

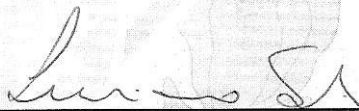
por

Joaquim de Mira Junior

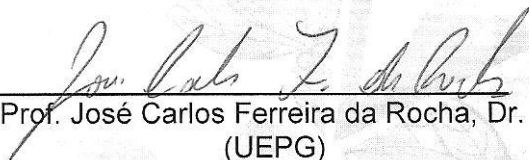
Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em CIÊNCIAS - Área de Concentração: Engenharia Biomédica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Curitiba, às 14h00 do dia 25 de maio de 2012. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



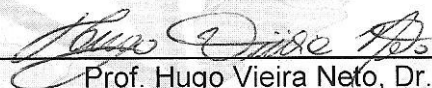
Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.
(Presidente)



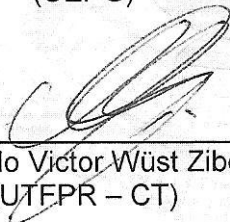
Prof. Luciano Silva, Dr.
(UFPR)



Prof. José Carlos Ferreira da Rocha, Dr.
(UEPG)

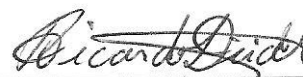


Prof. Hugo Vieira Neto, Dr.
(UTFPR – CT)



Prof. Marcelo Victor Wüst Zibetti, Dr.
(UTFPR – CT)

Visto da Coordenação:



Prof. Ricardo Lüders, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

À minha esposa Tônia e meu filho Lucas que apoiaram em todos os momentos, pelo incentivo, compreensão, paciência e amor.

Aos meus pais, Joaquim e Arady (*in memoriam*), pela educação e estudo que me proporcionaram, além do apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

- A Deus que sempre esteve presente em minha vida, iluminando o meu caminho.
- Ao meu orientador Prof. Fábio Kurt Schneider, pela confiança em mim depositada, pelas inúmeras contribuições dadas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, pelas críticas construtivas e opiniões sinceras, pela paciência e serenidade e pelo respeito pessoal.
- Ao meu co-orientador Prof. Eduardo Borba Neves, pelo apoio e incentivo, pelas críticas e sugestões e pelas contribuições dadas ao trabalho.
- À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa, pelo apoio e incentivo.
- À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI, os quais oportunizaram o acesso ao qualificado programa de desenvolvimento acadêmico e profissional.
- Ao Exército Brasileiro, na pessoa do Major Eduardo Borba Neves, pelo apoio para criação do banco de imagens de íris BIRD (*Brazilian Iris Research Database*).
- Aos colegas do CPGEI pela amizade, companheirismo, convívio, incentivo, troca de conhecimento e aprendizado, entre eles: Joyce Cristiane Klock, Tomas Fernandes, Walter e Luciana Araújo, Leonardo Zanin e Neusa Grando. Em especial ao amigo Cláudio R. Marquette, pelo apoio incondicional e motivação, por sua amizade sincera e pelas horas de conversa e trabalho em nossos projetos.
- Aos queridos amigos Marcelo Zibetti e Juliane Morando, pela acolhida e por sua amizade sincera e prazerosa.
- Ao amigo e professor Hugo Vieira Neto, pelo apoio e dedicação, pela sua postura e exemplo de método, pelo envolvimento na elaboração e revisão de artigos e pelas sugestões e críticas que contribuíram para este trabalho.
- Aos professores e colegas Humberto Gamba, Gilberto Branco, Richard Demo de Souza e Leyza Dorini, pelo apoio, incentivo e conhecimento compartilhado.
- Ao amigo Joel Pavesi (Pardal) pela companhia e pelas caronas nas viagens a Curitiba.
- A todos aqueles que contribuíram diretamente ou indiretamente para a construção deste trabalho.

“O futuro tem muitos nomes. Para os fracos, é o inatingível. Para os temerosos, o desconhecido. Para os valentes, é a oportunidade”.

(Victor Hugo)

RESUMO

MIRA JUNIOR, Joaquim. Abordagem Baseada em Morfologia Matemática para a Identificação Biométrica através de Íris, 2012. 158 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Este trabalho apresenta uma proposta para a identificação biométrica de indivíduos através da análise da íris, utilizando uma abordagem baseada em Morfologia Matemática. Algoritmos baseados em operadores morfológicos são utilizados nas diversas etapas de processamento, para segmentação, realçamento de padrões, extração e representação de características. Para avaliar os algoritmos, testes foram realizados utilizando imagens do Banco de Dados de Imagens de Íris da Universidade de Bath - UBIID, da base de dados do Instituto de Automação da Academia Chinesa de Ciências - CASIA, além de imagens adquiridas para compor o Banco de Dados Brasileiro de Pesquisa de Íris - BIRD. A fim de avaliar o desempenho de classificação, o método proposto foi comparado ao método de Daugman (referência). Os resultados obtidos indicam a viabilidade da abordagem proposta para o reconhecimento de íris. Para imagens do UBIID, o desempenho do método proposto foi superior ao do método de referência, alcançando 99,35% de acerto no ponto de erro igual (*EER - Equal Error Rate*), onde as taxas de falsa aceitação (FAR) e de falsa rejeição (FRR) são iguais.

Palavras-chave: Identificação Biométrica. Reconhecimento de Íris. Morfologia Matemática.

ABSTRACT

MIRA JUNIOR, Joaquim. Mathematical Morphology Based Approach for Biometric Identification by Iris, 2012. 158 f. Doctorate Thesis – Graduate School of Electrical Engineering and Computer Science, Federal University of Technology - Parana. Curitiba, 2012.

This paper presents a proposal for biometric identification of individuals by analyzing the iris, using an approach based on Mathematical Morphology. Algorithms based on morphological operators are used in several stages of processing, segmentation, enhancement of patterns, extraction and representation of features. To evaluate the algorithms, tests were performed using images of the University of Bath Iris Image Database - UBIID, of the Chinese Academy of Sciences Institute of Automation - CASIA, and acquired images to compose the Brazilian Iris Research Database - BIRD. In order to assess the performance of classification, the proposed method was compared to Daugman's method (reference). The results indicate the viability of the proposed approach for iris recognition. For UBIID images, the performance of the proposed method was superior to the reference method, achieving 99.35% accuracy at the point of equal error (*EER - Equal Error Rate*), where the false acceptance rate (FAR) and false rejection rate (FRR) are equal.

Keywords: Biometrics Identification. Iris Recognition. Mathematical Morphology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Projeção de rendimentos da indústria de biometria [Fonte: adaptado de (IBG, 2009)].	26
Figura 2: Divisão do mercado mundial de biométricos por tecnologias de captura [Fonte: adaptado de (IBG, 2009)].	26
Figura 3: Anatomia do olho: (a) estruturas do olho, (b) corte transversal [Fonte: adaptado de (VISÃO, 2001)].	40
Figura 4: Sistema visual humano [Fonte: adaptado de (HARVARD, 2010)].	41
Figura 5: Movimentos da pupila: (a) contração, (b) intermediário e (c) dilatação [Fonte: adaptado de (MILLER <i>et al.</i> , 2005)].	42
Figura 6: Anatomia da íris humana: (a) corte transversal e (b) setor frontal [Fonte: adaptado de (WILDES, 1997)].	43
Figura 7: Definições: (a) Conjunto Y ; (b) translação de Y por x ; (c) Y e seu complemento; (d) conjunto K ; (e) reflexão de K em relação a sua origem; (f) diferença entre os conjuntos Y e K .	45
Figura 8: Formato dos <i>elementos estruturantes</i> com raio igual a 2 pixels: (a) <i>EE cruz</i> ; (b) <i>EE caixa</i> ; (c) <i>EE disco</i> .	46
Figura 9: Exemplos de <i>gradientes</i> de uma imagem binária: (a) imagem original, (b) o resultado da aplicação do <i>gradiente</i> , (c) os contornos internos das bolhas resultado do <i>gradiente interno</i> e (d) os contornos externos obtidos pelo <i>gradiente externo</i> [Fonte: (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003)].	48
Figura 10: <i>Gradiente morfológico</i> em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem com as transições realçadas.	48
Figura 11: <i>Abertura top-hat</i> binária: (a) imagem original, (b) resultado da <i>abertura</i> usando um <i>EE esférico</i> e (c) resultado obtido após a subtração da imagem (b) por (a) [Fonte: (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003)].	49
Figura 12: Exemplo de <i>abertura top-hat</i> em tons de cinza: (a) imagem contendo três picos, (b) resultado da aplicação do operador utilizando um <i>EE caixa 7x7</i> , (c) e (d) perspectivas em superfícies topográficas das imagens (a) e (b), respectivamente [Fonte: (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003)].	50
Figura 13: <i>Reconstrução</i> binária: (a) imagem condicionante contendo as bolhas - original, (b) linha representando o marcador na imagem, (c) imagem obtida após 8 <i>dilatações condicionais</i> e (d) resultado da <i>reconstrução</i> , onde as bolhas marcadas correspondem aquelas que estão conectadas ao marcador [Fonte: (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003)].	51
Figura 14: Trajetória do movimento $\mathbf{x}(t)$ e o vetor de deslocamento $\mathbf{d}_{t,\tau}(\mathbf{x})$ associado [Fonte: (STILLER & KONRAD, 1999)].	53
Figura 15: Regiões de movimento: (a) modelo global, (b) modelo local e (c) modelo de ponto individual [Fonte: (STILLER & KONRAD, 1999)].	54
Figura 16: Exemplos de campos de vetores; (a) modelo <i>translacional</i> , (b) modelo <i>afim</i> [Fonte: (STILLER & KONRAD, 1999)].	56

Figura 17: Diagrama apresentando as diversas etapas de um sistema de reconhecimento de íris típico.....	59
Figura 18: Diagrama do método proposto por Daugman.....	60
Figura 19: Mapeamento das coordenadas da íris para um sistema de coordenadas polares adimensionais.	60
Figura 20: Normalização: (a) imagem da íris e (b) sua versão normalizada em outra escala.	60
Figura 21: Diagrama do sistema de reconhecimento de íris proposto apresentando as diversas etapas do processamento.	61
Figura 22: Segmentação da íris – a fronteira interna aparece identificada por uma linha branca pontilhada, enquanto a externa por uma linha branca contínua.	63
Figura 23: (a) íris sob análise I ; (b) imagem I_1 resultante da aplicação do operador <i>reconstrução-por-fechamento top-hat</i> – estruturas da íris aparecem em destaque.....	64
Figura 24: (a) imagem I_1 ; (b) imagem I_2 resultante da aplicação do operador <i>abertura</i> – padrões mais relevantes evidenciados.....	65
Figura 25: (a) imagem I_2 ; (b) imagem I_3 resultante da aplicação do operador <i>abertura por área</i> – pequenas estruturas removidas.	65
Figura 26: (a) imagem I_3 ; (b) imagem I_4 resultante da aplicação da <i>limiarização</i> – estruturas mais relevantes mantidas.	66
Figura 27: (a) imagem I_4 ; (b) imagem I_5 resultante da aplicação do operador <i>afinamento</i> – esqueletos das estruturas.	67
Figura 28: Detalhe do esqueleto de uma estrutura da íris: <i>pixels redundantes</i> (preto), <i>terminações (end-points)</i> (■) e <i>nós</i> (□).	67
Figura 29: Conceito de <i>caminhos (paths)</i> . (a) <i>caminho-único</i> : $s - p$ e $p - q$; (b) <i>múltiplos caminhos</i> : $s - p$ ou $s - t - p$ e $p - q$ ou $p - r - q$	68
Figura 30: Resultado de um algoritmo morfológico de <i>esqueletonização</i> . (a) imagem de entrada contendo <i>pixels redundantes</i> na estrutura, (b) imagem de saída com lacunas indesejadas (destacadas com círculos) após a <i>esqueletonização</i>	68
Figura 31: Vizinhança de um pixel p – notação: (a) vizinhos diagonais D_i , (b) 4-vizinhos N_i e (c) 8-vizinhos $D_i + N_i$	69
Figura 32: <i>Elementos Estruturantes</i> utilizados para eliminação dos <i>pixels redundantes</i> : (a) $EE-1$, (b) $EE-1r$, (c) $EE-2$ e (d) $EE-2r$. O pixel correspondente a origem de cada EE aparece em destaque.....	69
Figura 33: Sequência de verificação da vizinhança – Passo 1: (a) a origem do $EE-1$ é posicionada sobre o N_4 ; (b) o pixel N_4 recebe $\mathbf{0}$ se os pixels do $EE-1$ coincidem com os pixels subjacentes da imagem.	70
Figura 34: Sequência de verificação da vizinhança – Passo 3: (a) a origem do $EE-1r$ é posicionada sobre N_2 e (b) o pixel N_2 recebe $\mathbf{0}$ se os pixels do $EE-1r$ coincidem com os pixels subjacentes da imagem.	70
Figura 35: Resultado do algoritmo de eliminação de <i>pixels redundantes</i> . Nenhuma lacuna está presente no esqueleto da estrutura resultante – não há quebra de conexão.	71

Figura 36: Reconstrução da imagem: (a) imagem de entrada contendo os pontos correspondentes às coordenadas das <i>terminações</i> (<i>end-points</i>) e dos <i>nós</i> , (b) imagem de saída contendo as pseudo-estruturas geradas a partir de duas dilatações da imagem (a).....	73
Figura 37: Representação adotada: <i>terminações</i> (<i>end-points</i>) (■) e <i>nós</i> (□).....	73
Figura 38: Exemplo de identificação das características: (a) identificação das <i>terminações</i> (cinza), (b) identificação dos <i>nós</i> (preto) e (c) identificação dos <i>nós</i> definitivos através da remoção dos <i>nós</i> <i>redundantes</i>	74
Figura 39: Exemplos de imagens dos bancos: (a) UBIID, (b) CASIA e (c) BIRD.	78
Figura 40: Avaliação estatística intraclasse e interclasses: (a) confronto intraclasse foi realizado entre amostras de íris do mesmo indivíduo, (b) confronto interclasses foi realizado entre amostras de íris de indivíduos diferentes.	79
Figura 41: Diagrama dos passos do procedimento experimental.....	80
Figura 42: Gráfico das distribuições intraclasse e interclasses – curvas de similaridade. * em sistemas comerciais: ajuste de limiar para um nível especificado (p.ex.: 1 em 1 milhão).....	83
Figura 43: Exemplo de íris com pupilas de tamanho diferentes: (a) pupila com tamanho normal, (b) versão normaliza da íris apresentada em (a), (c) pupila dilatada e (d) versão normaliza da íris apresentada em (c). Em destaque as diferenças encontradas nas respectivas regiões devido a variações no tamanho da pupila [Fonte: adaptado de (WEI, 2007)].....	84
Figura 44: Distribuições intraclasse e interclasses: (a) score de confronto – método proposto, (b) distância de Hamming normalizada – método de referência.....	86
Figura 45: Curvas ROC do método proposto (vermelho) e de Daugman (azul). (a) curvas em escala linear, (b) curvas em escala logarítmica e linha da EER (pontilhada). O método proposto apresenta desempenho inferior ao método de referência.	88
Figura 46: Curvas ROC do método de Daugman (azul) e do método proposto (vermelho) para a segunda abordagem utilizando o UBIID. (a) curvas em escala linear, (b) curvas em escala logarítmica e linha da EER (pontilhada). O método proposto apresenta desempenho superior ao do método de referência.	90
Figura 47: Curvas ROC do método de Daugman (azul) e do método proposto (vermelho) para a segunda abordagem utilizando o CASIA. (a) curvas em escala linear, (b) curvas em escala logarítmica e linha da EER (pontilhada). O método proposto e o de referência apresentam desempenho similar.	92
Figura 48: Curvas ROC do método de Daugman (azul) e do método proposto (vermelho) para a segunda abordagem utilizando o BIRD. (a) curvas em escala linear, (b) curvas em escala logarítmica e linha da EER (pontilhada). O método proposto apresenta desempenho superior ao do método de referência.	94
Figura 49: Curvas ROC para diferentes faixas de valores de ΔDR_p - influência da variação do diâmetro da pupila no desempenho de classificação. Para um confronto entre dois vetores de características, quanto menor o valor da ΔDR_p , menor o erro de classificação.	99

Figura 50: Sistema de Captura – aparato utilizado para aquisição das imagens dos voluntários.....	103
Figura 51: Conjunto de aquisição de imagens: as setas indicam em (a) a interface para acoplamento do olho do usuário, (b) o botão para acionamento da iluminação visível e (c) o conjunto lente-câmera.	104
Figura 52: Imagens de uma das sequências adquiridas para construção do BIRD, que ilustram alguns dos problemas ocorridos durante o processo de captura, tais como: oclusão excessiva, posicionamento incorreto do olho, olho fechado e perda de foco.	107
Figura 53: Vizinhança de um pixel p : (a) 4-vizinhos, (b) vizinhos diagonais e (c) 8-vizinhos.	123
Figura 54: Histogramas correspondentes aos quatro tipos básicos de imagem: (a) escura, (b) clara, (c) baixo-contraste e (d) alto-contraste [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)]......	125
Figura 55: Uma função de transformação de nível de cinza [Fonte: (GONZALEZ & WOODS, 2001)]......	126
Figura 56: Exemplo: (a) imagem original, (b) imagem submetida à equalização de histograma e (c, d) seus respectivos histogramas.....	127
Figura 57: Histograma em níveis de cinza de uma imagem composta de objeto claro com um fundo escuro, que pode ser separado por um limiar único [Fonte: (GONZALEZ & WOODS, 2001)]......	128
Figura 58: <i>Dilatação</i> (imagem binária): (a) imagem original e (b) imagem após a dilatação.	130
Figura 59: <i>Dilatação</i> em tons de cinza: (a) função F , (b) elemento estruturante K , (c) deslizamento do EE sobre a função e (d) resultado após a <i>dilatação</i> [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)]......	131
Figura 60: Exemplo do efeito da <i>dilatação</i> em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem após a <i>dilatação</i>	132
Figura 61: <i>Erosão</i> (imagem binária): (a) imagem original e (b) imagem após a <i>erosão</i>	132
Figura 62: Resultado da <i>erosão</i> em tons de cinza de F pelo deslizamento de K [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)]......	133
Figura 63: Exemplo do efeito da <i>erosão</i> em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem após a <i>erosão</i>	134
Figura 64: <i>Abertura</i> (imagem binária): (a) imagem original e (b) imagem após a <i>abertura</i> .134	
Figura 65: <i>Abertura</i> em tons de cinza: (a) função contínua representando uma imagem, (b) EE esférico em diversas posições e (c) resultado após a <i>abertura</i> [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)]......	136
Figura 66: Exemplo do efeito da <i>abertura</i> em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem após a <i>abertura</i>	136
Figura 67: <i>Fechamento</i> (imagem binária): (a) imagem original e (b) imagem após o <i>fechamento</i>	137

Figura 68: <i>Fechamento</i> em tons de cinza: (a) função contínua representando uma imagem, (b) <i>EE</i> esférico em diversas posições e (c) resultado após o <i>fechamento</i> [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)].	138
Figura 69: Exemplo do efeito do <i>fechamento</i> em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem após o <i>fechamento</i> .	138
Figura 70: Exemplo de tipo estendido de <i>EE</i> usado na operação de <i>hit-or-miss</i> .	139
Figura 71: Os <i>EEs</i> usados para encontrar cantos em ângulo reto nas quatro orientações, usando a operação <i>hit-or-miss</i> .	140
Figura 72: Localização dos cantos através da operação <i>hit-or-miss</i> : (a) imagem original e (b) imagem onde os cantos em qualquer orientação foram localizados.	140
Figura 73: <i>EEs</i> utilizados para localizar características binárias através da operação <i>hit-or-miss</i> : (a) ponto isolado, (b) terminações (<i>end-points</i>), (c) e (d) nós ou junções.	141
Figura 74: <i>Esqueletonização</i> : (a) imagem original e (b) imagem obtida após a aplicação do operador <i>afinamento</i> .	142
Figura 75: Componente conectado (abordagem convencional).	143
Figura 76: Circuito de controle baseado no microcontrolador PIC18F4550.	148
Figura 77: Modelo para cálculo da potência incidente no olho.	150
Figura 78: Modelo de malhas da íris. (a) arcos à esquerda, (b) arcos à direita e (c) modelo de malhas [Fonte: (WEI <i>et al.</i> , 2007)].	153
Figura 79: Ilustração do modelo de deformação em um padrão da amostra: (a) campo de vetores do bloco, (b) campo de vetores em nível de pixel [Fonte: (THORNTON <i>et al.</i> , 2007)].	153
Figura 80: Rastreamento durante a contração da pupila. Grafo de progressão da deformação de (a), com a pupila dilatada, para (d) com a contraída [Fonte: (PHANG <i>et al.</i> , 2006)].	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais tecnologias biométricas [Fonte: (IBG, 2009)].....	25
Tabela 2: Tecnologias biométricas – visão geral.	29
Tabela 3: Comparativo – abordagens para o reconhecimento da íris.....	33
Tabela 4: Modelos de movimento [Fonte: (STILLER & KONRAD, 1999)].	55
Tabela 5: Estados de operação típicos da FAR e as FRR correspondentes, valores da EER para ambos os métodos – Abordagem inicial.....	89
Tabela 6: Estados de operação típicos da FAR e as FRR correspondentes, valores da EER e da AUC para ambos os métodos – Segunda abordagem - UBIID.	91
Tabela 7: Comparativo de desempenho do método proposto e de referência em função das taxas de erro.	91
Tabela 8: Estados de operação típicos da FAR e as FRR correspondentes, valores da EER e da AUC para ambos os métodos – Segunda abordagem - CASIA.....	93
Tabela 9: Estados de operação típicos da FAR e as FRR correspondentes, valores da EER e da AUC para ambos os métodos – Segunda abordagem - BIRD.....	95
Tabela 10: Probabilidades de sobreposição das faixas para uma tolerância de $\pm 5\%$	97

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 MOTIVAÇÕES	16
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. SISTEMAS DE RECONHECIMENTO BIOMÉTRICOS	23
2.1 BIOMETRIA E SISTEMAS BIOMÉTRICOS	23
2.2 MERCADO MUNDIAL DE BIOMÉTRICOS	25
2.3 TECNOLOGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO BIOMÉTRICA	28
2.3.1 Impressão Digital	29
2.3.2 Reconhecimento Facial	30
2.3.3 Geometria da Mão	31
2.3.4 Reconhecimento de Íris	31
2.3.4.1 Métodos de Identificação Biométrica da Íris	32
3. ANATOMIA DA ÍRIS E TÉCNICAS PARA O PROCESSAMENTO DE IMAGENS	39
3.1 OLHO HUMANO	39
3.1.1 Anatomia do Olho	39
3.1.2 Anatomia da Íris	41
3.2 PROCESSAMENTO DE IMAGENS	44
3.3 MORFOLOGIA MATEMÁTICA – OPERADORES E CONCEITOS	44
3.3.1 Elemento Estruturante (<i>EE</i>)	46
3.3.2 Operadores e Transformações Morfológicas	46
3.3.3 Resíduos	47
3.3.3.1 Gradiente Morfológico	47
3.3.3.2 Top-hat	49
3.3.4 Reconstrução	50
3.4 TRANSFORMAÇÃO DE MOVIMENTO	52
3.4.1 Representação do Movimento	53
3.4.2 Modelos de Movimento	54
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	56
4. PROCESSAMENTO DA ÍRIS	57
4.1 SISTEMA DE RECONHECIMENTO DE ÍRIS	57
4.2 MÉTODO DE REFERÊNCIA	59
4.3 MÉTODO PROPOSTO	61
4.4 ALGORITMOS BASEADOS EM OPERADORES MORFOLÓGICOS	62
4.4.1 Segmentação	62
4.4.2 Morfologia Aplicada à Extração de Características	64
4.4.2.1 Extração de Características	64
4.4.2.2 Remoção de Pixels Redundantes	67
4.5 ALINHAMENTO	71
4.6 REPRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS	73
4.7 CLASSIFICAÇÃO E CONFRONTO (<i>MATCHING</i>)	75
4.8 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	77
4.8.1 VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DA PUPILA	81
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
5.1 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE SIMILARIDADES	86
5.2 CURVAS ROC	87
5.2.1 Curvas ROC – Abordagem Inicial (V1)	87
5.2.2 Curvas ROC – Segunda Abordagem (V2)	89
5.2.2.1 Curvas ROC – UBIID	89
5.2.2.2 Curvas ROC – CASIA	92
5.2.2.3 Curvas ROC – BIRD	94
5.3 PRÉ-CONFRONTO	95
5.4 VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DA PUPILA X DESEMPENHO	98

5.5 BANCOS DE IMAGENS DE ÍRIS	100
5.5.1 Especificações do BIRD	100
5.5.2 Composição do BIRD	101
5.5.3 Sistema de Captura	102
5.5.4 Procedimento de Captura	104
5.5.5 Discussões	106
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	109
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
6.2 CONCLUSÕES	113
6.3 TRABALHOS FUTUROS	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICE A - Técnicas e Conceitos Básicos de Processamento Digital de Imagens...	123
A.1 VIZINHOS DE UM PIXEL	123
A.2 CONECTIVIDADE.....	123
A.3 HISTOGRAMA	124
A.4 EQUALIZAÇÃO DE HISTOGRAMA	125
A.5 LIMIAZIZAÇÃO (THRESHOLDING).....	128
APÊNDICE B - Operadores e Transformações Morfológicas	130
B.1 DILATAÇÃO (Dilatation) - δ	130
B.2 EROSÃO (Erosion) - ε	132
B.3 ABERTURA (Opening) - γ	134
B.4 FECHAMENTO (Closing) - φ	136
B.5 TRANSFORMAÇÃO <i>HIT-OR-MISS</i> - <i>hmt</i>	138
B.6 AFINAMENTO (<i>Thinning</i>) - <i>thin</i>	141
B.7 COMPONENTE CONECTADO	143
B.7.1 Abordagem Convencional para extração de Componentes Conectados.....	143
B.7.1.1 Conectividade-4.....	143
B.7.1.2 Conectividade-8.....	144
B.7.2 Abordagem baseada em Morfologia para extração de Componentes Conectados	144
APÊNDICE C - Sistema Automatizado para Captura de Imagens do Olho.....	146
C.1 DESCRIÇÃO	146
C.2 FUNCIONAMENTO.....	146
C.3 LÓGICA DE CONTROLE.....	147
C.4 MONITORAMENTO DA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS	147
APÊNDICE D - Iluminação e Procedimento de Captura.....	149
D.1 ILUMINAÇÃO	149
D.2 PROCEDIMENTO DE CAPTURA DAS IMAGENS.....	151
APÊNDICE E - Estudo das Características da Íris para Criação de um Modelo de Deformação	152
E.1 MODELOS DE DEFORMAÇÃO DA ÍRIS	152
E.2 ESTIMAÇÃO DE MOVIMENTO	155
E.3 SÍNTESE DE ÍRIS.....	156

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

No decorrer das últimas décadas, os temas relacionados a segurança vem ocupando um lugar de destaque em diversos segmentos da sociedade. Investimentos em novas tecnologias vem sendo feitos, tanto pelo setor público como pelo privado, para adequar os requisitos dos sistemas de segurança às diferentes exigências necessárias para minimizar os problemas e os prejuízos causados por fraudes. Neste contexto, a crescente demanda por segurança leva à busca por tecnologias mais confiáveis, onde a identificação biométrica de indivíduos aparece como uma das mais promissoras para uso em sistemas automatizados de reconhecimento, fomentando assim a pesquisa e o desenvolvimento na área de Biometria.

Sistemas de identificação mais seguros e precisos estão sendo desenvolvidos, baseados em características biométricas, ou seja, do próprio indivíduo, dentre elas citem-se as tecnologias que estudam a impressão digital, a geometria da mão, a voz, a face e a íris dos indivíduos. As impressões digitais dos indivíduos são únicas, assim como a voz, a face, e até mesmo a íris dos olhos. Sendo assim, qualquer uma destas características únicas do corpo humano pode funcionar como chave de acesso para sistemas de segurança, e em se tratando de sistemas biométricos, as mesmas podem ser utilizadas desde que não possam ser copiadas, transferidas ou assimiladas, por outros indivíduos. A partir do momento que uma destas características únicas é capturada e processada obtém-se um código individual de segurança. Tais informações tem aplicabilidade em qualquer área onde há a necessidade de verificar a identidade de um indivíduo.

Há décadas muitas nações vêm usando a informação da impressão digital em cartões de identificação e na construção de bancos de dados para possibilitar o uso de informações biométricas para prevenir fraudes e identificar indivíduos. Apesar dos métodos baseados em impressão digital serem amplamente utilizados e responderem por mais de 60% do mercado mundial de biometria (IBG, 2010), estão sujeitos a limitações no desempenho em função da imperícia do usuário, degradações de características da impressão digital em função da idade, cortes e/ou ferimentos, sujeira nos dedos ou ainda condições ambientais que podem prejudicar o desempenho de alguns dispositivos de leitura de impressão digital (JAIN, 2004; MALTONI, 2009). Além disso, leitores de impressão digital não são idealmente apropriados para manipular a grande diversidade de populações que necessitam ser cadastradas. Relatos sobre

grupos de trabalhadores manuais, idosos e algumas populações asiáticas apresentam problemas em obter impressões digitais úteis para sistemas de reconhecimento (PRABHAKAR, 2001; IT GOVERNANCE INSTITUTE, 2004). Outro fator importante está relacionado ao tempo médio necessário para que o sistema execute a identificação de um indivíduo. Um estudo realizado pelo UK Passport Service demonstrou que a identificação de um indivíduo necessita em média de 1 minuto e 13 segundos para ser realizada em uma base de dados com 1 milhão de impressões digitais (IPS, 2009).

No caso da tecnologia de reconhecimento facial para finalidade de identificação, óculos, barba e bigode, cirurgia plástica, idade, entre outros fatores, podem afetar o processo de verificação. Por outro lado, o tamanho e a geometria da mão mudam muito ao longo da vida. Clima, temperatura e condições médicas, tais como gravidez, ferimentos ou certos medicamentos, podem afetar o tamanho da mão. Como as impressões digitais, a tecnologia de identificação biométrica baseada na análise da geometria da mão geralmente requer contato físico com o dispositivo de leitura.

Apontado como um método biométrico com alto potencial para ser usado para substituir as técnicas baseadas em impressão digital, o reconhecimento de íris apresenta algumas razões importantes para isto: (1) as estruturas que compõem a íris são formadas por características que produzem um arranjo rico em detalhes, (2) tais características são únicas para cada indivíduo, (3) imutáveis com a idade, e (4) trata-se de método não invasivo para avaliação biométrica (WILDES, 1997; SCHREINER, 1999; MONRO, RAKSHIT & ZHANG, 2007). Quando comparada às impressões digitais, além da textura da íris ser mais difícil de ser copiada, a prevenção de fraudes em sistemas de identificação baseados na íris podem utilizar técnicas que fazem o monitoramento dos movimentos da pupila e da região em volta do olho, para assegurar que o órgão está vivo e não foi extraído cirurgicamente do indivíduo (JOHNSON, 2012; GALBALLY, 2012).

A íris humana é um tecido pigmentado, localizado entre a córnea e o cristalino, formado por características minúsculas que produzem uma estrutura com muitos detalhes. Devido à grande quantidade de características espaciais, que se manifestam em diferentes escalas (WILDES, 1997), a íris humana é uma candidata potencial para uma abordagem que utiliza a Morfologia Matemática para o processamento de imagens.

No campo da Biologia, morfologia se refere ao estudo das estruturas de plantas e animais. Similarmente, a Morfologia Matemática se relaciona a estrutura geométrica de entidades em uma imagem (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) e se refere a um ramo do processamento e análise não-linear de imagens. Assim como no caso da íris, a princípio, a

abordagem morfológica pode ser utilizada para análise de imagens em aplicações onde há interesse em um conjunto específico de características, como por exemplo, a forma e o tamanho de estruturas.

Dentre as áreas que apresentam potencial para uso da abordagem morfológica, destacam-se a biomédica (diagnóstico, monitoramento, instrumentação virtual e processamento de imagens médicas e biológicas), a automação e controle (controle de qualidade, inspeção, classificação e robótica), a visão computacional, entre outras (VINCENT, 1997). A seguir encontram-se relacionadas algumas aplicações baseadas na Morfologia Matemática, relacionadas às áreas citadas: eliminação de ruído e realce de bordas em imagens de raios-X, segmentação e determinação do contorno de tumores de mama em imagens por ultrassom, segmentação do músculo peitoral em mamografia, classificação do contorno de nódulos em mamografias, detecção automática de células do sangue em imagens adquiridas por microscópio, análise de lâminas de patologia, detecção de máculas em micrografias de cerâmicas nucleares, sistema automático para inspeção visual de defeitos em produtos cerâmicos, controle de qualidade de padrões gráficos em estamparias coloridas, análise de imagens de sensoriamento remoto e segmentação de imagens de cartas náuticas (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003; SOILLE, 2003).

Para fins de reconhecimento biométrico, um fato muitas vezes ignorado quando se trata do processamento de imagens de íris está relacionado às mudanças no seu tamanho devido aos movimentos involuntários de dilatação e contração, que controlam a quantidade de luz que incide na retina através da pupila. Um sistema de reconhecimento de íris deveria ser desenvolvido para ser suficientemente robusto para lidar com mudanças na dilatação da pupila, mas muitas vezes tal fato é simplesmente desconsiderado (HOLLINGSWORTH, 2009a). Isto ocorre com alguns métodos de reconhecimento, quando a região da íris é normalizada para um sistema de coordenadas polares adimensional para posterior geração do código de íris, ignorando qualquer informação relativa à dilatação da pupila.

A tarefa de avaliar o desempenho dos algoritmos usados em sistemas de identificação biométrica pode ser difícil, devido à influência exercida por diversos fatores, entre eles a própria metodologia de avaliação e a existência de algumas fontes de ruído associadas ao ambiente e aos dispositivos. Em relação aos bancos de imagens de íris disponíveis, uma das maiores dificuldades consiste na falta de informações sobre detalhes da sua construção, que acabam muitas vezes inviabilizando a realização de determinados experimentos e dificultando uma análise mais criteriosa dos resultados, como por exemplo, um estudo relacionado à análise de desempenho de sistemas de reconhecimento de íris em

função de variações no diâmetro da pupila. Uma solução para tal problema é a construção de um banco de íris próprio, onde todas as informações pertinentes aos processos de captura e armazenamento das imagens serão conhecidas. Com isto, além de viabilizar a realização de inúmeros experimentos e suas respectivas análises, será possível também a realização de diversos estudos e trabalhos relacionados à anatomia e fisiologia da íris, estimação de movimento, modelagem, etc., bem como a análise e avaliação de robustez e desempenho de modelos e algoritmos.

Como mencionado anteriormente, a íris está sujeita a mudanças de tamanho e tais mudanças causam deformações nas estruturas que a compõem. Para avaliar os efeitos causados por estas deformações nas estruturas, é necessário um conjunto de imagens de íris capturadas em sequência que possibilite a sua análise para criação de um modelo de deformação onde o tamanho do diâmetro da pupila varie gradativamente em função da variação da intensidade luminosa incidente no olho. No entanto, os bancos de imagens disponíveis não permitem este tipo de análise, pois apesar de possuírem imagens de um mesmo indivíduo com diferentes tamanhos de pupila, estas foram adquiridas em diferentes condições de iluminação, posicionamento, foco e momentos de captura, que podem acarretar em distorções que comprometem a análise dos resultados. A análise da deformação das estruturas utilizando imagens de íris que atendam aos requisitos do estudo permitirá a criação de um modelo para corrigi-las (ver Apêndice E), que compense tanto o movimento quanto as distorções na forma causadas pelas variações no tamanho da íris. Este conjunto de imagens também poderá ser utilizado na avaliação da influência da variação do diâmetro da pupila no desempenho dos algoritmos de reconhecimento de íris.

Com o intuito de melhorar o desempenho dos sistemas de reconhecimento biométrico da íris, ou seja, diminuir as taxas de erros (FAR^1 e FRR^2) e aumentar as taxas de acerto, diversos métodos tem sido propostos na literatura (DAUGMAN, 1992; WILDES, 1997; LIM *et al.*, 2001; LI MA *et al.*, 2002; TISSE *et al.*, 2002; MONRO & ZHANG, 2005). As abordagens neles apresentadas se diferenciam principalmente em relação aos algoritmos para análise de imagens, ou seja, na segmentação da íris, na extração de características, na forma de representação e codificação dessas características e no processo de classificação e confronto.

Por se tratar de um tema que é objeto de estudo em renomados centros de pesquisas, instituições acadêmicas e instituições governamentais de diferentes países, tais como *Center*

¹ FAR (*False Acceptance Rate*) - Taxa de Falsa Aceitação: indica a probabilidade de aceitar um impostor.

² FRR (*False Rejection Rate*) - Taxa de Falsa Rejeição: indica a probabilidade de rejeitar um indivíduo autêntico.

for Identification Technology Research (CITeR) - EUA, Center for Biometrics and Security Research - China, The Computer Laboratory - University of Cambridge - Inglaterra, University of Bath / Smart Sensors - Inglaterra, National Institute of Standards and Technology (NIST) - EUA, a identificação biométrica através da íris possibilita que novas abordagens e métodos sejam desenvolvidos para propor soluções inovadoras para a identificação de indivíduos, motivando assim a realização deste trabalho.

O Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST), um órgão do governo norte-americano, promove a alguns anos testes em larga escala para avaliar e comparar algoritmos de identificação por biometria da íris. Os testes foram desenvolvidos para ter relevância operacional e além da sua importância em termos da avaliação comparativa de algoritmos, fornece subsídios para os desenvolvedores de algoritmos e para aqueles preocupados com a implementação operacional de identificação de íris. Em seu relatório de Desempenho de Algoritmos de Identificação de Íris – IREX III, que foi realizado para medir a acurácia e a velocidade dos algoritmos de identificação de íris submetidos ao teste, o NIST apresenta entre as principais conclusões uma relacionada ao desenvolvimento de algoritmos. Ela destaca que o sucesso de futuras implementações dependerá da melhoria e da seleção de algoritmos de reconhecimento de íris. Comenta ainda que as grandes variações de acurácia, observadas na realização do teste de desempenho dos algoritmos, demonstra a necessidade de dar continuidade à pesquisa e ao desenvolvimento de algoritmos de identificação de íris (IREX III, 2012).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver algoritmos baseados em operadores morfológicos para identificação biométrica através da análise da íris e avaliar a abordagem baseada em Morfologia Matemática para um sistema de reconhecimento de indivíduos pela íris.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1- Desenvolver algoritmos de processamento de imagens para localizar e segmentar a região de interesse na imagem do olho, identificar e realçar padrões existentes na íris e extrair características desses padrões;

- 2- Estabelecer uma representação que caracterize os padrões extraídos da íris, para gerar vetores de características que permitam a comparação de imagens de íris para fins de reconhecimento;
- 3- Desenvolver um método para comparar vetores de características com base em seus valores de similaridade;
- 4- Estabelecer métricas de desempenho em relação às taxas de erro, utilizando métodos de validação estatística para avaliar e validar a abordagem proposta;
- 5- Avaliar e comparar o desempenho do método proposto com um método de referência;
- 6- Avaliar o desempenho e robustez de algoritmos utilizando imagens de diferentes bancos de dados;
- 7- Construir um banco de imagens de íris para suprir as deficiências dos bancos existentes, bem como as necessidades e requisitos dos estudos propostos;
- 8- Avaliar a influência das variações do diâmetro da pupila no desempenho de classificação do método proposto;
- 9- Estudar métricas que possibilitem estabelecer relações entre o tamanho da pupila e o da íris, para gerar informações referentes ao grau de dilatação, grau de confiança, ou medidas da pupila (p.ex.: dilatação absoluta ou diferença da dilatação entre duas íris).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. O capítulo 2 apresenta alguns conceitos básicos, definições e terminologia relacionadas à Biometria. Dados de caráter informativo, sobre o mercado mundial de biométricos, o panorama nacional e um comparativo entre as tecnologias também são mencionados. Uma breve descrição das principais metodologias, baseadas em processamento de imagem, utilizadas para identificação de indivíduos é apresentada, bem como uma descrição mais detalhada do reconhecimento de íris e de alguns dos principais métodos encontrados na literatura.

O capítulo 3 traz os fundamentos da teoria utilizada neste trabalho, apresentando alguns conceitos relacionados ao processamento de imagens e à Morfologia Matemática, operadores morfológicos, transformação de movimento, assim como detalhes da anatomia do olho e da íris.

O quarto capítulo trata do processamento da íris, apresentando um sistema de reconhecimento de íris típico e o método utilizado como referência para efeito de comparação de resultados, assim como o método proposto. As descrições dos passos envolvidos nas etapas de pré-processamento, processamento morfológico, alinhamento, remoção de pixels redundantes, representação, classificação e confronto, assim como os procedimentos experimentais e algumas considerações sobre os bancos de imagens de íris utilizados e sobre os efeitos causados pelas variações do diâmetro da pupila, são apresentadas no referido capítulo.

Os resultados obtidos durante a realização dos experimentos utilizando a base de dados de teste, bem como suas respectivas análises e discussões, baseadas nas métricas utilizadas para avaliação estatísticas (curvas de distribuição, curvas ROC e figuras de mérito), são apresentados no capítulo 5. Este capítulo também apresenta a análise da introdução de uma etapa de pré-confronto e os resultados da avaliação da influência de variações do diâmetro da pupila no desempenho de classificação do método proposto, bem como considerações sobre o banco de imagens BIRD.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais sobre métodos e resultados dessa pesquisa, assim como as conclusões e temas que serão objeto de trabalhos futuros.

2. SISTEMAS DE RECONHECIMENTO BIOMÉTRICOS

Este capítulo apresenta informações e conceitos básicos relacionados à biometria e aos sistemas de reconhecimento biométricos, bem como uma descrição das principais tecnologias baseadas em processamento de imagem utilizadas para identificação de indivíduos, com ênfase no reconhecimento de íris. Um comparativo entre as tecnologias e dados sobre o mercado mundial de biométricos também são apresentados.

2.1 BIOMETRIA E SISTEMAS BIOMÉTRICOS

A Biometria pode ser definida como o ramo da ciência que estuda a mensuração dos seres vivos, ou como parte da estatística que investiga atributos biológicos quantitativos pertinentes a uma população de seres vivos. Neste contexto, dados biométricos podem ser definidos como características fisiológicas ou comportamentais mensuráveis que podem ser utilizados para verificar a identidade de um indivíduo (ASHBOUM, 2001). Dentre as técnicas de avaliação biométrica, as mais comuns utilizam impressão digital, geometria de mão, reconhecimento facial, reconhecimento de íris e padrão de voz. Por tratar-se de partes ou características únicas do corpo humano, elas podem ser utilizadas para proporcionar o acesso através da verificação de suas características por sistemas de segurança. Tais características tem aplicabilidade em qualquer área onde há a necessidade de verificar a identidade de um indivíduo.

Um sistema biométrico é essencialmente um sistema de reconhecimento de padrões, que faz uma identificação pessoal, determinando a autenticidade de uma característica biológica ou comportamental específica pertencente ao usuário. Por definição, é um sistema automatizado capaz de capturar uma amostra biométrica de um usuário, extrair e processar os dados biométricos provenientes da amostra, armazenar a informação extraída em um banco de dados, comparar os dados biométricos com os dados contidos em uma ou mais referências, determinar o seu grau de similaridade e indicar se uma identificação ou verificação foi concluída com sucesso (BIOMETRICS Glossary, 2010).

Em se tratando de sistemas biométricos, estes dois termos - identificação e verificação - geralmente são usados para determinar o tipo de interação entre tecnologia e usuário. O mais comum é a verificação, onde o usuário declara uma identidade antes ou enquanto está sendo submetido à tomada de amostra biométrica. O dispositivo faz então um confronto 1:1 (amostra coletada versus informação do usuário citado na base de dados) baseado na informação de entrada fornecida pelo usuário. Na identificação o confronto é 1:N, onde a amostra tirada do usuário é submetida ao dispositivo que realiza uma busca em seu banco de dados com informação de N usuários para encontrar uma identidade. A verificação envolve confirmar ou negar a identidade declarada de um indivíduo, enquanto a identificação tem que estabelecer a identidade de um indivíduo. As companhias em geral optam pelo termo reconhecimento ao invés de identificação. No entanto, funcionalmente os dois termos são sinônimos.

Biométrico é um termo genérico utilizado alternativamente para descrever uma característica ou um processo. Como característica, é definida como um atributo biológico (anatômica e fisiológica) ou comportamental mensurável que pode ser utilizado para o reconhecimento automatizado. Como processo, se refere a método automatizado para reconhecer um indivíduo baseado em características biológicas ou comportamentais mensuráveis (BIOMETRICS Glossary, 2010).

Os precursores do uso de biometria voltada para sistemas de segurança foram os militares, instituições penais e agências governamentais. Estes sistemas biométricos começaram a ser empregados em aplicações de alta segurança, onde o acesso é rigorosamente controlado, como por exemplo, em instalações militares e nucleares e em prisões de segurança máxima. Devido à falta de informação e aos altos custos, no início boa parte do setor de negócios ignorou tal tecnologia. Com o passar dos anos, o panorama começou a ser alterado, devido às novas necessidades com relação à segurança. Como um biométrico não pode ser facilmente transferido entre indivíduos, ele pode representar um identificador único. Se os procedimentos de verificação forem automatizados de uma maneira amigável para o usuário, os biométricos terão a possibilidade de serem integrados a uma considerável variedade de aplicações.

2.2 MERCADO MUNDIAL DE BIOMÉTRICOS

Em outubro de 2008, o IBG (*International Biometric Group*) divulgou o Relatório do Mercado e Indústria de Biométricos 2009-2014, apresentando uma análise abrangente e extensa da indústria de tecnologias biométricas, aplicações e mercados globais (IBG, 2009). O relatório fornece dados críticos do mercado, além de uma orientação do mundo real para desenvolvedores de tecnologia biométrica, fomentadores, investidores e pesquisadores. Diferentemente do relatório de outras indústrias, o relatório elaborado pelo IBG é examinado e assinado por peritos em tecnologia biométrica com anos de experiência desenvolvendo e testando os principais sistemas biométricos.

Em seu último relatório o IBG apresenta as principais tecnologias biométricas, aplicações e setores do mercado que adotam biométricos, relacionados na Tabela 1. Cada segmento de mercado é caracterizado por uma análise detalhada dos condutores de crescimento e inibidores, os principais vendedores e tecnologias, e tendências até 2014.

Tabela 1: Principais tecnologias biométricas [Fonte: (IBG, 2009)].

Tecnologias	Aplicações	Setores do Mercado
AFIS / Escaneamento-de-Dedo	Controle de Acesso / Frequência	Judiciário / Segurança Pública
Impressão Digital	Identidade Civil	Militar
Reconhecimento Facial	Identidade de Consumidor	Governo
Geometria da Mão	Identidade Criminal	Serviços Financeiros
Middleware / Gerenciamento de Identidade	Dispositivo / Sistema de Acesso	Diversão e hospitalidade
Reconhecimento de Íris	Vigilância / Fiscalização	Saúde
Reconhecimento de Voz		Telecomunicações
Reconhecimento de Veias		Indústria
		Varejo
		Viagem e Transporte

O relatório mostra ainda a projeção de crescimento do faturamento da indústria de biometria global de US\$ 3,4 bilhões em 2009 para US\$ 9 bilhões até 2014, Figura 1. A correspondente fatia que cada tecnologia detém do mercado mundial de biométricos é apresentada na Figura 2. Tecnologias baseadas em impressão digital, incluindo ambos escaneamento de dedo e AFIS (*Automated Fingerprint Identification System*), correspondem a 66% do mercado mundial de biométricos, sendo de longe a mais usada tecnologia do segmento.

Faturamento Anual da Indústria de Biometria, 2009-2014 (US \$)

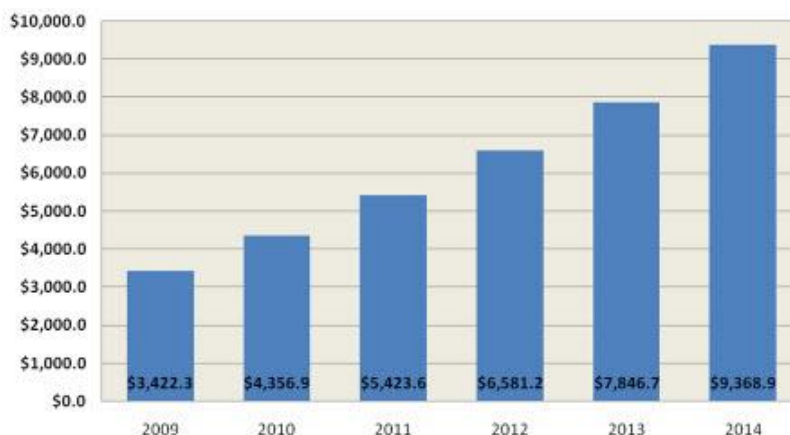


Figura 1: Projeção de rendimentos da indústria de biometria [Fonte: adaptado de (IBG, 2009)].

Faturamento por Tecnologia Biométrica, 2009

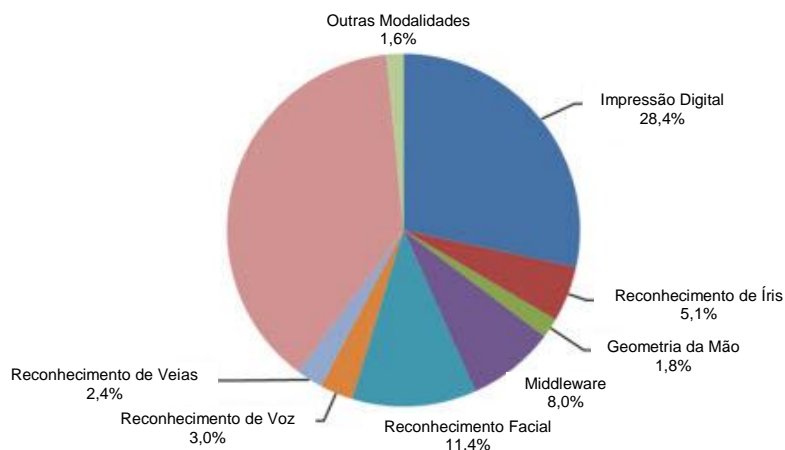


Figura 2: Divisão do mercado mundial de biométricos por tecnologias de captura [Fonte: adaptado de (IBG, 2009)].

A procura por sistemas de segurança que usam partes do corpo ou características do indivíduo como “chave de acesso” vem crescendo mundialmente. Nos últimos anos, os acontecimentos internacionais envolvendo ataques terroristas, contribuíram para que o crescimento do setor fosse ainda maior. Como não poderia ser diferente, o Brasil segue esta mesma tendência, e a biometria é uma realidade no contexto nacional.

As perspectivas do mercado de identificação biométrica no país vêm aumentando, alavancadas também pela queda no custo dos sistemas. Um sensor de impressão digital que custava em média US\$ 1.200 há uma década, pode ser encontrado hoje no mercado por menos de US\$ 30.

No Brasil, mais de 80% dos sistemas de identificação biométrica utilizam tecnologia de identificação através da impressão digital. O Ministério da Fazenda, por exemplo, tem um estudo que propõe o uso da identificação por impressão digital para o cadastramento de aposentados e pensionistas, visando simplificar as operações, bem como evitar a ocorrência de fraudes nos pagamentos dos benefícios (SERPRO, 2009). O novo passaporte brasileiro, personalizado digitalmente, também faz uso de um sistema biométrico para identificação dos cidadãos através da impressão digital. Um equipamento faz o registro da impressão digital que será incorporado ao documento, juntamente com a fotografia do cidadão. Segundo o SERPRO (Serviço Federal de Processamento de Dados), uma empresa pública de prestação de serviços em tecnologia da informação vinculada ao Ministério da Fazenda, o padrão adotado para o tratamento de dados biométricos será o NIST (*National Institute of Standards and Technology*) (SERPRO, 2009). Nas eleições de 2010 em 60 cidades brasileiras foi utilizado em caráter experimental o novo sistema de votação, onde a autenticação da identidade do eleitor foi feita através de um leitor biométrico de impressão digital (TRE, 2010). Segundo o TSE (Tribunal Superior Eleitoral), nas eleições de 2012 a expectativa é que cerca de 10 milhões de eleitores já estejam habilitados a votar após serem identificados pelas impressões digitais (TSE, 2012).

O reconhecimento da face vem sendo usado, por exemplo, na identificação de criminosos. Câmeras instaladas em locais públicos capturam imagens que são cruzadas com as imagens armazenadas em um banco de dados. São comparadas características faciais como: distância entre os ossos temporais e laterais, arco dos olhos, testa, nariz, boca e os ângulos do rosto. Em 2011 a Polícia Militar do Estado de São Paulo divulgou que em breve estaria utilizando um sistema de biometria facial, baseado em uma câmera especial instalada em um óculos, para capturar imagens e reconhecer rostos de pessoas, conectando-se em tempo real com um banco de dados da polícia para fazer comparações. Os óculos serão utilizados em shows, encontros religiosos, festas abertas e outros grandes eventos. O sistema permite "filmar" o público presente e detectar se, no meio da multidão, estão criminosos, pessoas desaparecidas, procuradas ou torcedores envolvidos em brigas (ESTADÃO, 2011).

No país, sistemas de reconhecimento de íris vem sendo usados por empresas, como a Telefônica (operadora de telefonia fixa e móvel), instituições financeiras, condomínios, etc. Os preços dos sistemas de reconhecimento de íris variam de acordo com o tipo de aplicação, podendo chegar a dezenas de milhares de dólares para aplicações mais sofisticadas, que envolvem alta-segurança. Existem métodos que comprovadamente apresentam maior confiabilidade que o reconhecimento pela íris, como por exemplo, a identificação por DNA.

No entanto, tais métodos são tipicamente mais onerosos, demorados e não se aplicam a sistemas de identificação em tempo real.

2.3 TECNOLOGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO BIOMÉTRICA

Entre as aplicações biométricas mais comuns hoje, em nível mundial, estão: o controle de acesso a prisões, os documentos de identificação pessoal, os sistemas de pagamento de benefícios, os controles de fronteiras e aeroportos, os sistemas de votação, os sistemas de acesso a estações de trabalho e redes de computadores, além de numerosas aplicações em minas de ouro e diamante, depósitos de valores e cofres de bancos, como também as aplicações de controle de acesso físico mais comum em empresas e indústrias (BIOMETRICS, 2010).

A seguir, serão apresentadas informações com objetivo de dar uma visão geral das tecnologias biométricas, organizadas na Tabela 2. Cabe ressaltar que alguns fatores apresentados, como a facilidade de uso e a percepção do público, estão sujeitos a mudanças frequentes. Outro fator importante, que afeta o desempenho e o perfil das tecnologias biométricas, está relacionado à natureza de cada aplicação. Os fatores abaixo relacionados foram graduados como baixo, médio, alto ou muito alto. São eles:

- **Nível de exatidão:** relacionado à exatidão da biometria;
- **Facilidade de uso:** necessidade de instruções especiais / grau de dificuldade para o uso da biometria;
- **Resistência ao ataque:** prevenção de acessos fraudulentos / grau de vulnerabilidade da biometria;
- **Aceitabilidade do público:** grau de aceitação/conforto do público com a biometria;
- **Estabilidade em longo prazo:** mudança das características físicas ou comportamentais com o tempo.

Outros dois fatores foram acrescentados à tabela e uma resposta específica é dada para cada um, sendo eles:

- **Padrões:** relacionado à existência de padrões ou se eles estão sendo desenvolvidos;

- **Interferência:** fatores que podem interferir no processo de captura.

Na sequência, algumas das tecnologias mais populares atualmente utilizadas em sistemas biométricos baseados no processamento de imagens, serão apresentadas.

Tabela 2: Tecnologias biométricas – visão geral.

	Nível de exatidão	Facilid. de uso	Resistênc. ao ataque	Aceitab. do público	Estabilidade	Padrões	Interferência
Iris	Muito alto	Média	Muito alta	Média	Alta	---	Óculos
Retina	Muito alto	Baixa	Muito alta	Média	Alta	---	
Face 2D/3D	Alto	Média	Média	Alta	Média	---	Iluminação (2D); orientação, escala, pêlos envelhecimento; óculos;
Impressão Digital	Alto	Alta	Alta	Média	Alta	ANSI/NIST & FBI Image Compression Standards	Umidade, sujeira, digitais danificadas; idade; sexo e raça
Geometria da Mão	Alto	Alta	Alta	Alta	Média	---	Doenças (artrite e reumatismo)
Palma	Alto	Alta	Alta	Média	Alta	ANSI/NIST & FBI Image Compression Standards	Umidade, sujeira, digitais danificadas; idade; sexo e raça
Voz	Alto	Alta	Média	Alta	Média	Speaker Verification API (SVAPI)	Barulhos; resfriados e outros fatores que modificam a voz

2.3.1 Impressão Digital

Dentre as várias metodologias que usam biométricos, a mais difundida é a verificação da impressão digital. Para alguns, os sistemas baseados em impressões digitais são razoavelmente fáceis de usar e contam com anos de experiência adquirida com o uso dos sistemas automatizados de impressão digital, utilizados por órgãos e agências governamentais. Atualmente, há disponível uma grande variedade de dispositivos que operam com impressões digitais. Tais dispositivos geralmente tem uma boa exatidão, ou seja, apresentam poucos casos de falsa aceitação, mas podem estar sujeitos a erros de uso devido à imperícia de alguns usuários, gerando assim muitos casos de falsa rejeição (IBG, 2010).

Sistemas baseados em impressões digitais podem ser utilizados tanto em aplicações de autenticação em tempo real, como em investigações forenses. As técnicas utilizadas na autenticação são conhecidas como *FingerScan* (IBG, 2010). Nelas, a imagem original é submetida a um processo que faz o reconhecimento de padrões e gera um modelo a partir dos

detalhes obtidos, ao invés de comparar imagens completas. Nestas técnicas não se pode recuperar a imagem original da impressão digital a partir do banco de dados, mas pode-se fazer uma pesquisa rápida em bases de dados relativamente grandes (da ordem de 100.000 amostras) em alguns segundos. No caso de investigações, são utilizados os software conhecidos por AFIS (*Automated Fingerprint Identification Systems*) (IBG, 2010), que utilizam grandes bases de dados e imagens completas de impressões digitais, pois a identificação é realizada posteriormente com base em imagens adquiridas nos locais onde ocorreram os delitos, como por exemplo, na cena de um crime.

2.3.2 Reconhecimento Facial

O reconhecimento facial é uma técnica que atraiu considerável interesse por ser considerada um método de identificação natural, não-invasivo e com aceitação elevada, cujas capacidades tem sido frequentemente mal entendidas. Estudos realizados apontam que os algoritmos utilizados para o reconhecimento facial bidimensional (2D) não são adequados para serem aplicados em larga escala, ou seja, em aplicações biométricas de alta demanda (IBG, 2010). Comparar duas imagens estáticas é em geral muito mais simples do que descobrir e verificar a identidade de um indivíduo dentro de um grupo de pessoas.

Para realizar a verificação ou identificação, o reconhecimento facial utiliza características distintas da face, como a distância entre os olhos, a localização do nariz, o contorno da cavidade orbital, os ossos laterais da face, a linha da mandíbula e o formato do queixo (FACE-REC, 2010). Assim como para outras tecnologias biométricas que utilizam a análise de imagens, o desempenho do reconhecimento facial está intimamente ligado à qualidade da imagem da face, ou seja, imagens com baixa qualidade estão muito mais susceptíveis a erros nos processos de registro e confronto do que imagens com alta qualidade. Geralmente o sistema de reconhecimento facial é formado por três etapas fundamentais: rastreamento da face, extração e seleção de características faciais, e reconhecimento da face (ZHAO *et al.*, 2003; FACE-REC, 2010).

Alguns sistemas existentes comparam uma imagem de uma câmera de segurança padrão com as imagens armazenadas de usuários autorizados em menos de um segundo. Primeiro os usuários submetem-se a uma breve captura de vídeo, durante a qual uma sequência de imagens da face é armazenada em um banco de dados. Cada imagem a ser procurada no banco de dados existente é armazenada sob um "registro". O processo de "registro" consiste em: padronizar o brilho e o contraste da imagem, localizar a cabeça e

olhos, girar e ajustar a imagem para uma distância fixa em relação à câmera, e gerar uma representação vetorial da imagem que será usada no processo de comparação. Sistemas que utilizam duas câmeras e proporcionam uma visão "estéreo" ou tridimensional (3D) da face, estão sendo usados para melhorar o desempenho e a robustez do reconhecimento, além de sistemas que operam com o mapeamento térmico da face.

A princípio, o reconhecimento facial 2D dominou as pesquisas nessa área da biometria. No entanto, devido às limitações encontradas, como por exemplo, as relacionadas a iluminação, posição e expressões da face, outras pesquisas começaram a ser desenvolvidas com o intuito de solucionar alguns destes problemas. Neste contexto, o reconhecimento facial 3D mostrou seu potencial, promovendo o crescimento das pesquisas nesta área. (ZHAO *et al.*, 2003). No entanto, as expressões faciais também afetam o desempenho dos métodos que utilizam reconhecimento 3D e por este motivo estudos vem sendo realizados na tentativa de solucionar o referido problema (SEGUNDO *et al.*, 2007 e 2010; QUEIROLO *et al.*, 2010).

2.3.3 Geometria da Mão

A geometria da mão é outra tecnologia utilizada para o reconhecimento biométrico. Como o próprio nome sugere, ela se baseia na medição de características físicas da mão e dedos do usuário. O método de captura é bastante direto, sendo que para o processo de registro o usuário posiciona sua palma da mão na superfície do leitor e alinha seus dedos com as marcas desenhadas para indicar a localização correta deles. Um sensor CCD é utilizado para obter o comprimento, largura e área da superfície da mão e dos dedos. Esta tecnologia oferece um bom equilíbrio entre as características de desempenho e a facilidade de uso. No entanto, esta tecnologia é menos robusta que outras, como por exemplo, face, impressão digital e íris, na identificação 1:N, devido às semelhanças existentes entre as características das mãos de diferentes usuários. Porém ela apresenta uma vantagem quando se trata das taxas de falha para registro (FTE – Failure to Enroll), uma vez que praticamente todos os usuários teriam habilidade de usar tal tecnologia para cadastrar seus dados biométricos (IBG, 2010). Leitores de geometria da mão são de fácil integração a outros sistemas e processos.

2.3.4 Reconhecimento de Íris

Alguns sistemas usam a íris para criar uma "assinatura ocular". As imagens de duas íris não são idênticas, nem mesmo para gêmeos idênticos. Assim, o olho, com sua

“assinatura” única, torna-se um tipo de código de segurança natural. Dentre as vantagens apontadas, destacam-se: o fato de não requerer nenhum contato efetivo entre o usuário e o dispositivo de leitura, o processo de identificação ter o potencial de ser feito em tempo real e possibilitar uma alta acurácia para identificar pessoas. A íris humana tem aproximadamente dez vezes mais características diferenciadoras, se comparadas a uma impressão digital (SCHREINER, 1999).

A íris está externamente visível e completamente formada a partir dos dois anos de idade, permanecendo praticamente inalterada pelo restante da vida, exceto em casos de alguns tipos de doenças oculares ou acidentes. Além disso, a íris não pode ser cirurgicamente alterada sem o risco de perda de visão. Os sistemas de captura estão bastante avançados para rejeitar uma fotografia ou até mesmo um olho de vidro. Os sistemas de reconhecimento capturam uma imagem da íris de uma pessoa, extraem suas características e armazenam tais informações em um banco de dados. Então, quando uma pessoa quer acesso a um dispositivo ou local, ela deve olhar para uma câmera e esperar, para o sistema determinar qual o padrão de íris corresponde à imagem no arquivo.

A tecnologia de reconhecimento de íris foi projetada para ser menos intrusiva que a varredura da retina, que frequentemente requer o uso de iluminação infravermelha ou luz de alta intensidade para conseguir uma leitura adequada. Estudos científicos mostram que a retina pode mudar com a idade, enquanto que uma íris permanece inalterada (WILDES *et al*, 1997).

Segundo a IrisScan Inc., atualmente conhecida como L-1 Identity Solutions, uma das principais empresas que utiliza tecnologia baseada na íris e nos algoritmos de um dos precursores nessa área, Daugman (DAUGMAN, 2008), a probabilidade de duas íris produzir exatamente o mesmo código é de 1 em 10^{78} . Um arquivo armazenado (código da íris - IrisCode) tem apenas 512 bytes para representar uma imagem com resolução de 640x480, permitindo o armazenamento de grande volume de informação em um disco rígido de um computador. O número de variáveis independentes (graus de liberdade) extraídas da íris é de 266. A velocidade média de identificação, para um banco de dados de 100.000 códigos de íris gravados, é de um a dois segundos (IRIS-SCAN, 2001).

2.3.4.1 Métodos de Identificação Biométrica da Íris

O reconhecimento de íris extrai as características da íris humana para fornecer uma tecnologia de identificação biométrica. Uma grande parte dos sistemas que operam com a

tecnologia de reconhecimento de íris está baseada nas pesquisas e patentes detidas por Daugman (DAUGMAN, 2008).

O reconhecimento de íris está baseado em suas características, que podem ser observadas com iluminação no espectro visível ou infravermelho. Entre estas características estão: *collerette*, sulcos, criptas, sardas e *liséré*, que serão apresentadas com mais detalhes no capítulo 3.

A Tabela 3 apresenta um comparativo entre algumas abordagens existentes, relacionando seus autores e os métodos utilizados para a segmentação e extração de características para o reconhecimento da íris.

Tabela 3: Comparativo – abordagens para o reconhecimento da íris.

Autor	Método de Segmentação	Método de Extração de Características	Referência
Daugman	operador integro-diferencial	filtro de Gabor bidimensional	Daugman, 1992
Wildes <i>et al.</i>	detecção de borda baseada no gradiente e transformada de Hough	laplaciano do filtro Gaussiano	Wildes <i>et al.</i> , 1997
Boles <i>et al.</i>	---	cruzamento-por-zero da transformada wavelet	Boles <i>et al.</i> , 1998
Zhu <i>et al.</i>	---	filtro de Gabor e transformada wavelet bidimensional	Zhu <i>et al.</i> , 2000
Lim <i>et al.</i>	---	transformada wavelet de Haar	Lim <i>et al.</i> , 2001
Liam <i>et al.</i>	Limiarização	Redes neurais	Liam <i>et al.</i> , 2002
Tisse <i>et al.</i>	decomposição pelo gradiente, transformada de Hough e operadores integro-diferenciais	conceito de imagem analítica (transformada bidimensional de Hilbert)	Tisse <i>et al.</i> , 2002
Chen e Yuan		dimensão fractal	Chen e Yuan, 2003
Ma <i>et al.</i>	detecção de borda baseada no gradiente e transformada de Hough	filtros de Gabor com simetria par e multicanal	Ma <i>et al.</i> , 2004
Booney <i>et al.</i>	plano-bit (<i>bit-plane</i>), morfologia binária e desvio padrão da intensidade	---	Booney <i>et al.</i> , 2004
Noh <i>et al.</i>	---	Componente de Identificação Independente Multi-resolução (M-ICA)	Noh <i>et al.</i> , 2005
Zaim	conhecimentos de atributos anatômicos e informação do gradiente	---	Zaim, 2005
Arvacheh e Tizhoosh	modelo de controle ativo e algoritmo iterativo	---	Arvacheh e Tizhoosh, 2006

Xu <i>et al.</i>	áreas locais	---	Xu <i>et al.</i> , 2006
Passi e Kumar	limiarização, filtragem e detecção de bordas	filtro <i>Log-Gabor</i>	Passi e Kumar, 2007
Monro <i>et al.</i>	---	Cruzamento por zero da transformada discreto do cosseno (DCT)	Monro <i>et al.</i> , 2007
Conti <i>et al.</i>	detecção de bordas	extração das micro-características	Conti <i>et al.</i> , 2007
Choras	Limiarização e detecção de bordas	---	Choras, 2007
Hollingsworth, Peters, Bowyer e Flynn	detecção de borda baseada no gradiente e transformada de Hough	filtro <i>Log-Gabor</i>	Hollingsworth <i>et al.</i> , 2009

Do ponto de vista da extração de características, os métodos existentes podem ser divididos em três principais categorias: métodos baseados na fase (*phase-based methods*), métodos baseados na representação do cruzamento por zero (*zero-crossing representation-based methods*) e métodos baseados na análise da textura (*texture analysis-based methods*).

Nos métodos baseados na fase, os algoritmos propostos por Daugman (DAUGMAN, 1992, 1993, 2001, 2004) para o reconhecimento de íris aparecem nos principais trabalhos. O sistema proposto por Daugman utiliza um operador integro-diferencial para localizar as fronteiras da íris, que se baseia na ascensão do gradiente para ajustar os contornos circulares. A codificação (representação) da íris é feita através da aplicação da transformada wavelet bidimensional de Gabor. Para medir a dissimilaridade entre as íris é computada a distância de Hamming entre o par correspondente de representações. Na seção 4.2 do capítulo 4 serão apresentados mais alguns detalhes do referido método.

No trabalho de Noh e colegas (NOH *et al.*, 2005) as características da íris são extraídas por uma Análise de Componentes Independentes em Multi-resolução (M-ICA), ao invés de utilizar o método convencional baseado nas wavelets 2D de Gabor, para gerar uma representação compacta (cinco vezes menor que a obtida pelas wavelets de Gabor). Os coeficientes das expansões ICA são utilizados como vetores de características. No entanto, o fraco desempenho do M-ICA para separação em classes acaba comprometendo a acurácia do método. Chen e Yuan (CHEN & YUAN, 2003) utilizam um algoritmo baseado na dimensão fractal para extrair as características da íris. Através do particionamento da região da íris em pequenos blocos, as características da dimensão fractal local são calculadas para formar o código da íris e posteriormente os padrões são comparados usando uma abordagem baseada em agrupamento e redes neurais.

Os principais trabalhos que utilizam métodos baseados na representação do cruzamento por zero estão fundamentados no trabalho de Wildes *et al.* (WILDES, 1997), que utilizam detecção de borda baseada no gradiente e a transformada de Hough para localizar a íris na imagem. A representação faz uso de uma decomposição em bandas de passagem resultante do laplaciano do filtro Gaussiano, implementado na prática através da construção de uma pirâmide Laplaciana. O grau de semelhança é avaliado com base na correlação normalizada entre as representações da íris adquirida e a do banco de dados. Boles e Boashash (BOLES & BOASHASH, 1998) utilizam o cruzamento por zero da transformada wavelet em vários níveis de resolução, calculada sobre círculos concêntricos na íris, para gerar um sinal unidimensional (1D). Estes sinais são comparados com características do modelo usando diferentes funções de dissimilaridade. Roche e colegas (ROCHE *et al.*, 2001) utilizam uma abordagem semelhante. Em outra abordagem, Ma e colegas (MA *et al.*, 2004) utilizam filtros de Gabor multicanal com simetria par para capturar informação da textura local da íris, que será usada para gerar um vetor de características de comprimento fixo. A comparação está baseada na distância Euclidiana entre os vetores correspondentes das duas íris. Monro e colegas (MONRO *et al.*, 2007) apresentam um método para confronto de íris usando os cruzamentos por zero de uma transformada discreta do cosseno (DCT) unidimensional como uma forma de extração de características para posterior classificação. A DCT de uma série de caminhos angulares sobrepostos é obtida das imagens da íris normalizada e um pequeno conjunto de coeficientes é usado para formar os vetores de sub-características. O código de íris é gerado como uma sequência de muitas dessas sub-características e a classificação é realizada utilizando a métrica da distância de Hamming ponderada.

Para extração de características, Zhu e colegas (ZHU *et al.*, 2000) utilizam filtros de Gabor e transformada wavelet bidimensional (2D). Esta abordagem faz uso da classificação por distância Euclidiana ponderada para a identificação. O método proposto é invariante a rotação e a translação e apresenta tolerância à iluminação. Lim e colegas (LIM *et al.*, 2001) utilizam a transformada wavelet de Haar para obter o vetor de características e um método de aprendizagem LVQ (*Learning Vector Quantization*) para treinar uma rede neural com uma inicialização do vetor de peso para a seleção do vencedor.

Liam e colegas (LIAM *et al.*, 2002) utilizam limiarização para distinguir a íris da pupila e regiões vizinhas. Após a segmentação, a íris é reconstruída em um formato retangular e redes neurais são utilizadas para o reconhecimento dos padrões. Booney e colegas (BOONEY *et al.*, 2004) apresentam uma técnica para extração de padrões da íris utilizando o plano de bits (*bit-plane*) menos significativo. A morfologia binária é aplicada ao plano de bits

para determinar a fronteira da pupila, enquanto que a fronteira límbica (íris/esclera) é identificada através da avaliação do desvio padrão da intensidade na imagem, nos eixos vertical e horizontal.

Outro método de classificação da íris, apresentado por Proença e Alexandre (PROENÇA & ALEXANDRE, 2007), visa o reconhecimento não-cooperativo, ou seja, o processo de reconhecimento automatizado de indivíduos usando imagens de íris capturadas à distância, sob condições de iluminação menos controladas e sem a sua participação ativa. O método proposto divide a imagem da íris segmentada e normalizada em seis regiões, faz uma extração de características e comparação independente para cada região, combinando cada valor de dissimilaridade através de uma regra de classificação. A estratégia de classificação requer o cálculo de um conjunto de limiares de dissimilaridade ótimos que minimizem a taxa de erro.

Os métodos baseados na análise de textura visam identificar uma determinada característica da íris em particular. A abordagem proposta por Conti e colegas (CONTI *et al.*, 2007) apresenta um sistema que utiliza quatro micro-características (núcleo, *collarette*, vales e raios) para a identificação. Essa abordagem utiliza técnicas de detecção de bordas para determinar as fronteiras da íris, computando os parâmetros de dois círculos. A íris segmentada é normalizada para posterior extração das micro-características. Arvacheh e Tizhoosh (ARVACHEH & TIZHOOSH, 2006) apresentam um modelo de controle ativo para detectar a fronteira da pupila visando melhorar o desempenho de sistemas de reconhecimento de íris. Dois tipos de modelos de forças de controle, interna e externa, são projetados para ativar adequadamente o contorno e localizá-lo sobre a fronteira da pupila. Também é apresentado um algoritmo iterativo desenvolvido para capturar o *limbus* e as pálpebras. O algoritmo procura iterativamente as fronteiras do *limbus* e das pálpebras e exclui as áreas das pálpebras que cobrem a íris. Os contornos das pálpebras são modelados como curvas elípticas e a procura se baseia no contorno esperado em diferentes graus de abertura dos olhos. Tisse e colegas (TISSE *et al.*, 2002) utilizam uma combinação de decomposição pelo gradiente, transformada de Hough, operadores integro-diferenciais para a localização da íris e a transformada bidimensional de Hilbert para extrair informação da textura da íris.

Um método para segmentação automática da íris baseado em áreas locais é apresentado por Xu e colegas (XU *et al.*, 2006). O método proposto é dividido em três partes principais. A primeira encontra a região de um retângulo local, no qual a intensidade média é mínima e o estende para localizar a pupila. A seguir, seleciona dois pequenos setores da área local que incluem a fronteira externa da íris para localizá-la. Por último transforma a íris de

um sistema de coordenadas polares para cartesianas e a normaliza para um tamanho fixo, para compensar os efeitos da contração da íris causados pela variação no tamanho da pupila e remover a não-concentricidade da íris e da pupila. Outra abordagem que localiza e segmenta a íris automaticamente é proposta por Zaim (ZAIM, 2005). Primeiramente, para localização do centróide do olho é aplicada uma técnica de crescimento de região circular. Diversas características geométricas do olho são usadas para restringir a construção de um modelo no espaço polar da imagem. Para extração das fronteiras da íris o modelo emprega conhecimentos de atributos da sua anatomia, bem como informação do gradiente. Choras (CHORAS, 2007) também propõe um algoritmo para localização da íris, onde a detecção da pupila é realizada através de uma limiarização simples e uma operação de detecção de borda. As fronteiras interna e externa são localizadas utilizando as diferenças de intensidade entre pupila, íris e esclera, bem como o formato circular da pupila e da íris.

Hollingsworth, Bowyer e Flynn utilizam implementações baseadas nas abordagens de Daugman (DAUGMAN, 1993) e Wildes (WILDES, 1997) para segmentação e codificação das imagens da íris. No entanto, uma das principais linhas de pesquisa do grupo está voltada para o desenvolvimento de algoritmos para melhorar a acurácia da biometria da íris (HOLLINGSWORTH, 2009, 2009b, 2009c, 2009d). O grupo também apresenta diversos estudos relacionados à degradação do desempenho do reconhecimento de íris por diversos fatores, entre eles, a degradação causada pela dilatação da pupila (HOLLINGSWORTH, 2009a).

Passi e Kumar (PASSI & KUMAR, 2007) também apresentam uma técnica para melhorar o desempenho de sistemas de reconhecimento de íris usando informação *cohort* e qualidade-do-usuário como ponderações para a comparação. O método utiliza técnicas de limiarização, filtragem e detecção de bordas para segmentar a íris, que depois é submetida a uma normalização. A extração de características utiliza a informação da fase, que é obtida pela filtragem da imagem realçada através de um filtro Log-Gabor.

Diversos trabalhos, entre eles alguns dos citados anteriormente (NOH *et al.*, 2005; PASSI & KUMAR, 2007; MA *et al.*, 2004; ZHU *et al.*, 2000; BOONEY *et al.*, 2004; etc.), utilizaram o banco de imagens de íris CASIA (versão 1.0) para testes e realização de experimentos. Cabe ressaltar, no entanto, que Phillips e colegas (PHILLIPS *et al.*, 2007) fazem uma recomendação para que o referido banco de imagens não seja mais utilizado em pesquisas biométricas da íris. O banco original que contava com 2255 imagens foi substituído por uma versão disponível atualmente com 756 imagens e neste último, a pupila foi substituída manualmente em todas as imagens por uma região circular com intensidade

constante, para eliminar os efeitos causados pela reflexão especular dos dispositivos de iluminação infravermelho.

3. ANATOMIA DA ÍRIS E TÉCNICAS PARA O PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Neste capítulo serão abordados alguns fundamentos da teoria utilizada no presente trabalho. Inicialmente será apresentada a anatomia do olho e da íris, mostrando alguns detalhes estruturais e funcionais de ambos. A seguir, serão apresentadas algumas técnicas e operadores relacionados ao Processamento de Imagens, Morfologia Matemática e Transformação de Movimento, que foram utilizados no desenvolvimento do trabalho e que auxiliam no entendimento da abordagem proposta.

3.1 OLHO HUMANO

O olho, também denominado globo ocular, é o órgão mais externo do sistema da visão humana, responsável pela captação da luz refletida pelos objetos à nossa volta e por transformá-la em impulsos eletroquímicos que serão conduzidos até o cérebro, onde serão processados (ATLAS DE OFTALMOLOGIA, 1999).

3.1.1 Anatomia do Olho

O olho encontra-se alojado na órbita, que é uma cavidade óssea do crânio, envolvido por um tecido gorduroso que serve para sua proteção. No interior do olho há uma espécie de gel, chamado de humor vítreo, responsável por manter a sua forma. O globo ocular, com aproximadamente 25 mm de diâmetro, tem uma forma esférica e é formado por três camadas de tecidos: túnica externa ou fibrosa, túnica média ou vascular e túnica interna ou sensorial (DUANE'S OPHTHALMOLOGY, 2000).

A camada mais externa, túnica externa, é composta pela córnea, tecido transparente na porção anterior do olho, e pela esclera, porção branca do olho. A camada do meio, túnica média, é composta pela coróide, corpo ciliar e íris, onde, destas estruturas apenas a íris, parte colorida do olho, normalmente pode ser observada a olho nu. A camada mais interna, túnica interna, é composta pela retina, que é um tecido do sistema nervoso situado na porção posterior do olho.

A Figura 3(a) mostra as estruturas aparentes do olho e da região à sua volta, enquanto a Figura 3(b) mostra um corte transversal com detalhes das suas estruturas externas e internas.

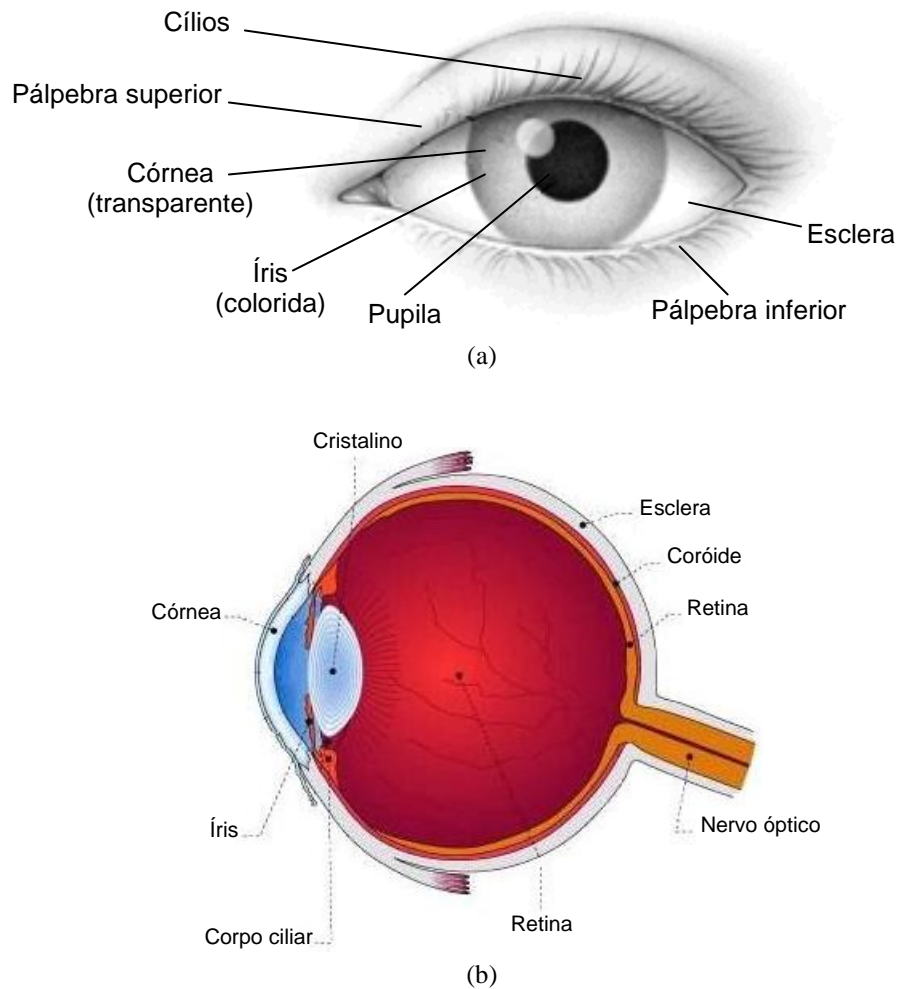


Figura 3: Anatomia do olho: (a) estruturas do olho, (b) corte transversal [Fonte: adaptado de (VISÃO, 2001)].

A luz refletida pelos objetos atinge em primeiro lugar a córnea, depois passa através do humor aquoso, líquido transparente que preenche o espaço entre a córnea e o cristalino, penetrando no globo ocular pela pupila, atingindo o cristalino que funciona como uma lente de focalização, e posteriormente a retina. Na retina, mais de cem milhões de células fotossensíveis transformam a luz em impulsos eletroquímicos, que são enviados ao cérebro pelo nervo óptico. No cérebro, mais precisamente no córtex visual ocorre o processamento das imagens recebidas pelos olhos direito e esquerdo completando então a sensação visual, Figura 4 (DUANE'S OPHTHALMOLOGY, 2000; ATLAS DE OFTALMOLOGIA, 1999).

A córnea, devido a seu formato e transparência, associada ao cristalino, lente transparente e flexível, constitui o sistema óptico responsável por focar as imagens na retina, convergindo então os raios luminosos para um ponto focal sobre a mesma. A cor do olho é determinada pela íris, que está atrás da córnea. Assim como a coróide, composta basicamente por vasos e responsável por parte da nutrição do olho, o corpo ciliar e a íris fazem parte das estruturas internas do globo ocular.

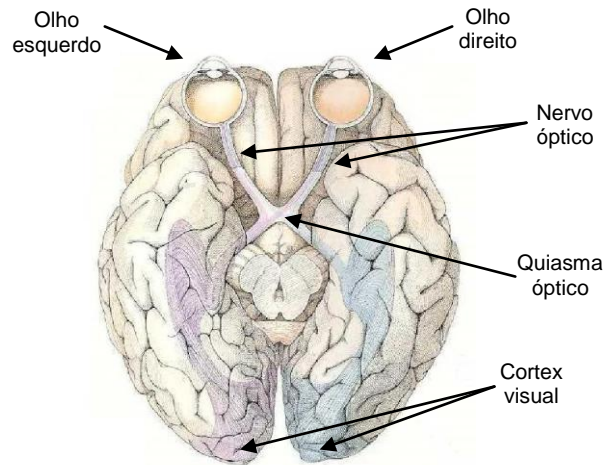


Figura 4: Sistema visual humano [Fonte: adaptado de (HARVARD, 2010)].

A íris, que é responsável pela coloração dos olhos, tem a função de controlar a intensidade de luz que entra neles. Dotada de movimentos contráteis em reação ao estímulo luminoso, ela apresenta uma abertura central denominada pupila, cujo diâmetro é inversamente proporcional à intensidade luminosa. Quando há pouca luz, o diâmetro da pupila é maior para permitir que uma maior quantidade de luz chegue até a retina, e vice-versa. Do ponto de vista morfológico e funcional, a íris pode ser comparada ao diafragma de uma câmera. Atrás da íris está localizado o cristalino, uma lente que fica presa ao corpo ciliar. Composto por fibras musculares, o corpo ciliar é capaz de alterar o formato do cristalino, permitindo que as imagens sejam focalizadas no interior do olho, mais especificamente na retina.

3.1.2 Anatomia da Íris

A íris humana consiste de um tecido fibrovascular pigmentado, localizado entre o cristalino e a córnea, formado por diversas características visíveis como criptas, sardas, sulcos, rugas ou estrias, *collerette* e *liséré*, as quais produzem uma estrutura com muitos

detalhes (WILDES, 1997). Estas características são únicas para cada indivíduo, resultando do desenvolvimento de estruturas anatômicas durante o estágio embrionário, por um processo aleatório sujeito às condições do meio em que o embrião é formado (RAKSHIT & MONRO, 2007). Algumas doenças que acometem a íris, tais como neoplasias da íris, iridociclite, iridosquise, irite, síndrome endotelial iridocorneana, iridonese, e iridoplegia, podem afetar suas estruturas, causar lesões em seus tecidos e alterar sua coloração, modificando assim sua aparência externa. No entanto, são consideradas doenças raras em sua maioria.

Determinadas estruturas da íris já se encontram desenvolvidas desde o nascimento, enquanto outras se desenvolvem até os dois anos de idade. Algumas alterações podem acontecer com o passar da idade, mas a estabilidade e a diversidade de características existentes em sua textura permitem afirmar que os padrões de uma íris saudável são únicos. Sendo assim, torna-se possível utilizar a íris humana para fins de reconhecimento biométrico (WILDES, 1997).

A íris é composta por duas camadas de tecidos superpostas: uma posterior, denominada ectodérmica, e outra anterior, denominada mesodérmica. A camada posterior se estende da borda pupilar ao ponto de inserção da íris no corpo ciliar. Nesta camada densamente pigmentada, encontram-se os músculos responsáveis pelos movimentos da pupila. O músculo esfíncter, formado por fibras circulares dispostas em forma de anel, é o responsável pelo movimento de contração da pupila, miose, representado na Figura 5(a). Já o dilatador, formado por fibras longitudinais ou radiais, é o responsável pela dilatação, midríase, representada na Figura 5(c).

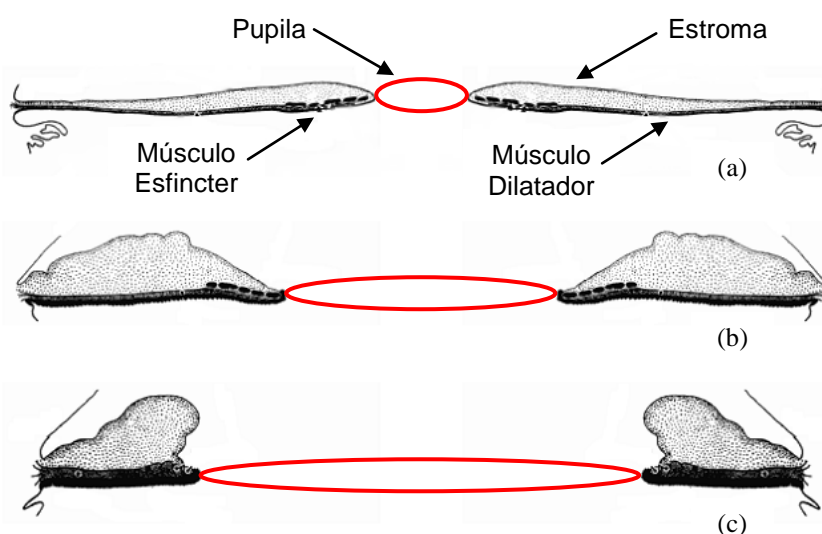


Figura 5: Movimentos da pupila: (a) contração, (b) intermediário e (c) dilatação [Fonte: adaptado de (MILLER *et al.*, 2005)].

A camada anterior atinge sua máxima espessura ao nível do *collerette*. Vista através de um corte radial, a camada anterior exibe o formato semelhante ao de dois triângulos com as bases justapostas à altura do *collerette*, que a divide em duas partes desiguais: uma menor, a parte pupilar e outra maior, a parte ciliar, observadas na Figura 6(b). A parte ciliar se estende do *collerette* à inserção iridiana no corpo ciliar, onde se pode distinguir a zona plana, a zona ondulada e a raiz da íris. A zona plana, por sua vez, vai do *collerette* à região onde se iniciam os primeiros sulcos de contração. Já a zona ondulada, corresponde à região onde se localizam os sulcos de contração, ou seja, ela se estende do início dos primeiros sulcos (onde termina a zona plana) até a última prega, situada periféricamente em relação ao último sulco de contração. A parte pupilar tem início no *collerette* e termina abruptamente próximo a pupila (DUANE'S OPHTHALMOLOGY, 2000; ATLAS de OFTALMOLOGIA, 1999).

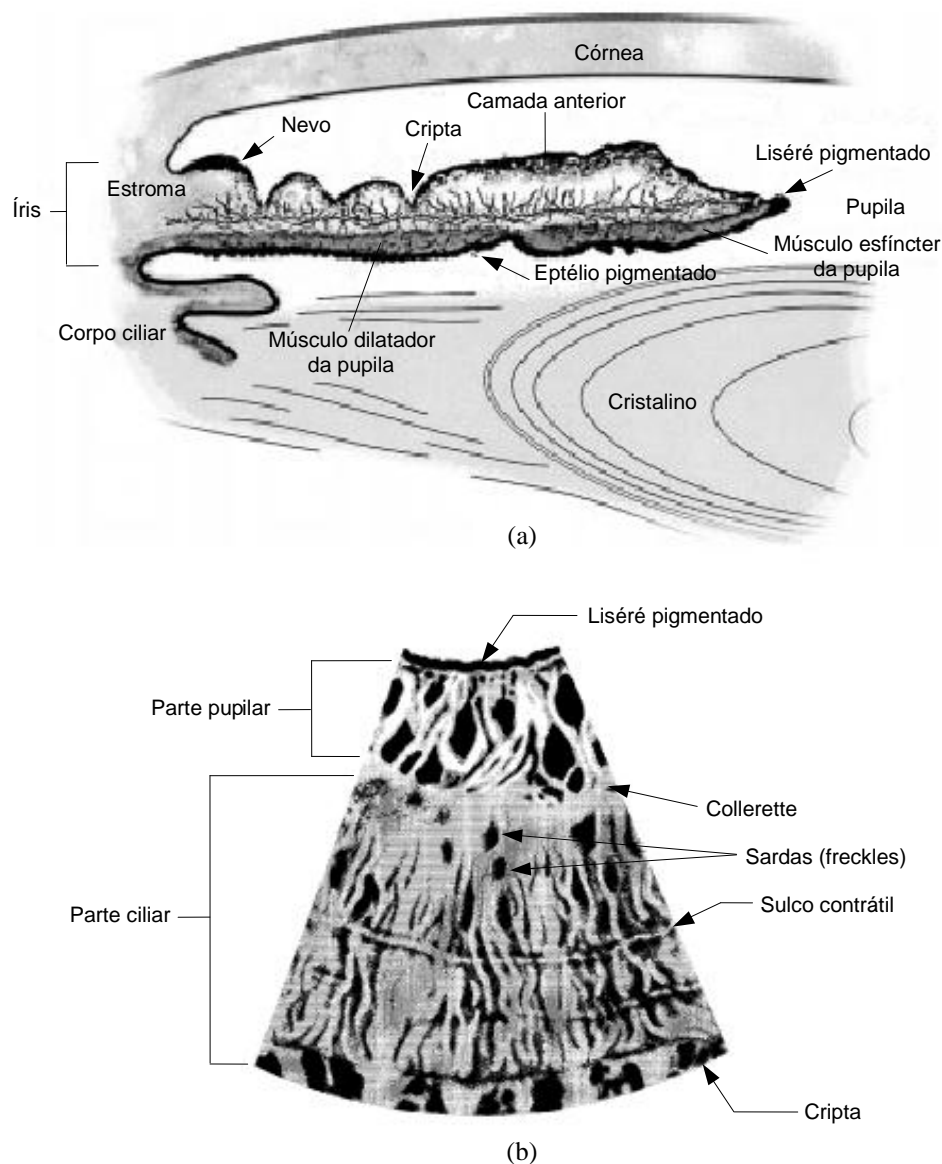


Figura 6: Anatomia da íris humana: (a) corte transversal e (b) setor frontal [Fonte: adaptado de (WILDES, 1997)].

A Figura 6 apresenta em detalhes a estrutura anatômica da íris. Na Figura 6(a) a estrutura é vista através de um corte transversal, e na Figura 6(b) através de um setor frontal.

Dentre as características que podem ser observadas na estrutura da íris, pode-se destacar:

- *Collerette*: região situada concentricamente à pupila que separa a parte pupilar da parte ciliar e onde os músculos esfíncter e dilatador se sobrepõem;
- *Lisééré*: moldura pigmentada, cor de café, denteada, que contorna a pupila;
- Criptas: atrofia irregulares vistas na superfície anterior da íris;
- Nevos: agrupamentos de células pigmentadas;
- Sardas: concentração de cromatóforos.

3.2 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O processamento digital de imagens (PDI) trata da manipulação de sinais bidimensionais realizada através de operações implementadas com o auxílio de um sistema computacional. A utilização de técnicas de processamento digital de imagens tem por objetivo melhorar o aspecto visual de certas características estruturais da imagem e fornecer informações para a interpretação humana, assim como permitir a análise automática de informações extraídas da imagem por meio de um sistema computacional. As aplicações onde técnicas de processamento de imagens vem sendo utilizadas abrangem diversas áreas do conhecimento, que vão desde a medicina e a biologia, passando pela geografia e geologia, até a automação industrial e segurança, entre outras.

As técnicas de processamento de imagens utilizadas no presente trabalho estão voltadas para o realçamento de imagens, segmentação, reconhecimento de padrões, extração de características e classificação. Alguns conceitos básicos de processamento digital de imagens, tais como histograma, equalização de histograma, limiarização, vizinhança de pixel e conectividade, são apresentados no apêndice A.

3.3 MORFOLOGIA MATEMÁTICA – OPERADORES E CONCEITOS

O termo morfologia em biologia refere-se ao estudo da estrutura de plantas e animais. Analogamente, a morfologia matemática baseia-se no estudo da estrutura geométrica

das entidades que compõem uma imagem (GONZALEZ & WOODS, 2001). Sua aplicação abrange diversas áreas de análise e processamento de imagens, cujos objetivos podem ser os mais variados como, por exemplo: filtragem, segmentação, realce, afinamento, detecção de bordas, entre outros.

Na morfologia matemática, informações relativas à topologia e à geometria de um conjunto desconhecido, por exemplo, uma imagem, são extraídas usando um outro conjunto completamente definido chamado *elemento estruturante (EE)* para a transformação. Então, a teoria de conjuntos serve de base para morfologia matemática. Em se tratando de imagens binárias, os conjuntos em questão pertencem ao espaço inteiro bidimensional (Z^2), cujos elementos do conjunto são vetores bidimensionais (2D) com coordenadas (x,y) . Para imagens em tons de cinza, os conjuntos que as representam possuem elementos que pertencem ao espaço Z^3 , onde os dois primeiros elementos correspondem às coordenadas do pixel e o terceiro ao seu nível de cinza (SERRA, 1988; SOILLE, 2003).

Algumas definições básicas da teoria de conjuntos, ilustradas na Figura 7, serão úteis para melhor compreensão dos operadores morfológicos. Sejam Y e K dois conjunto em Z^2 , cujos componentes são $y = (y_1, y_2)$ e $k = (k_1, k_2)$. A translação de Y por $x = (x_1, x_2)$, cuja representação é $(Y)_x$, é definida como:

$$(Y)_x = \{u \mid u = y + x, \text{ para } y \in Y\} \quad (1)$$

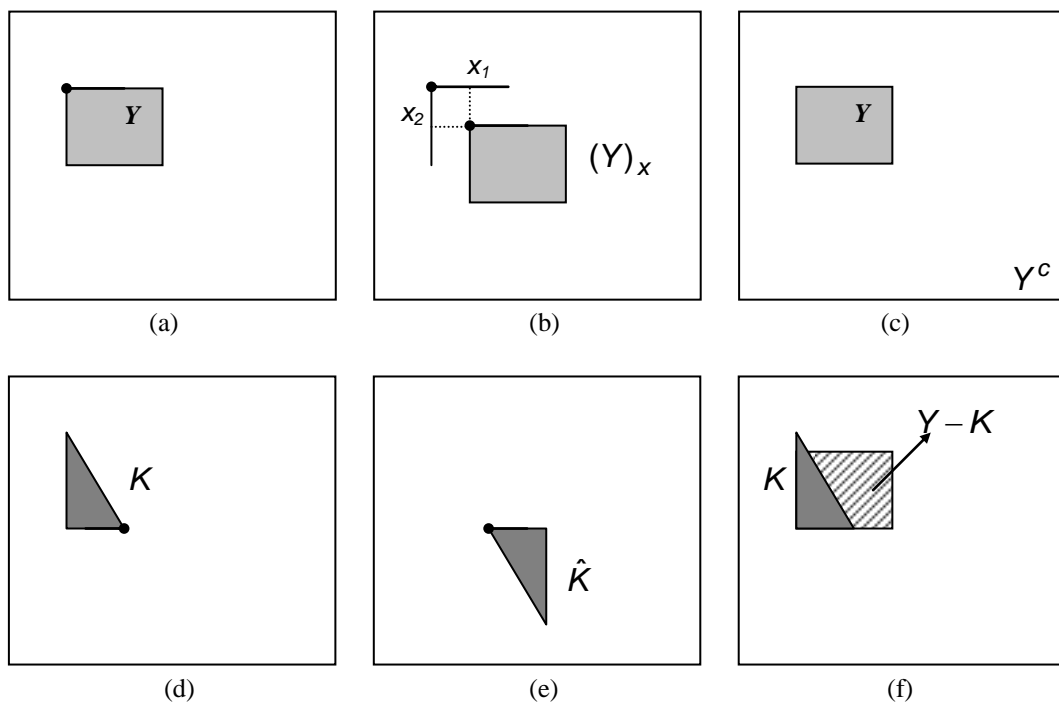


Figura 7: Definições: (a) Conjunto Y ; (b) translação de Y por x ; (c) Y e seu complemento; (d) conjunto K ; (e) reflexão de K em relação a sua origem; (f) diferença entre os conjuntos Y e K .

O complemento de Y , denotado por Y^c é:

$$Y^c = \{x \mid x \notin Y\} \quad (2)$$

A reflexão de Y , denotada por \hat{Y} é:

$$\hat{Y} = \{x \mid x = -y, \text{ para } y \in Y\} \quad (3)$$

A diferença entre Y e K , denotada por $Y - K$ é:

$$Y - K = \{x \mid x \in Y, x \notin K\} = Y \cap K^c \quad (4)$$

3.3.1 Elemento Estruturante (EE)

Um *elemento estruturante* plano (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) é um conjunto de coordenadas pré-definidas. Os formatos elementares mais comuns são: *cruz* (*cross*), *caixa* (*box*) e *disco* (*disk*). O tamanho do *EE* varia em função do raio. A Figura 8 mostra os *EEs*, nos diversos formatos, para um raio igual a 2 pixels. O formato e o tamanho do *EE* podem variar de acordo com a aplicação e sua utilização deve fazer com que a reconstrução produza resultados úteis.

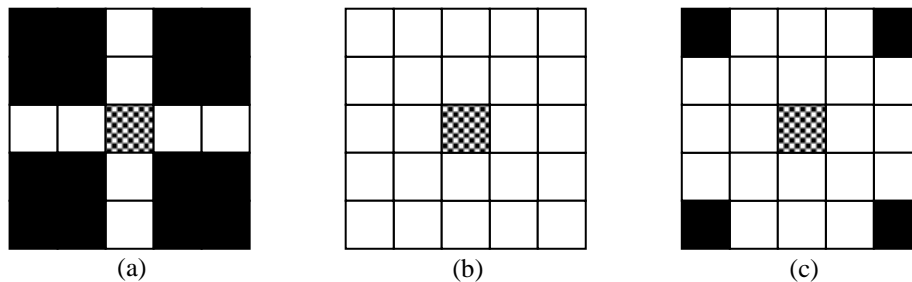


Figura 8: Formato dos *elementos estruturantes* com raio igual a 2 pixels: (a) *EE cruz*; (b) *EE caixa*; (c) *EE disco*.

3.3.2 Operadores e Transformações Morfológicas

A *dilatação* (δ), *erosão* (ε), *abertura* (γ) e *fechamento* (φ) (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) são considerados operadores básicos da *Morfologia Matemática*. Estes operadores são tipicamente aplicados a imagens binárias, mas também possuem versões que operam em tons de cinza. Outros operadores e transformações morfológicas são derivados destes operadores básicos, como por exemplo, a transformação *hit-or-miss* e o operador *afinamento*. No apêndice B deste trabalho são apresentados além dos quatro operadores

básicos, a transformação *hit-or-miss* e o operador *afinamento*. A seguir serão apresentados os conceitos de *resíduos* e *reconstrução*.

3.3.3 Resíduos

Resíduo é um nome genérico dado ao que é deixado de algo que é removido. Para exemplificar este conceito pode se fazer uma analogia: quando algo é limpo ou filtrado, aquilo que fica ou não passa pelo filtro é o resíduo. Contanto que se tenham dois operadores (Ψ_1 e Ψ_2), um maior que o outro, o resíduo pode ser computado pela diferença entre eles.

$$R = \Psi_1 - \Psi_2 \quad \text{se } \Psi_1 \geq \Psi_2 \quad (5)$$

3.3.3.1 Gradiente Morfológico

Um primeiro grupo de resíduos é chamado *gradiente* (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003; SOILLE, 2003) e é obtido através de *dilatações* e *erosões*. Eles geram contornos (binários ou em tons de cinza), que podem ser interno (imagem original “ t ” menos a *erosão*), externo (*dilatação* menos a imagem original “ t ”) ou ambos (*dilatação* menos *erosão*), ou seja:

- *Gradiente*: $\delta - \varepsilon$
- *Gradiente Interno*: $t - \varepsilon$
- *Gradiente Externo*: $\delta - t$

Um exemplo dos *gradientes* de uma imagem binária, utilizando um *EE cruz* (3x3), é apresentado na Figura 9, onde a imagem original contendo algumas bolhas é mostrada em 9(a) e em (b) o resultado da aplicação do *gradiente*. A Figura 9(c) mostra o resultado do *gradiente interno* que corresponde ao contorno interno das bolhas, e em (d) o *gradiente externo* que corresponde ao contorno externo das mesmas.

O resultado do *gradiente morfológico* de uma imagem em tons de cinza é apresentado na Figura 10. Em 10(a) a imagem original e em (b) o resultado do *gradiente*. Como pode ser observado, o *gradiente morfológico* realça transições nítidas (em nível de cinza) na imagem original.

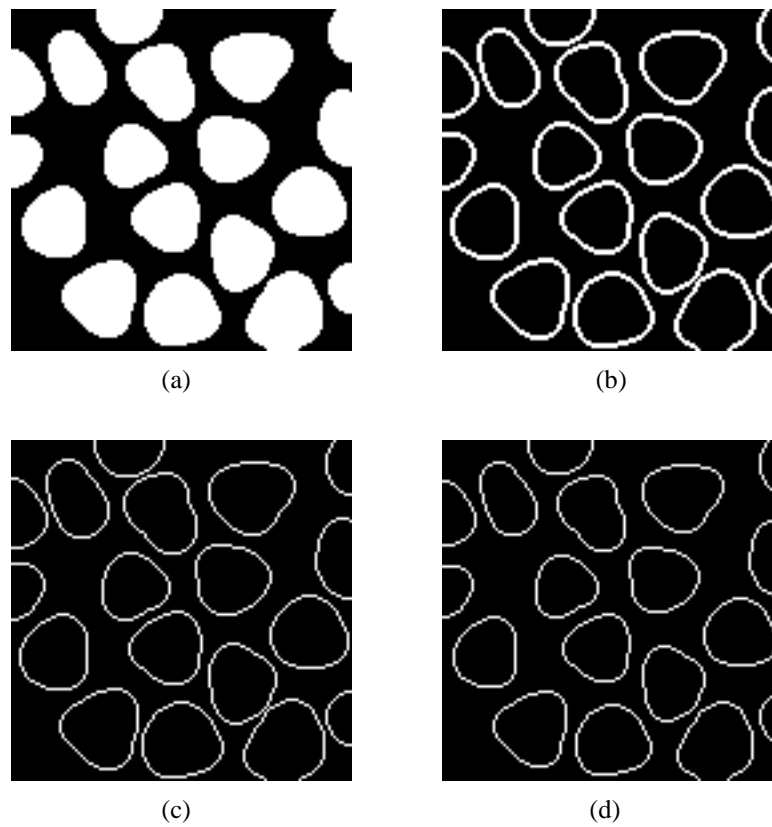


Figura 9: Exemplos de *gradientes* de uma imagem binária: (a) imagem original, (b) o resultado da aplicação do *gradiente*, (c) os contornos internos das bolhas resultado do *gradiente interno* e (d) os contornos externos obtidos pelo *gradiente externo* [Fonte: (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003)].

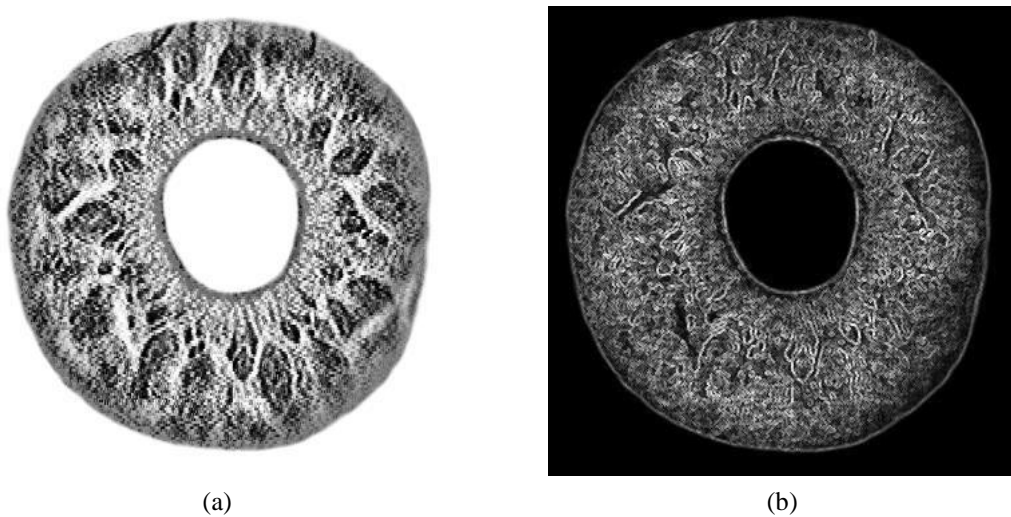


Figura 10: *Gradiente morfológico* em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem com as transições realçadas.

3.3.3.2 Top-hat

Um segundo grupo de resíduos são a *abertura* e o *fechamento top-hat* (*open/close top-hat*) (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003). Neste caso, a *abertura* e o *fechamento* são filtros morfológicos gerados pelo formato do *EE*. Os resíduos são tudo em que o *EE* não se ajusta (encaixa). Por definição, *abertura top-hat* (*open top-hat*) é a diferença entre a imagem original e sua imagem após a *abertura*, e o *fechamento top-hat* (*close top-hat*) é a diferença entre a imagem após o *fechamento* e a original, ou seja:

$$\text{Abertura top-hat:} \quad X - (X \circ K) \text{ ou } \iota - \gamma \quad (6)$$

$$\text{Fechamento top-hat:} \quad (X \bullet K) - X \text{ ou } \varphi - \iota \quad (7)$$

Para imagens binárias, assim como a *abertura* remove protuberâncias estreitas ou pontas (*spikes*) no contorno, a *abertura top-hat* revela exatamente estas protuberâncias que o *EE* não se encaixa. No exemplo ilustrado pela Figura 11, a *abertura top-hat* é usada para detectar os dentes de uma engrenagem, que pode ser observada em 11(a). Em 11(b) a imagem original é submetida a uma *abertura* por um *EE* esférico com raio igual a 20. A seguir a imagem resultante da *abertura* é subtraída da imagem original, Figura 11(c). Esta sequência abertura-subtração é conhecida como *abertura top-hat*.

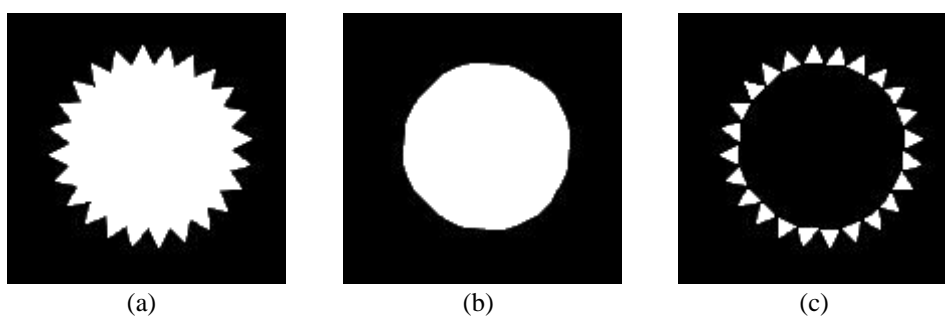


Figura 11: *Abertura top-hat* binária: (a) imagem original, (b) resultado da *abertura* usando um *EE* esférico e (c) resultado obtido após a subtração da imagem (b) por (a) [Fonte: (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003)].

Para imagens em tons de cinza, a *abertura top-hat* detecta os picos que são mais estreitos que a largura do *EE*, e o *fechamento top-hat* seguido de uma *limiarização* (*thresholding*) é uma poderosa ferramenta para segmentação de uma imagem. O comportamento da *abertura top-hat* para uma imagem em tons de cinza pode ser visto no exemplo mostrado na Figura 12, onde uma imagem bidimensional contendo três picos (com formato gaussiano) é apresentada, Figura 12(a), e em 12(c) esta imagem vista em perspectiva,

como uma superfície topográfica. A *abertura* utiliza um *EE caixa* com raio igual a 3 (7x7), e todos os picos na imagem onde o *EE* não se encaixa são detectados pelo *top-hat*, Figura 12(b) e (d).

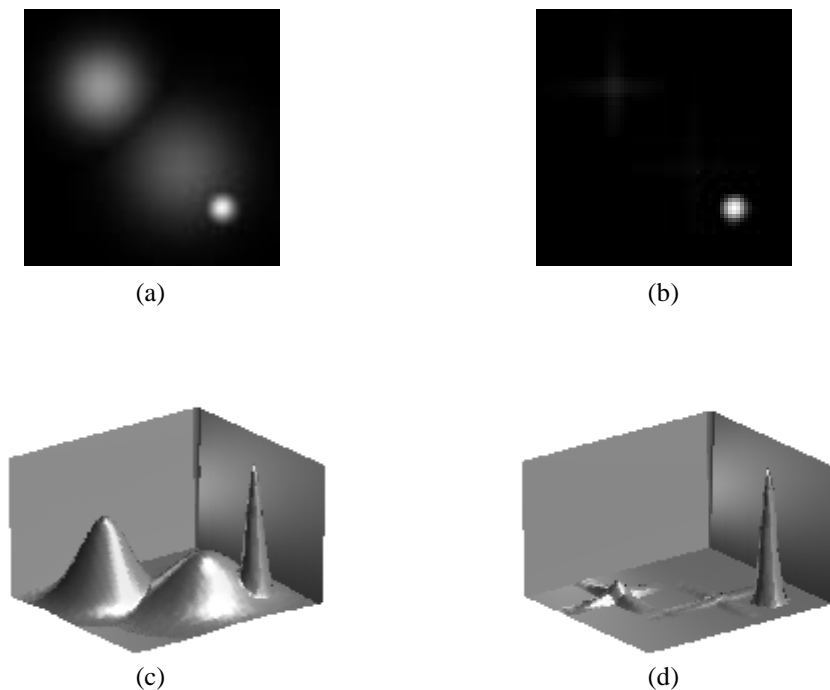


Figura 12: Exemplo de *abertura top-hat* em tons de cinza: (a) imagem contendo três picos, (b) resultado da aplicação do operador utilizando um *EE caixa* 7x7, (c) e (d) perspectivas em superfícies topográficas das imagens (a) e (b), respectivamente [Fonte: (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003)].

3.3.4 Reconstrução

É uma operação que está associada ao conceito de conectividade em imagens binárias ou em tons de cinza (VINCENT, 1993; SOILLE, 2003). Em uma imagem binária a *reconstrução* é equivalente ao processo de pintura usando a ferramenta de *preenchimento de cor (flood fill color)*, disponível em aplicativos de edição de imagens. Por exemplo, o usuário seleciona uma determinada cor e toca uma região branca na imagem. Tudo que está conectado aquele ponto será colorido com a cor selecionada. Em morfologia, aquele ponto selecionado é o *marcador*, a imagem de entrada é o *todo* e a imagem reconstruída é composta por todos os pontos que foram coloridos.

A imagem reconstruída pode ser obtida através de uma sequência infinita de *dilatação* e *interseção*, até que o resultado atinja uma estabilidade. A operação de *dilatação* mais a *interseção* é conhecida como *dilatação condicional*.

$$\delta_{K,Y}(X) = \delta_K(X) \cap Y \quad (8)$$

$$\delta_{K,Y}^n(X) = \underbrace{\delta_{K,Y}(\delta_{K,Y}(\cdots \delta_{K,Y}(x \cap y)))}_n \quad (9)$$

$$\gamma_{K,X}(Y) = \delta_{K,X}^\infty(Y) \quad (10)$$

A *reconstrução* detecta todos os pixels que estão conectados ao *marcador*, sendo o *EE* o responsável pelo critério de conectividade, isto é, para trabalhar com o critério 4-conectados deve-se usar o formato *cruz* elementar e para o critério 8-conectados o formato *caixa* elementar. Usualmente a *reconstrução* está associada às operações de *abertura* e *fechamento*. O conceito de *reconstrução binária* pode ser estendido para tons de cinza apenas usando *dilatação condicional em tons de cinza*. Neste sentido a *reconstrução em tons de cinza* é exatamente a mesma que a binária.

No exemplo da Figura 13, o *marcador* é uma linha vertical no meio da imagem, Figura 13(b), e a imagem condicionante é a imagem binária das bolhas, Figura 13(a). Após aplicar oito *dilatações condicionais* sucessivas, o marcador torna-se mais largo, Figura 13(c), invadindo a imagem condicional, imitando o mesmo comportamento do efeito de preenchimento de algumas ferramentas de pintura disponíveis nos pacotes de edição de imagens. O resultado da *reconstrução*, mostrado na Figura 13(d), é um resultado estável, ou seja, se outra *dilatação condicional* for aplicada, o resultado não se altera. As bolhas marcadas na Figura 13(d) são aquelas que estão conectadas à linha central (*marcador*). Assim, a *reconstrução* detecta todos os pixels que estão conectados aos *marcadores*.

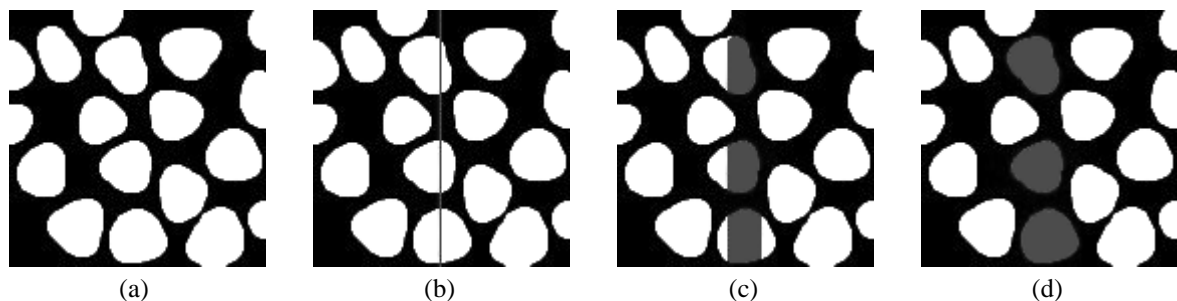


Figura 13: *Reconstrução binária:* (a) imagem condicionante contendo as bolhas - original, (b) linha representando o marcador na imagem, (c) imagem obtida após 8 *dilatações condicionais* e (d) resultado da *reconstrução*, onde as bolhas marcadas correspondem aquelas que estão conectadas ao marcador [Fonte: (DOUGHERTY & LOTUFO, 2003)].

3.4 TRANSFORMAÇÃO DE MOVIMENTO

A análise de uma imagem sujeita a algum tipo de movimento, pode ser dividida em duas tarefas: identificar se os pontos da imagem se moveram ou não, ou determinar como eles se moveram. Estas tarefas são frequentemente referenciadas como *detecção de movimento* e *estimação de movimento*, respectivamente (STILLER & KONRAD, 1999; BOVIK, 2000).

O movimento em uma sequência de imagens, adquirida por uma câmera de vídeo, está relacionado tanto aos movimentos de objetos em uma cena tridimensional (3D), como ao movimento da câmera. Então, os parâmetros da câmera, como seu movimento 3D (translação, rotação) ou distância focal, desempenham um papel importante no modelamento do movimento da imagem. O movimento 3D de objetos e câmeras leva a um movimento 2D no plano da imagem através de um sistema de projeção (Figura 14). Este movimento 2D é conhecido como *movimento aparente* (BOVIK, 2000). Diversas aplicações em processamento e compressão de vídeo bem como em visão computacional, fazem uso de movimento 2D. Em processamento de vídeo, a informação de movimento é usada para conversões, supressão de ruído, ou ainda para restauração. No caso da compressão de vídeo, o conhecimento do movimento ajuda a remover redundância de dados no tempo, para obter altas taxas de compressão. Em se tratando de visão computacional, o movimento 2D ajuda na recuperação do movimento da câmera ou da estrutura da cena.

Para computar trajetórias de movimento, é necessário especificar três elementos básicos:

- selecionar modelos fundamentais, como por exemplo, o modelo de movimento (representação, região do movimento), modelo de relação de dados da imagem e do movimento (modelo de observação), modelo de limite do movimento e modelo de oclusão. Dependendo do tipo de aplicação, se faz a escolha do modelo e de seus parâmetros;
- definir um critério de estimação, que pode ser um erro médio quadrático sobre um bloco, um critério mais robusto, uma taxa-de-distorção ou ainda um critério envolvendo múltiplos termos;
- implementar uma estratégia de busca, para determinar os parâmetros que otimizam o critério selecionado.

3.4.1 Representação do Movimento

A posição no tempo, de um ponto (pixel) de um objeto que está se movendo em um espaço 3D é dada por:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(t) = (X(t), Y(t), Z(t))^T \in \mathbb{R}^3 \quad (11)$$

expressa em coordenadas da câmera. $(\mathbf{X}(t), t)$ define uma curva no espaço 3D sobre o tempo, conhecida como *trajetória de movimento global* (STILLER & KONRAD, 1999). Tomando-se dois instantes de tempo quaisquer t e τ , a *trajetória de movimento global* apresenta um deslocamento 3D na posição, dado por:

$$D_{t,\tau}(\mathbf{X}) = \mathbf{X}(\tau) - \mathbf{X}(t) \quad (12)$$

Um sistema de aquisição de imagens projeta as informações 3D sobre um plano 2D, com coordenadas da imagem $\mathbf{x} = (x, y)^T$. Nesta projeção, a *trajetória de movimento global* resulta em trajetórias de movimento bidimensionais $(\mathbf{x}(t), t)$. Assim como no espaço 3D, o deslocamento 2D pode ser expresso por:

$$\mathbf{d}_{t,\tau}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}(\tau) - \mathbf{x}(t) \quad (13)$$

A Figura 14 mostra a projeção da trajetória do movimento.

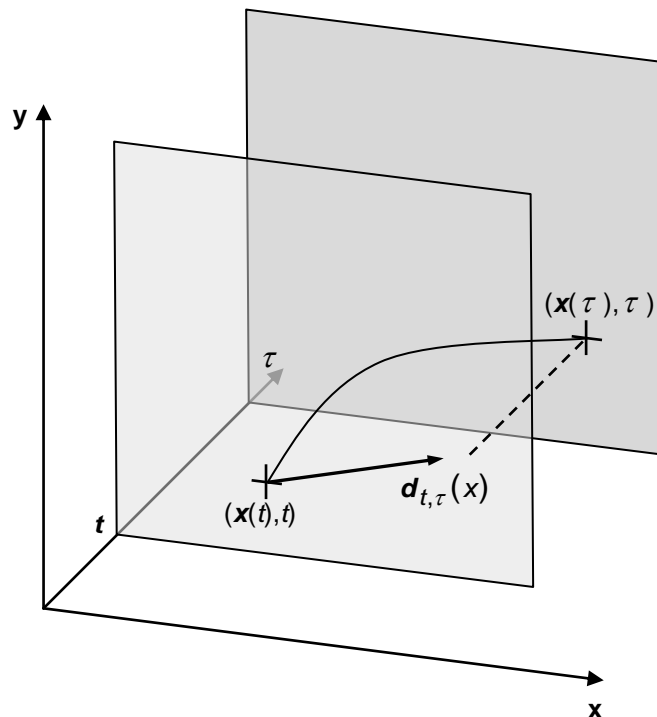


Figura 14: Trajetória do movimento $\mathbf{x}(t)$ e o vetor de deslocamento $\mathbf{d}_{t,\tau}(\mathbf{x})$ associado [Fonte: (STILLER & KONRAD, 1999)].

3.4.2 Modelos de Movimento

A escolha de um modelo para representar um determinado movimento, depende de uma análise prévia de sua trajetória, para identificar algumas características deste movimento, como a região da imagem onde ocorre o movimento e a que tipo de movimento ela está sujeita. O conhecimento destas características permite determinar qual o modelo que mais se aproxima do movimento real, para melhor representá-lo (STILLER & KONRAD, 1999; BOVIK, 2000).

De acordo com a região da imagem que está sujeita ao movimento, este pode ser classificado como:

- movimento global: onde todos os pontos da imagem se deslocam de uma maneira uniforme, ou seja, a região de movimento é a imagem toda (por exemplo, movimento relacionado ao posicionamento da câmera);
- movimento local ou regional: onde um determinado conjunto de pontos da imagem se desloca, sendo a região de movimento definida por este conjunto de pontos (por exemplo, posição da câmera fixa e objetos se movendo na cena);
- movimento de ponto individual: onde pontos da imagem se deslocam, ou regiões onde não existe um comportamento padrão de deslocamento, fazendo com que a região de deslocamento se reduza a um ponto.

A Figura 15 ilustra as regiões de movimento anteriormente descritas: em (a) o movimento global, em (b) o movimento local ou regional e em (c) o movimento de ponto individual.

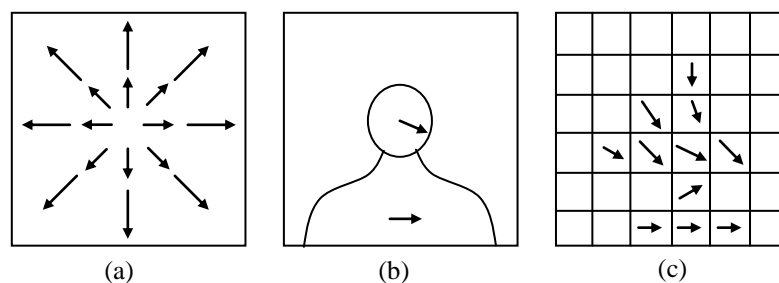


Figura 15: Regiões de movimento: (a) modelo global, (b) modelo local e (c) modelo de ponto individual [Fonte: (STILLER & KONRAD, 1999)].

Desde que o movimento 2D pode resultar da projeção de objetos 3D (em movimento) sobre o plano da imagem, um modelo para *campos de movimento* 2D pode ser derivado de modelos descrevendo movimento 3D, função de superfície 3D e projeção geométrica da câmera. Como o *campo de movimento* é frequentemente descrito por uma função na forma paramétrica, usando um pequeno número de parâmetros, os modelos 3D e conseqüentemente os modelos de movimento 2D são paramétricos. A Tabela 4 apresenta alguns dos modelos para movimento 2D, com seus respectivos modelos 3D e os parâmetros usados para gerar o campo de vetores de movimento (STILLER & KONRAD, 1999). Na Figura 16, são apresentados exemplos dos campos de vetores de movimento, correspondentes a predição de movimento-compensado de um quadrado centralizado, para os modelos *translacional* e *afim* (*affine*), descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Modelos de movimento [Fonte: (STILLER & KONRAD, 1999)].

Modelo 2D			Modelo 3D		
	Número de parâmetros	Campo de Movimento	Função de superfície 3D	Movimento 3D	Modelo de câmera
Translacional	2	$d(x) = (a_1, b_1)^T$	Arbitrária	Translação rígida 3D	Ortográfico
Afim	6	$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \end{pmatrix}$	Planar	Afim 3D	Ortográfico
Projetivo linear	8	$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 x + a_3 y \\ 1 + a_4 x + b_4 y \\ b_1 + b_2 x + b_3 y \\ 1 + a_4 x + b_4 y \end{pmatrix} - x$	Planar	Afim 3D	Perspectiva
Quadrático	12	$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 x + a_3 y + a_6 x^2 + a_5 xy + a_4 y^2 \\ b_1 + b_2 x + b_3 y + b_6 x^2 + b_5 xy + b_4 y^2 \end{pmatrix}$	Parabólica	Afim 3D	Ortográfico
Amostrado	2 por Δ^2 pixels	$d(x) = \sum_{i,j} \begin{pmatrix} a_{ij} \\ b_{ij} \end{pmatrix} H(x - \Delta i, y - \Delta j)$	"Suave" como especificado pelo núcleo de interpolação H		Arbitrário
Polinomial	$2 K $ adaptativo	$d(x) = \sum_{(i,j) \in K} \begin{pmatrix} a_{ij} \\ b_{ij} \end{pmatrix} x^i y^j$	"Suave" como especificado por K		Arbitrário

Uma vez identificado o tipo de movimento e a região da imagem onde ele ocorre, o próximo passo é a escolha do modelo que melhor represente este movimento. Uma escolha bem feita pode ser decisiva para a estimação dos parâmetros do movimento, que por sua vez, podem ser usados para compensar os efeitos causados pelo mesmo.

A equação paramétrica do modelo *afim* 2D, apresentada na Tabela 4 e transcrita a seguir, é composta por seis parâmetros que descrevem o movimento. O movimento de translação corresponde aos parâmetros a_3 e b_3 na equação. Uma composição dos outros quatro parâmetros é usada para representar os movimentos de rotação (dado por a_2 e b_1) e escalamento (dado por a_1 e b_2).

$$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (14)$$

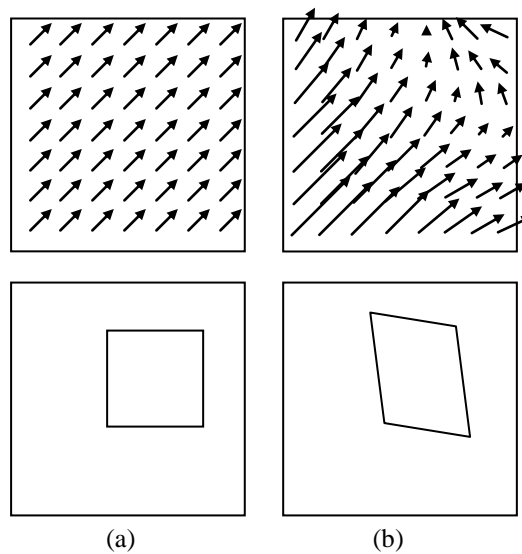


Figura 16: Exemplos de campos de vetores; (a) modelo *translacional*, (b) modelo *afim* [Fonte: (STILLER & KONRAD, 1999)].

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Os fundamentos e conceitos apresentados neste capítulo e nos apêndices A e B servem de base para elaboração de algoritmos apresentados no próximo capítulo. Conceitos de processamento de imagem associados a operadores morfológicos serão utilizados para segmentar a imagem do olho, realçar padrões, extrair características da íris, entre outros.

Através dos conceitos apresentados sobre transformação de movimento, foi possível identificar um modelo adequado para representar o movimento ao qual as imagens da íris estão sujeitas. O modelo *afim* 2D será utilizado no próximo capítulo para estimação dos movimentos de rotação, translação e escalamento, permitindo compensar os efeitos por eles causados, possibilitando assim, um alinhamento das imagens das íris a serem comparadas.

4. PROCESSAMENTO DA ÍRIS

O presente capítulo trata do processamento da íris. Nele serão abordadas as diversas etapas do processamento, bem como os operadores e algoritmos utilizados. Inicialmente são feitas algumas considerações sobre um sistema de reconhecimento automatizado de íris típico, seguido da descrição do método utilizado como referência para efeito de comparação de resultados. Na sequência o método proposto é apresentado, onde são abordadas as diversas etapas do processamento: pré-processamento, onde se encontra a descrição do algoritmo desenvolvido para segmentação da imagem do olho; processamento morfológico, onde são apresentados os algoritmos desenvolvidos para evidenciar os padrões existentes na íris para extrair suas características, e para remoção de pixels redundantes, que elimina os pixels indesejáveis dos esqueletos das estruturas; alinhamento, onde é descrito o processo utilizado para a compensação de movimento da imagem submetida ao sistema; representação, que apresenta como são compostos os vetores de características baseados na representação adotada na abordagem proposta; classificação e confronto, onde a métrica utilizada para o confronto de características é apresentada. Adicionalmente, são apresentados os procedimentos experimentais, que descrevem a metodologia utilizada para realização dos testes, bem como a composição da base de imagens utilizada nos experimentos.

4.1 SISTEMA DE RECONHECIMENTO DE ÍRIS

O processo de reconhecimento automatizado de íris engloba: (1) a aquisição da imagem do olho, (2) a determinação da região da íris, doravante denominada *região de interesse* (*ROI – Region Of Interest*), (3) a extração de características, (4) a representação das características e (5) a classificação.

- (1) Um dos principais desafios na fase de aquisição é a determinação de um sistema de aquisição que capture imagens com boa qualidade, onde alta nitidez, contraste e resolução são desejáveis para suportar um reconhecimento de íris eficiente sem causar desconforto ao usuário. Dependendo das condições de iluminação, distância e enquadramento, um estágio de pré-processamento pode ser necessário para melhorar a qualidade da imagem, incluindo realce de estruturas da íris e redução de artefatos causados pela reflexão da fonte de luz no olho.

- (2) Para delimitar a área a ser analisada na imagem capturada para futuras tarefas de processamento, é necessário determinar a ROI, que compreende a íris – região idealmente anular entre a esclera e a pupila. A identificação automática e robusta da ROI não é uma tarefa simples devido a diversos fatores, como baixo contraste entre as regiões dos olhos, pigmentação da pele da pálpebra, oclusão parcial devido às pálpebras e a presença dos cílios.
- (3) Devido às diferentes características que compõem a íris e seu arranjo único para cada indivíduo, a extração de características pode ser implementada por diferentes abordagens apresentadas na literatura. Tais abordagens podem ser classificadas em três categorias principais: baseada na fase (p.ex. DAUGMAN, 1992 e TISSE *et al.*, 2002), cruzamento por zero (p.ex. BOLES & BOASHASH, 1998 e ROCHE *et al.*, 2001), e métodos de análise de textura (p.ex. WILDES, 1997, MA *et al.*, 2003 e MIRA & MAYER, 2003).
- (4) Após a extração, as características são submetidas a um processo para obtenção da sua representação, que pode ser expressa na forma de códigos, números ou vetores, e que é definida convenientemente para posterior utilização nas etapas de classificação e confronto. Diferentes métodos, como pirâmide Laplaciana (WILDES, 1997), *multiscale quadrature wavelets* (DAUGMAN, 1992) e cruzamento por zero de uma transformada *wavelet* (BOLES & BOASHASH, 1998) são usados para representar as características.
- (5) Na etapa de classificação, as representações passam por um processo de confronto, para medir a similaridade entre elas. Algoritmos usando medidas de dissimilaridade, como distâncias Euclidiana e Hamming (MA *et al.*, 2003; DAUGMAN, 1992; MONRO *et al.*, 2007), ou correlação normalizada (WILDES, 1997), são usados para comparar os padrões da íris sob análise com os padrões armazenados, através de suas respectivas representações.

Apesar das diferenças entre as diversas abordagens, um sistema de reconhecimento de íris típico tem a estrutura mostrada na Figura 17. O processo começa com a aquisição da imagem do olho. Para realçar e melhoria de contraste, a imagem é submetida a uma etapa de pré-processamento, que pode ser dispensada no caso das imagens terem sido adquiridas com qualidade adequada para o seu processamento. A segmentação da imagem do olho tem por objetivo obter a região da íris, através da localização de suas fronteiras interna e externa. O processo de normalização é usado para compensar as variações no tamanho do diâmetro da

pupila e na distância de captura, e poderia não ser necessário no caso de um ambiente controlado, como por exemplo, com iluminação uniforme e posicionamento para captura fixo. O conjunto de valores conhecido como a assinatura biométrica (representação) é obtido através do processo de extração de características. Na etapa de confronto é realizada a comparação entre as assinaturas das íris para gerar um valor de dissimilaridade, posteriormente usado no processo de decisão.

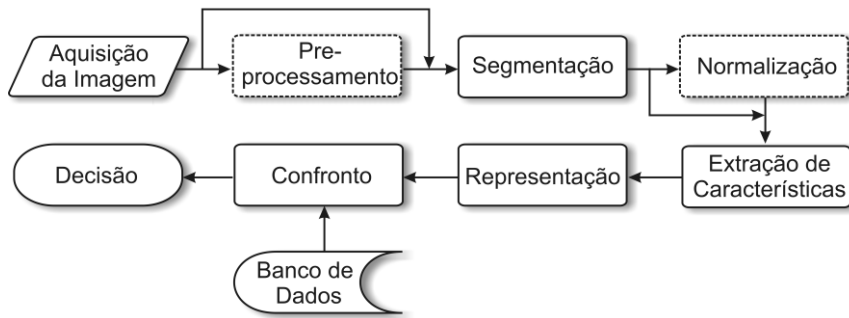


Figura 17: Diagrama apresentando as diversas etapas de um sistema de reconhecimento de íris típico.

4.2 MÉTODO DE REFERÊNCIA

Atualmente, a maioria dos sistemas de reconhecimento de íris comercialmente disponíveis utiliza os algoritmos desenvolvidos por DAUGMAN (1992). A partir da captura de uma imagem de um olho, os algoritmos inicialmente localizam as fronteiras da íris (pupila-íris e íris-esclera) para segmentá-la. Em seguida, aplicam uma transformação para mapear a região segmentada (íris) em um sistema de coordenadas polares adimensional. Depois, com a finalidade de gerar um código de íris binário para representar a sua textura são utilizados os sinais provenientes da saída de um filtro de Gabor bidimensional. Então, o código obtido a partir de uma imagem de íris pode ser comparado a outros códigos de íris para efeito de identificação. A Figura 18 mostra um diagrama do método proposto por Daugman.

Para representar a deformação na textura da íris devido à dilatação e contração da pupila, DAUGMAN (1992) em seu trabalho adota o modelo *rubber-sheet homogeneous*. Este modelo atribui a cada ponto na íris um par de coordenadas (r, θ) , onde r representa o raio e θ o ângulo. O raio varia numa faixa entre 0 e 1 , sendo que a coordenada radial 0 corresponde aos pontos localizados na fronteira interna (*pupilar*) e a coordenada radial 1 aos pontos localizados na fronteira externa (*límica*). O ângulo varia numa faixa entre 0 e 2π , Figura 19. O mapeamento das coordenadas cartesianas (x, y) de uma imagem $I(x, y)$ para coordenadas polares adimensionais (r, θ) pode ser representado pela seguinte expressão: $I(x(r, \theta), y(r, \theta)) \rightarrow I(r, \theta)$. Este mapeamento resulta em uma representação da íris normalizada em tamanho.

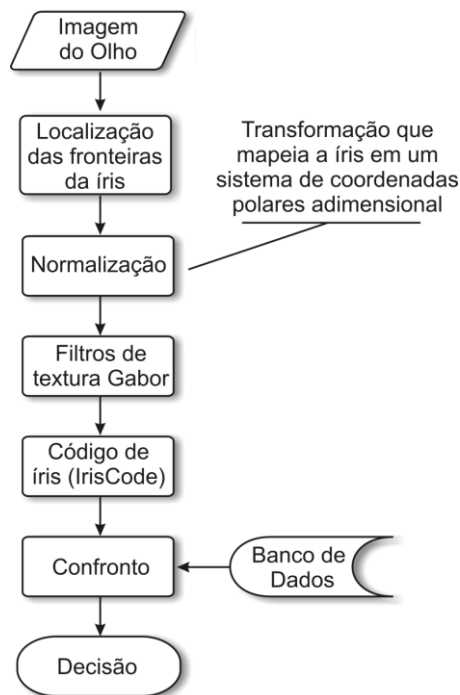


Figura 18: Diagrama do método proposto por Daugman.

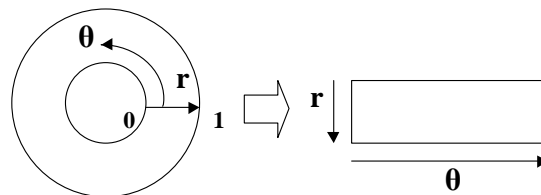


Figura 19: Mapeamento das coordenadas da íris para um sistema de coordenadas polares adimensionais.

A Figura 20(a) apresenta a imagem de uma íris e em (b) sua correspondente versão normalizada, em diferentes escalas.

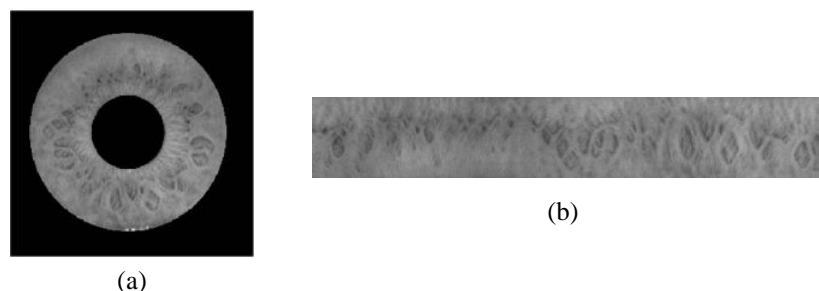


Figura 20: Normalização: (a) imagem da íris e (b) sua versão normalizada em outra escala.

Apesar de permitir a comparação de duas íris de tamanhos diferentes, as informações relativas ao grau de dilatação da pupila acabam sendo desconsideradas no processo de normalização. Além disso, a transformação decorrente desse processo admite que a deformação do tecido da íris, em virtude do movimento de dilatação da pupila, é linear na direção radial, fato este que não é inteiramente correto (WEI *et al.*, 2007).

4.3 MÉTODO PROPOSTO

A íris humana é composta por uma variedade de características que resultam em uma estrutura rica em detalhes. A idéia básica do método proposto é aplicar operadores morfológicos (SERRA, 1988; VINCENT, 1997; GONZALEZ & WOODS, 2001; SOILLE, 2003) para identificar e destacar padrões existentes na íris, obtendo estruturas de onde algumas características serão extraídas para formar uma representação.

A Figura 21 apresenta um diagrama do sistema de reconhecimento de íris utilizado neste trabalho, modificado a partir da proposta apresentada em MIRA & MAYER, 2003. Os operadores morfológicos são utilizados nas etapas de segmentação, processamento morfológico, remoção de pixels redundantes e extração de características.

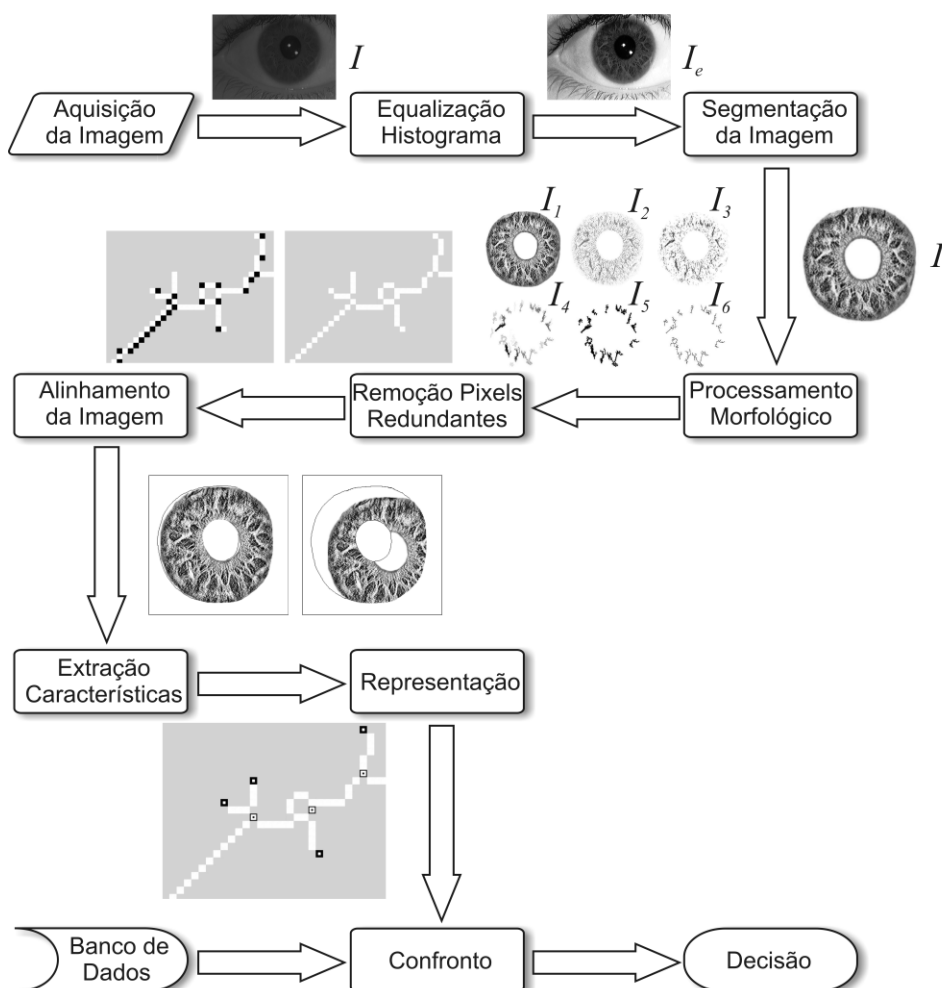


Figura 21: Diagrama do sistema de reconhecimento de íris proposto apresentando as diversas etapas do processamento.

As etapas de processamento apresentadas na Figura 21 estão relacionadas com aquelas genericamente apresentadas na Figura 17 e serão discutidas na sequência.

4.4 ALGORITMOS BASEADOS EM OPERADORES MORFOLÓGICOS

4.4.1 Segmentação

A primeira etapa do processamento consiste na determinação de uma ROI na imagem capturada. Para segmentar a ROI, que contém a íris que será analisada, a imagem do olho é adquirida em tons de cinza (resolução de 8 bits) e submetida a um pré-processamento para realce e melhoria do contraste através da equalização de histograma (GONZALEZ & WOODS, 2001). A extração desta região, que consiste em identificar as fronteiras interna e externa da íris, é feita através da aplicação de uma sequência de operadores descrita a seguir.

A fronteira interna da íris, que é delimitada pela pupila, pode ser obtida através da determinação da referida região. Para tal, primeiramente é tomado o complemento da imagem de entrada equalizada (I_e). A imagem complementada resultante (I_{ce}) é então binarizada usando um valor de limiar t_1 , próximo ao branco (255), porque depois do complemento a região da pupila tende a um tom claro, segundo a equação 15. Algumas pequenas estruturas e buracos remanescentes na imagem binária resultante (I_{Bi1}) são eliminados aplicando um operador *abertura por área* (*area opening*) (VINCENT, 1992) seguido de um operador *fechamento*.

$$I_{Bi1} = \begin{cases} 1 & \text{se } I_{ce}(x, y) \geq t_1 \\ 0 & \text{se } I_{ce}(x, y) < t_1 \end{cases} \quad (15)$$

O operador *abertura por área* (γ_λ^a) remove qualquer *componente conectado* com área menor que λ de uma imagem binária F (VINCENT, 1992;1997; SOILLE, 2003):

$$\gamma_\lambda^a(F) = \bigcup_{B \in A_\lambda} \gamma_B(F), \quad (16)$$

onde γ_B denota a *abertura* por um *elemento estruturante* B e A_λ a classe de subconjuntos de um conjunto compacto conectado, cujas áreas são maiores ou iguais a λ .

Com o propósito de remover pequenas estruturas ainda na região da pupila, o operador *abertura por área* definido na equação 16 é aplicado a imagem I_{Bi1} usando um *EE cruz* (B_C):

$$I_{Bi1}^1 = \gamma_{\lambda_1}^a(I_{Bi1}) = \bigcup_{B_C \in A_{\lambda_1}} \gamma_{B_C}(I_{Bi1}). \quad (17)$$

Para fechar buracos encontrados na região da pupila, a imagem binária resultante I_{Bi1}^1 é submetida ao operador *fechamento* (ϕ_B) usando um *EE caixa* (B_B):

$$I_{Bi1}^2 = \phi_{B_B}(I_{Bi1}^1) = \varepsilon_{B_B}[\delta_{B_B}(I_{Bi1}^1)], \quad (18)$$

onde ε_{B_B} e δ_{B_B} denotam respectivamente a *erosão* e a *dilatação* pelo *elemento estruturante* B_B (SERRA, 1988; SOILLE, 2003).

Para identificar a fronteira externa (íris/esclera), a imagem de entrada previamente complementada (I_{ce}) é novamente binarizada. Agora, para segmentar a região correspondente à íris e pupila é utilizado um valor de limiar mais baixo t_2 , considerando o fato de que os pixels da região da íris tendem a aparecer em tons médios de cinza. As lacunas e estruturas indesejáveis presentes na imagem resultante (I_{Bi2}) são descartadas aplicando um operador *fechamento* com um *EE caixa* – equação (19), seguido por uma *abertura por área* com um *EE cruz* – equação (20), respectivamente.

$$I_{Bi2}^1 = \phi_{B_B}(I_{Bi2}) = \varepsilon_{B_B}[\delta_{B_B}(I_{Bi2})] \quad (19)$$

$$I_{Bi2}^2 = \gamma_{\lambda_2}^a(I_{Bi2}^1) = \bigcup_{B_C \in A_{\lambda_2}} \gamma_{B_C}(I_{Bi2}^1) \quad (20)$$

A Figura 22 mostra o resultado do processo de segmentação descrito anteriormente, onde aparecem representadas as duas fronteiras da íris. Com a informação das fronteiras interna e externa da íris, os pixels da imagem que estão localizados fora da *ROI* podem ser descartados, resultando na imagem da íris segmentada I (Figura 23(a)).

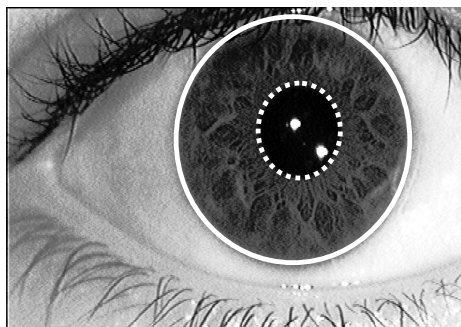


Figura 22: Segmentação da íris – a fronteira interna aparece identificada por uma linha branca pontilhada, enquanto a externa por uma linha branca contínua.

4.4.2 Morfologia Aplicada à Extração de Características

4.4.2.1 Extração de Características

A imagem da íris (*ROI*) obtida após as etapas de pré-processamento e segmentação é submetida a uma sequência de operadores morfológicos com o objetivo de identificar e realçar padrões significativos nela existentes, para serem usados nas futuras tarefas de reconhecimento e classificação. Foi realizado um estudo do comportamento de diversos operadores morfológicos quando aplicados aos padrões existentes na íris e suas estruturas, para determinar quais operadores seriam usados e a sequência em que deveriam ser aplicados.

Inicialmente, a imagem da íris segmentada I (Figura 23(a)) é submetida a um operador *reconstrução-por-fechamento top-hat* $\phi^{rec\ th}$ (VINCENT, 1993; SOILLE, 2003) com o objetivo de destacar as estruturas nela existentes. Este operador cria uma imagem de saída subtraindo a imagem original I de sua versão *reconstruída-por-fechamento* $\phi_{B_{dil}, B_{con}}^{rec}$. Esta imagem reconstruída é definida usando dois *elementos estruturantes*: um para *dilatação* (B_{dil}) e outro para *conectividade* (B_{con}) (VINCENT, 1993/1997; DOUGHERTY & LOTUFO, 2003). Neste caso um *EE caixa* foi usado para B_{dil} e um *EE cruz* para B_{con} :

$$I_1 = \phi^{rec\ th}(I) = \phi_{B_{dil}, B_{con}}^{rec}(I) - I \quad (21)$$

A Figura 23(b) mostra a imagem I_1 resultado da aplicação do operador $\phi^{rec\ th}$, onde se pode observar que as estruturas existentes na íris que possuem maior tamanho (área) começam a se destacar.

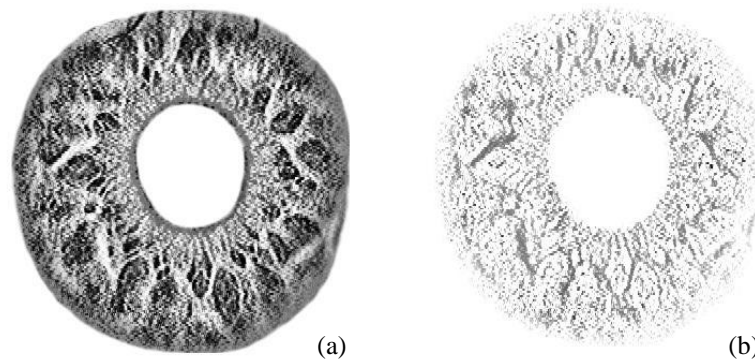


Figura 23: (a) íris sob análise I ; (b) imagem I_1 resultante da aplicação do operador *reconstrução-por-fechamento top-hat* – estruturas da íris aparecem em destaque.

A seguir, com o propósito de enfatizar os padrões mais relevantes na íris, ou seja, aqueles com maior tamanho e que começam a se tornar mais evidentes, a imagem I_1 ,

Figura 24(a), é submetida a um operador *abertura* γ_B usando um *EE cruz* (B_C):

$$I_2 = \gamma_{B_C}(I_1) = \delta_{B_C}[\varepsilon_{B_C}(I_1)]. \quad (22)$$

O resultado da aplicação deste operador é a imagem I_2 apresentada na Figura 24(b), onde os padrões que estavam se destacando (arranjos de pixels de maior tamanho) tornaram-se ainda mais evidentes.

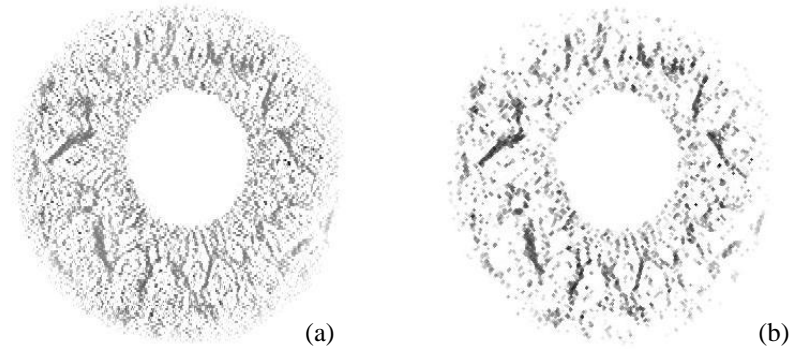


Figura 24: (a) imagem I_1 ; (b) imagem I_2 resultante da aplicação do operador *abertura* – padrões mais relevantes evidenciados.

Para remover pequenas estruturas que ainda permanecem na íris depois da aplicação do operador *abertura*, a imagem I_2 (Figura 25(a)) é submetida a um operador *abertura por área*. Como a imagem de entrada está em tons de cinza, a versão binária do operador *abertura por área* é aplicada sucessivamente nas camadas da imagem (VINCENT, 1993;1997; SOILLE, 2003), usando um *EE cruz*:

$$I_3 = \gamma_{\lambda_2}^a(I_2) = \bigcup_{B_C \in A_{\lambda_2}} \gamma_{B_C}(I_2) \quad (23)$$

A Figura 25(b) mostra a imagem resultante I_3 , onde se pode notar que as pequenas estruturas da íris foram removidas e que os padrões remanescentes aparecem em diferentes tons de cinza para representar as diferentes camadas que eles se encontram.

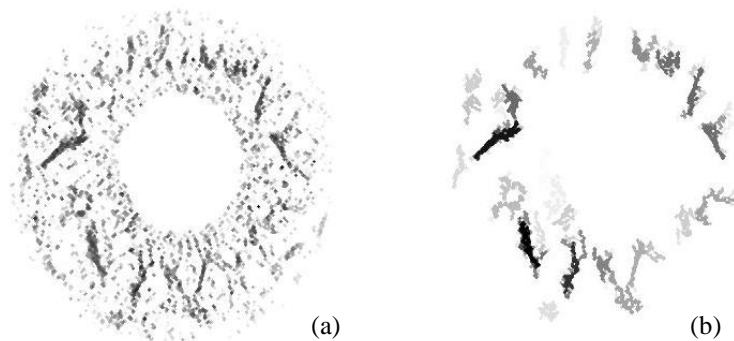


Figura 25: (a) imagem I_2 ; (b) imagem I_3 resultante da aplicação do operador *abertura por área* – pequenas estruturas removidas.

A imagem em tons de cinza I_3 (Figura 26(a)) é então submetida a uma *limiarização* para obter uma imagem binária I_4 (Figura 26(b)), onde aparecem apenas as estruturas mais relevantes. Uma vez que tais estruturas aparecem em tons de cinza escuro, um valor de limiar t_3 próximo ao preto (0) é utilizado para preservá-las.

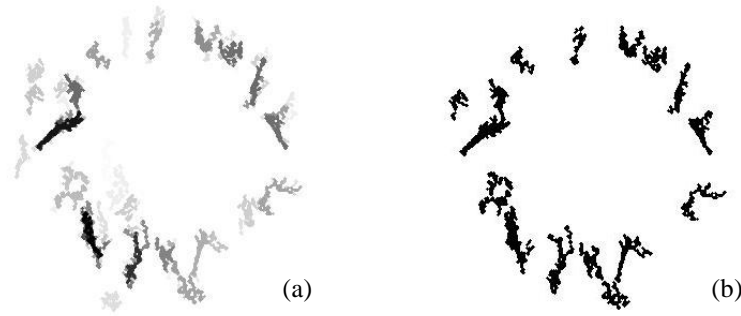


Figura 26: (a) imagem I_3 ; (b) imagem I_4 resultante da aplicação da *limiarização* – estruturas mais relevantes mantidas.

No entanto, as estruturas remanescentes após a *limiarização* ainda devem passar por um processo de *afinamento* (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) para se obter seus respectivos esqueletos, uma vez que estas estruturas apresentam-se como aglomerados de pixels. A operação de *afinamento* está relacionada à transformação *hit-or-miss* (*hmt*) (SERRA, 1988; SOILLE, 2003), expressa por:

$$hmt_B(F) = (\varepsilon_{B_1}(F)) \cap (\varepsilon_{B_2}(F^c)) \quad (24)$$

onde B_1 é o subconjunto de B associado ao objeto, B_2 é o subconjunto de B associado ao fundo e F^c é o complemento de F .

Na operação *afinamento* (*thin*), expressa na equação (25), cada iteração é realizada subtraindo os pontos que são detectados na imagem I_4 por oito operadores *hit-or-miss* rotacionados de 45° um do outro (GONZALEZ & WOODS, 2001).

$$I_5 = thin_B(I_4) = I_4 - hmt_B(I_4) \quad (25)$$

O resultado da aplicação do operador *afinamento* pode ser visto na Figura 27(b), onde a imagem resultante I_5 contém o esqueleto de cada estrutura relevante da íris.

O método proposto de identificação está baseado na comparação de informações essenciais dos esqueletos de estruturas remanescentes. São informações essenciais as coordenadas que identificam os pontos de terminação de uma parte da estrutura e os pontos que identificam ramificações de caminhos da estrutura. Entretanto, após o *afinamento* ainda

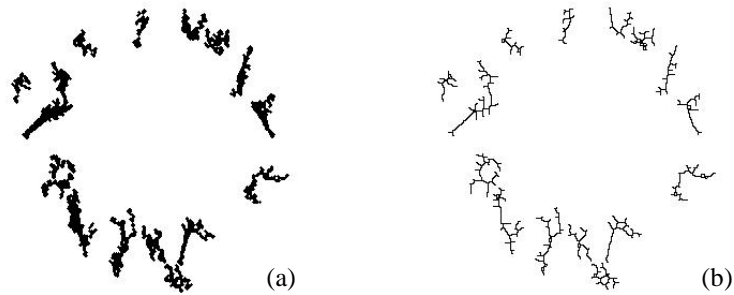


Figura 27: (a) imagem I_4 ; (b) imagem I_5 resultante da aplicação do operador *afinamento* – esqueletos das estruturas.

existem alguns *pixels redundantes* remanescentes nos esqueletos das estruturas, dificultando a tarefa de identificação das *terminações* (*end-points*) e dos pontos que identificam ramificações (*nós*), que são a base da representação adotada neste trabalho. A Figura 28 mostra no detalhe parte de um esqueleto de uma estrutura da íris, onde *pixels redundantes*, *terminações* e *nós* podem ser observados.

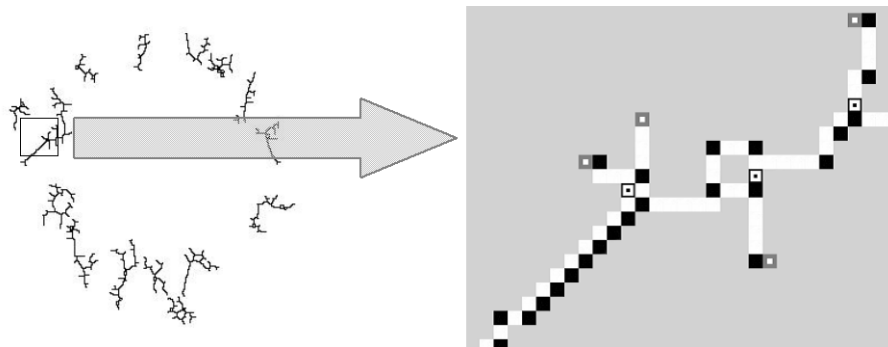


Figura 28: Detalhe do esqueleto de uma estrutura da íris: *pixels redundantes* (preto), *terminações* (*end-points*) (■) e *nós* (⊠).

4.4.2.2 Remoção de Pixels Redundantes

Um algoritmo foi desenvolvido para eliminar os *pixels redundantes* e evitar quebras (lacunas) na conexão dos pixels do esqueleto de uma estrutura. A princípio, o algoritmo se baseia no conceito de *caminhos* (*paths*), mais especificamente no de *caminho-único*, onde a conexão entre dois pixels adjacentes, s e p ou p e q , se estabelece através de um único caminho, como observado na Figura 29(a). Na Figura 29(b) pode-se observar que as conexões entre os pixels adjacentes são feitas através de múltiplos caminhos. Por exemplo, os pixels s e p estão conectados diretamente ou passando pelo pixel t , ou seja, através do caminho “ $s - t - p$ ”. O mesmo acontece para os pixels p e q , que estão conectados diretamente ou por um caminho que passa pelo pixel r , ou seja, através do caminho “ $p - r - q$ ”.

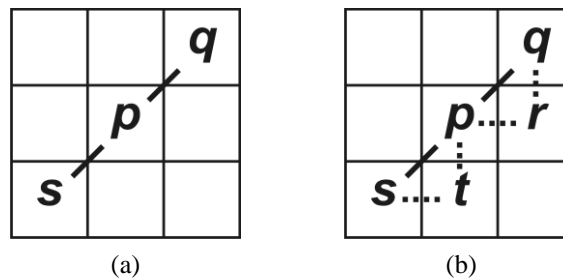


Figura 29: Conceito de caminhos (*paths*). (a) caminho-único: $s - p$ e $p - q$; (b) múltiplos caminhos: $s - p$ ou $s - t - p$ e $p - q$ ou $p - r - q$.

A eliminação dos *pixels redundantes* não deve causar nenhuma quebra de conexão na estrutura do padrão, ou seja, não deve remover a conectividade existente entre os elementos da estrutura original. Isto evita a geração de “estruturas-filhas” a partir da divisão de uma “estrutura-mãe” (original), fato este comum nos algoritmos morfológicos utilizados para *esqueletonização* (MARQUES & VIEIRA, 1999). Além disto, a remoção dos *pixels redundantes* deve preservar as *terminações* e os *nós*, por se tratarem das características utilizadas para compor a representação. A Figura 30(a) apresenta uma estrutura de um padrão, onde os *pixels redundantes* aparecem em preto. Em 30(b) o resultado da aplicação de um algoritmo morfológico de *esqueletonização* a esta estrutura, onde duas quebras de conexão podem ser observadas no interior das regiões circulares em destaque. O algoritmo desenvolvido faz uma verificação da vizinhança do pixel que está sendo analisado para garantir que as conexões existentes serão preservadas.

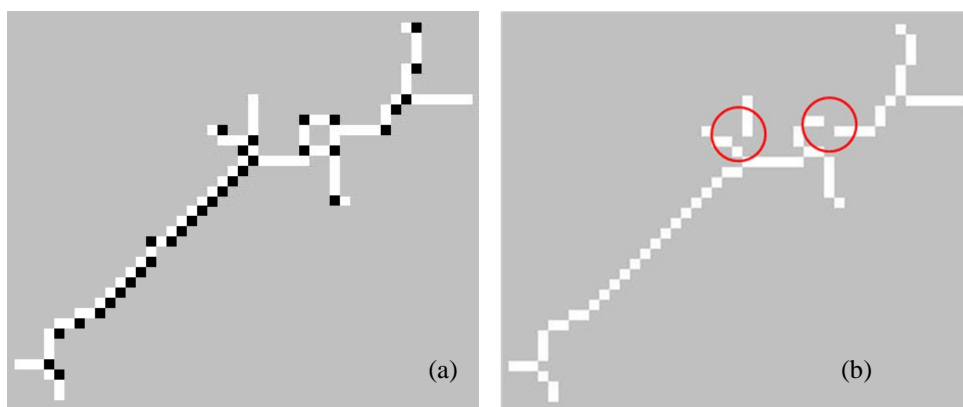


Figura 30: Resultado de um algoritmo morfológico de *esqueletonização*. (a) imagem de entrada contendo *pixels redundantes* na estrutura, (b) imagem de saída com lacunas indesejadas (destacadas com círculos) após a *esqueletonização*.

Em relação à disposição dos pixels na vizinhança do pixel p , a notação adotada e apresentada na Figura 31 para representá-los é a seguinte:

- N_i : pixel pertencente aos 4-vizinhos do pixel p ;
- D_i : pixel pertencente aos vizinhos diagonais do pixel p .

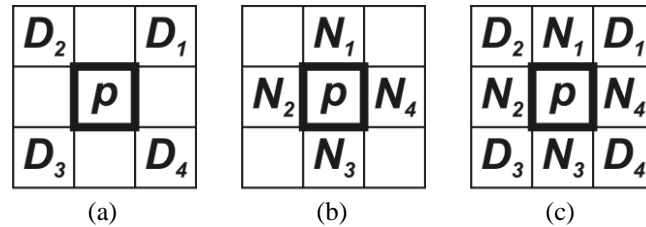


Figura 31: Vizinhança de um pixel p – notação: (a) vizinhos diagonais D_i , (b) 4-vizinhos N_i e (c) 8-vizinhos $D_i + N_i$.

Para eliminar os *pixels redundantes* dois tipos de *elementos estruturantes* 5x5 são utilizados: $EE-1$ e $EE-2$, apresentados na Figura 32(a) e (c), e suas respectivas versões rotacionadas de 90° no sentido horário $EE-1r$ e $EE-2r$, apresentadas na Figura 32(b) e (d).

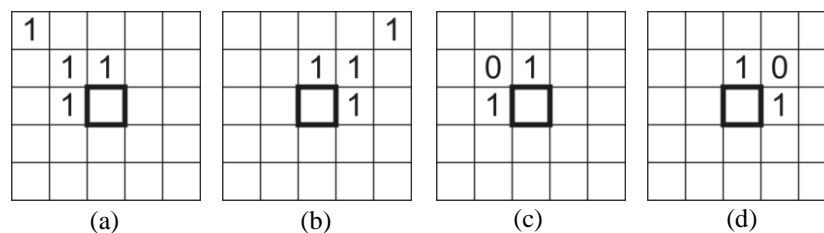


Figura 32: Elementos Estruturantes utilizados para eliminação dos *pixels redundantes*: (a) $EE-1$, (b) $EE-1r$, (c) $EE-2$ e (d) $EE-2r$. O pixel correspondente a origem de cada EE aparece em destaque.

O algoritmo desenvolvido para remoção dos *pixels redundantes* é baseado na operação *hit-or-miss*, que é calculada pela translação da origem (pixel central) do EE para cada posição de pixel possível na imagem e comparando-o com os pixels subjacentes da imagem em cada posição. Neste caso, quando existe uma coincidência entre os pixels do EE e os subjacentes da imagem, o pixel da imagem que se encontra sob a origem do EE é modificado - na Figura 32 esses pixels (origem do EE) aparecem em destaque.

O procedimento para eliminação dos *pixels redundantes* tem início com uma varredura na imagem à procura de pixels com valor igual a **1**. Quando um pixel (p) é encontrado nesta condição, começa a verificação dos pixels localizados na sua vizinhança. A sequência de verificação, que está relacionada aos EEs utilizados (máscara cinza nas Figuras 33 e 34), é a seguinte:

Passo 1 – a origem do $EE-1$ é posicionada sobre o pixel N_4 na imagem – Figura 33(a). Se os pixels do $EE-1$ coincidem com os pixels subjacentes da imagem, então o pixel N_4 recebe o valor **0** – Figura 33(b).

Passo 2 – o mesmo procedimento descrito no Passo 1 é executado substituindo *EE-1* por *EE-2*.

Passo 3 – a origem do *EE-1r* é posicionada sobre o pixel N_2 na imagem – Figura 34(a). Se os pixels do *EE-1r* coincidem com os pixels subjacentes da imagem, então o pixel N_2 recebe o valor **0** – Figura 34(b).

Passo 4 – o mesmo procedimento descrito no Passo 3 é executado substituindo *EE-1r* por *EE-2r*.

Passo 5 a 8 – a mesma sequência de verificação da vizinhança descrita nos Passos 1 a 4 é repetida, mas agora posicionando a origem dos *EEs* sobre o pixel N_3 . Em todos os casos (**Passo 5 a 8**), o pixel N_3 será modificado se houver uma coincidência.

Ao final da sequência de verificação da vizinhança (**Passos 1 a 8**), os pixels que tiveram seu valor substituído por **0** durante as etapas de processamento são finalmente alterados na imagem de saída e a varredura da imagem continua. Na Figura 33 e 34 o posicionamento dos *EEs* aparece em destaque (máscara cinza) e os pixels em negrito correspondem às posições onde os pixels do *EE* devem coincidir com os pixels subjacentes da imagem.

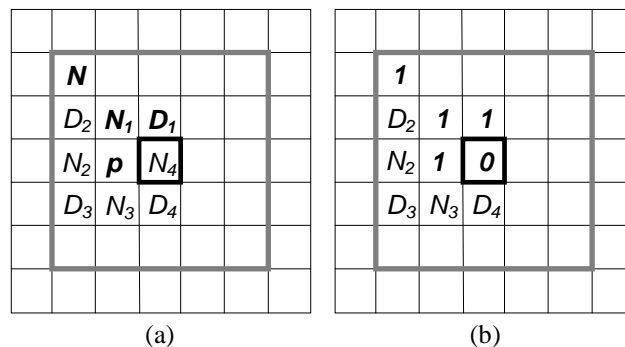


Figura 33: Sequência de verificação da vizinhança – Passo 1: (a) a origem do *EE-1* é posicionada sobre o N_4 ; (b) o pixel N_4 recebe **0** se os pixels do *EE-1* coincidem com os pixels subjacentes da imagem.

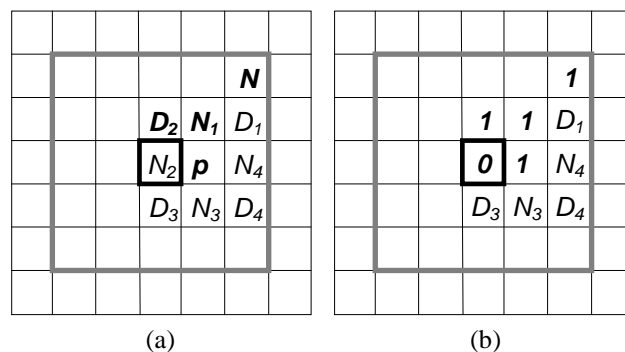


Figura 34: Sequência de verificação da vizinhança – Passo 3: (a) a origem do *EE-1r* é posicionada sobre N_2 e (b) o pixel N_2 recebe **0** se os pixels do *EE-1r* coincidem com os pixels subjacentes da imagem.

Após o processo de remoção dos *pixels redundantes*, é obtida uma imagem que está adequada para a extração de características. O resultado da aplicação do algoritmo pode ser visto na Figura 35, onde se pode observar que os *pixels redundantes* foram eliminados sem causar nenhuma quebra de conexão na estrutura, ao contrário do que é observado na Figura 30(b).



Figura 35: Resultado do algoritmo de eliminação de *pixels redundantes*. Nenhuma lacuna está presente no esqueleto da estrutura resultante – não há quebra de conexão.

4.5 ALINHAMENTO

Na imagem capturada do olho que está sob análise, a íris em geral apresenta-se desalinhada, se comparada à imagem da íris utilizada para extrair as características armazenadas no banco de dados. Isto se dá devido a diferenças no posicionamento do olho na etapa de aquisição da imagem, proveniente de movimentos de translação, rotação e escalamento. Para compensar este desalinhamento e ajustar a imagem da íris sob análise para a etapa de confronto (*matching*), a imagem binária I_4 contendo as estruturas relevantes (Figura 27(a)) é submetida a uma normalização. A compensação dos efeitos causados pelas transformações geométricas é feita através de um algoritmo baseado na *transformação de movimento afim* (*affine motion transform*) (STILLER & KONRAD, 1999; BOVIK, 2000). A escolha deste modelo bidimensional (2D) para representar o movimento aparente se baseia nas características dos movimentos de rotação, translação e escalamento que as imagens adquiridas estão sujeitas e por tratar-se de um modelo que atende aos requisitos necessários para descrever o movimento real de tais imagens.

Apesar das imagens adquiridas geralmente apresentarem um movimento global em relação à região de movimento, este efeito é causado pelos três tipos de movimento a que elas

estão sujeitas: translação (deslocamento lateral em qualquer direção no plano da imagem), rotação (em relação ao eixo óptico da câmera) e escalamento (variação da distância entre o olho e a câmera). A equação paramétrica utilizada para descrever o movimento é composta por seis parâmetros:

$$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \end{pmatrix}, \quad (26)$$

dos quais dois correspondem à translação (a_3 e b_3) e uma composição dos outros quatro à rotação (a_2 e b_1) e ao escalamento (dado por a_1 e b_2). O algoritmo que faz a compensação de movimento inicia a busca pelo movimento de translação. Uma vez encontrado o deslocamento translacional, o algoritmo passa para a procura dos movimentos de rotação e escalamento, que nesta etapa são estimados em conjunto. A associação destes dois movimentos é conhecida como *transformação de forma* e está relacionada a variações no formato das estruturas. O algoritmo se baseia na estimação dos parâmetros que melhor representam os efeitos causados pelos referidos movimentos.

O procedimento utilizado para o alinhamento toma como referência uma imagem contendo pseudo-estruturas. As pseudo-estruturas são geradas a partir da representação da íris armazenada no banco de dados, que contem a localização (coordenadas) das *terminações* (*end-points*) e dos *nós*, como mostrado na Figura 36(a). A imagem binária gerada a partir da informação armazenada no banco de dados é então submetida ao operador *dilatação*, que é aplicado duas vezes utilizando um *EE caixa*, para garantir a conectividade de cada pseudo-estrutura. A imagem binária resultante contendo as pseudo-estruturas, apresentada na Figura 36(b), será então utilizada pelo sistema de reconhecimento para o alinhamento da imagem I_4 da íris sob análise (Figura 27(a)). Em outras palavras, a partir da representação armazenada no banco de dados, são geradas imagens binárias que serão tomadas como referência para o alinhamento das correspondentes imagens submetidas ao processamento e que estão sob análise.

A comparação entre a imagem I_4 e a imagem contendo as pseudo-estruturas geradas a partir da representação armazenada no banco de dados permite a estimação do erro entre a posição original e a posição atual das estruturas (características), com base no erro absoluto mínimo ou diferença absoluta mínima (*MAD - Minimum Absolute Difference*) (BOVIK, 2000). Sendo assim, as imagens binárias contendo as estruturas relevantes (p.ex. I_4) podem ter suas estruturas alinhadas para o procedimento de comparação (*matching*).

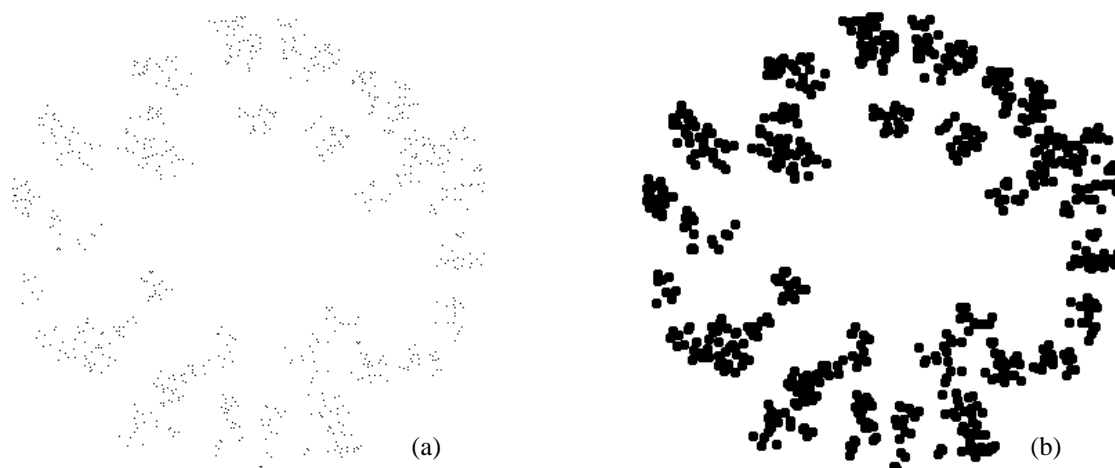


Figura 36: Reconstrução da imagem: (a) imagem de entrada contendo os pontos correspondentes às coordenadas das *terminações* (*end-points*) e dos *nós*, (b) imagem de saída contendo as pseudo-estruturas geradas a partir de duas dilatações da imagem (a).

4.6 REPRESENTAÇÃO DAS CARCTERÍSTICAS

Na abordagem utilizada neste trabalho, a representação está baseada na informação das *terminações* (*end-points*), que são os pontos localizados nas extremidades das estruturas, dos *nós*, que são os pontos de onde partem as ramificações e dos *ramos*, que são os caminhos que conectam os *nós* às correspondentes *terminações* ou a outros *nós*, os quais são exemplificadas na Figura 37. Depois de eliminar os pixels redundantes da imagem contendo os esqueletos das estruturas, a próxima etapa consiste em identificar as *terminações* e os *nós*.

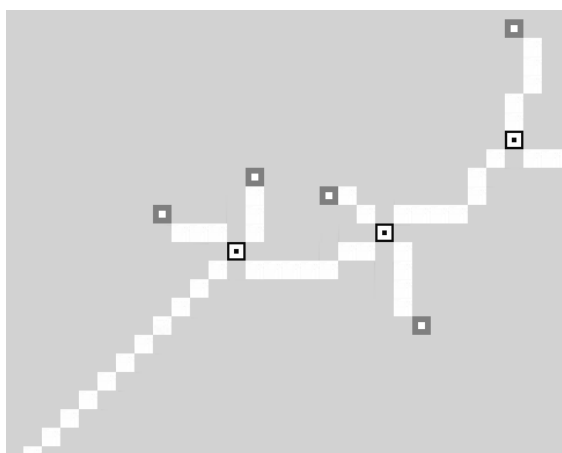


Figura 37: Representação adotada: *terminações* (*end-points*) (■) e *nós* (□).

O processo de identificação começa com a verificação dos 8-vizinhos de cada pixel p , $N_8(p)$, apresentado na Figura 31(c). Uma vez que uma *terminação* está localizada em uma das extremidades de um ramo, se apenas um dos 8-vizinhos do pixel p é igual a 1, então p é uma *terminação*. A Figura 38(a) apresenta exemplos de pixels identificados como *terminações* em uma estrutura.

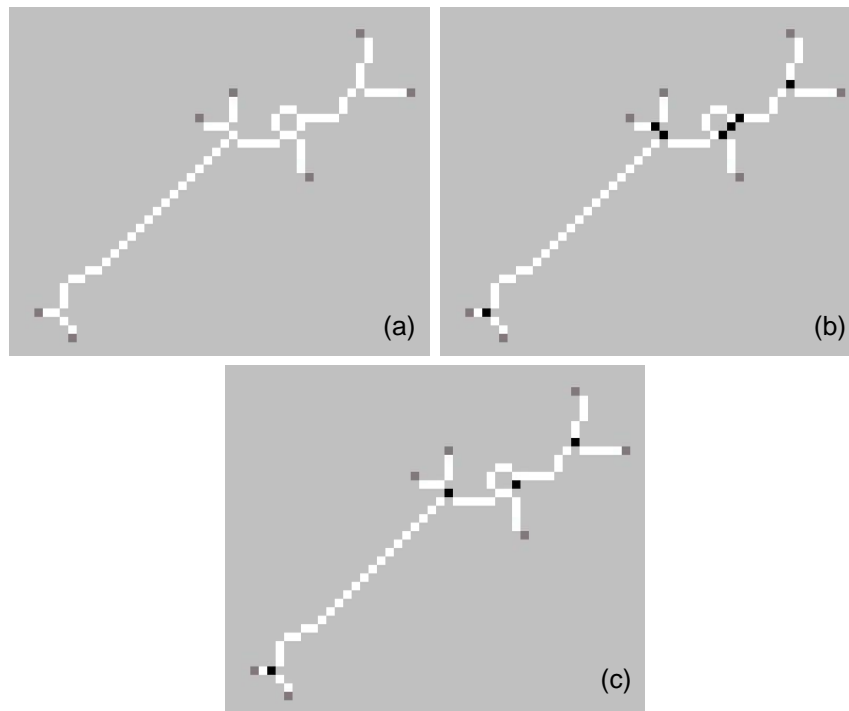


Figura 38: Exemplo de identificação das características: (a) identificação das *terminações* (cinza), (b) identificação dos *nós* (preto) e (c) identificação dos *nós* definitivos através da remoção dos *nós redundantes*.

No entanto, se três ou mais pixels nos 8-vizinhos de p são iguais a 1, então p é considerado um *nó*. Na Figura 38(b) podem ser observados exemplos de pixels identificados como *nós* em uma estrutura. Em alguns casos, é necessário eliminar *nós redundantes* que podem surgir devido à proximidade entre eles. O critério utilizado para eliminar os *nós redundantes* avalia a vizinhança de um determinado *nó*. Então, se dentro de uma distância de 3 pixels houver mais de um *nó*, o ponto médio entre os *nós* é calculado e suas coordenadas corresponderão a localização do *nó* definitivo. O resultado deste critério de remoção de *nós redundantes* é apresentado na Figura 38(c).

O vetor de características para representação da íris é composto pelas coordenadas das *terminações* e dos *nós*, bem como pelo respectivo *número de ramos*. Para obter o *número de ramos* para um determinado *nó*, sua ramificação deve ser avaliada com base nas *terminações* correspondentes. Para cada *nó* suas coordenadas e o *número de ramos* são concatenados para formar a característica correspondente.

Os vetores de características de referência, ou seja, aqueles armazenados no banco de dados foram gerados numa primeira abordagem a partir da representação proveniente de uma única amostra da imagem da íris de um determinado indivíduo. As estruturas mais relevantes, arranjos de pixels de maior tamanho, presentes nesta imagem foram utilizadas para gerar a representação e seu respectivo vetor de características. Os resultados obtidos com esta abordagem, apresentados posteriormente no capítulo 5, foram satisfatórios, permitindo uma boa classificação, mas ainda apresentavam uma margem para modificações nos algoritmos que resultem em melhora no desempenho.

Numa segunda abordagem, com o objetivo de aumentar a robustez da representação e conseqüentemente o desempenho do processo de classificação, os vetores de características de referência utilizados para o confronto (*matching*) passaram a ser gerados a partir de características mais consistentes da íris, neste caso os *nós* que aparecem com maior frequência, presentes em diferentes amostras de imagem da íris de um mesmo indivíduo. Desta forma, foram utilizadas cinco amostras diferentes da imagem da íris de cada indivíduo para gerar uma base com os respectivos vetores de características. Então, os cinco vetores de características contendo as coordenadas dos *nós* obtidos das amostras foram usados para gerar os vetores de características de referência para cada indivíduo.

Para gerar o referido vetor de características de referência, os cinco vetores de características da base são confrontados uns contra os outros, para comparar as coordenadas dos *nós* de cada um deles. Apenas os *nós* que estão presentes em pelo menos quatro dos cinco vetores de características da base são selecionados para compor o vetor de características de referência definitivo. Dessa forma, pretende-se selecionar apenas os *nós* que aparecem de forma mais consistente nas imagens. Neste processo, o mesmo critério de tolerância de três pixels utilizado anteriormente para remover os *nós* redundantes é usado para calcular uma média das coordenadas para os *nós* correspondentes. Esta segunda proposta de critérios de referência foi responsável por uma grande melhoria nos resultados do processo de classificação da íris, que serão apresentados no capítulo 5.

4.7 CLASSIFICAÇÃO E CONFRONTO (*MATCHING*)

Depois do mapeamento das coordenadas das *terminações* e dos *nós*, a comparação das características se baseia numa correspondência um para um. A fim de identificar os *nós coincidentes*, as coordenadas do vetor de características da íris sob análise são comparadas

com as do vetor de características de referência obtido a partir de uma ou de cinco amostras da imagem, tal como descrito anteriormente. Depois disto, a ramificação de cada *nó coincidente* é verificada para obter o correspondente *número de ramos por nó coincidente*. Neste caso é possível encontrar uma relação que permite estabelecer uma medida de dissimilaridade intraclasse e interclasses, com base na representação proposta.

Um *escore* (S) é utilizado como parâmetro base para o processo de classificação e assume valores compreendidos no intervalo $[0, 1]$. Existem diversas possibilidades para se calcular o *escore*, entre elas, a razão entre o *número de nós coincidentes* e a soma do *número de nós* da íris de referência e da sob análise ou a subtração entre eles, ou ainda o valor mínimo ou máximo entre eles. Todas elas foram avaliadas, sendo que a razão pela subtração mostrou ser inadequada devido à pequena variabilidade dos valores o que impossibilitava a classificação. Os valores de *escore* obtidos para os outros três casos apresentaram tendências semelhantes. Para a abordagem inicial, aquela cujo vetor de características era gerado a partir de uma única amostra de imagem da íris, foi adotada a razão pelo valor máximo, definido como:

$$S_1 = \frac{M}{\max(N_{ref}, N_{an})}, \quad (27)$$

onde M denota o *número de nós coincidentes*, N_{ref} o *número de nós* da íris de referência e N_{an} o *número de nós* da íris sob análise.

Uma expressão análoga é usada para computar o *escore* em relação ao *número de ramos*, substituindo apenas o *número de nós coincidentes* e os respectivos *número de nós* pelo *número de ramos por nó coincidente* (M_R) e o *número de ramos* correspondente a cada íris (R_{ref} e R_{an}), definido como a seguir:

$$S_2 = \frac{M_R}{\max(R_{ref}, R_{an})} \quad (28)$$

No caso da segunda abordagem, onde cinco amostras de imagem da íris foram usadas para gerar o vetor de características de referência, o *escore* é calculado pela equação:

$$S = \frac{M}{N_{cons}}, \quad (29)$$

onde N_{cons} denota o *número de nós consistentes* no vetor de características de referência.

A estratégia de classificação adotada está baseada em uma medida de dissimilaridade entre as classes (intra e interclasses), estabelecida a partir da representação proposta. Esta abordagem leva a um limiar de decisão ótimo T que minimiza a *taxa de erro igual* (*Equal Error Rate* - EER). Com base neste limiar de decisão ótimo um classificador discreto

(binário) pode ser estabelecido para identificar autênticos e impostores. O critério de decisão (D) utilizado pelo classificador é definido como a seguir:

$$D = \begin{cases} \textit{aut\^entico} , & \textit{se } S \geq T \\ \textit{impostor} , & \textit{se } S < T \end{cases} \quad (30)$$

4.8 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para realização dos experimentos foram utilizadas imagens do Banco de Dados de Imagens de Íris da Universidade de Bath (UBIID, 2007) e da base de dados do Instituto de Automação da Academia Chinesa de Ciências - *Chinese Academy of Sciences Institute of Automation* – CASIA (CASIA, 2010), além de imagens adquiridas para compor o Banco de Dados Brasileiro de Pesquisa de Íris - *Brazilian Iris Research Database* – BIRD, atualmente em desenvolvimento. As imagens que compõem estas três bases foram adquiridas em tons de cinza usando iluminação infravermelha. Então, para avaliar o método proposto de classificação da íris foi utilizada uma base de dados de teste que é composta por subconjuntos das referidas bases.

O subconjunto UBIID é formado por 1000 imagens com resolução de 1280x960, sendo 500 do olho direito e 500 do esquerdo, provenientes de 25 indivíduos (20 imagens de cada olho). As 500 imagens do subconjunto CASIA, 250 de cada olho, são provenientes de 25 indivíduos (10 imagens por olho). Estas imagens pertencem ao subconjunto CASIA-Iris V3-Interval, que originalmente possui 2655 imagens com resolução de 320x280 provenientes de 249 indivíduos. Como esta base não possui nenhum padrão de captura relacionado à quantidade de imagens existem classes compostas por diferentes números de imagens (p.ex.: 1, 2, 3, ..., 14), bem como imagens de um dos olhos (esquerdo ou direito). Devido a problemas enfrentados durante o processo de captura das imagens para construção do BIRD, os quais serão discutidos posteriormente no capítulo 5, o número indivíduos e consequentemente o de imagens acabaram sendo reduzidos. Dos 123 indivíduos que participaram do processo, 20 foram selecionados para compor o subconjunto utilizado nos experimentos, cada qual com 10 imagens de um dos olhos e com resolução de 1628x916. A Figura 39 mostra alguns exemplos de imagens dos referidos bancos de dados, onde em (a) são apresentadas imagens do UBIID, em (b) imagens da CASIA e em (c) imagens do BIRD.

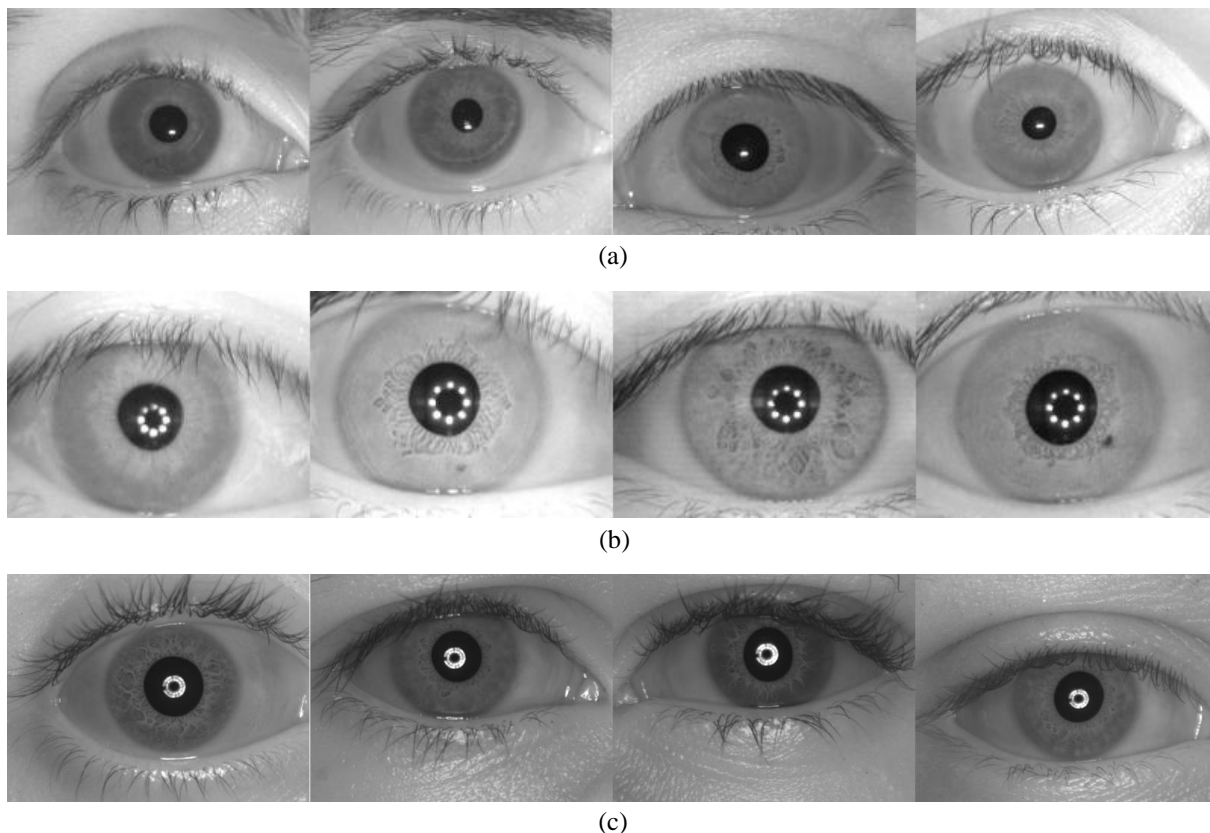


Figura 39: Exemplos de imagens dos bancos: (a) UBIID, (b) CASIA e (c) BIRD.

No presente trabalho, numa abordagem inicial foi utilizada uma única imagem de cada indivíduo para construir o vetor de características de referência para cada classe, posteriormente passando para 5 imagens numa segunda abordagem, como descrito na seção 4.6. Em ambos os casos, as demais imagens de cada indivíduo foram então utilizadas para testar o desempenho do esquema de classificação. As comparações entre os vetores de características de teste e de referência armazenado no banco de dados permitiram o cálculo das curvas de distribuição de escore intraclasse e interclasses, que por sua vez foram utilizadas para estimar a taxa de falsa rejeição (FRR) e a taxa de falsa aceitação (FAR) do classificador, bem como determinar um limiar de decisão ótimo para a separação das classes. Curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*) (MANSFIELD & WAYMAN, 2002) e suas respectivas análises estatísticas da área sob a curva - AUC (*area under the curve*) - também foram utilizadas para avaliação do desempenho.

Os vetores de características obtidos a partir das imagens da base de dados experimental foram submetidos a um processo de confronto (*matching*) para que as curvas de distribuição de escore intra e interclasses e as figuras de mérito pudessem ser computadas,

possibilitando assim realizar avaliações estatísticas do desempenho do método proposto, bem como sua comparação com outros métodos. Assim sendo, os experimentos foram realizados em duas etapas de confronto: intraclasse e interclasses, como ilustrado na Figura 40.

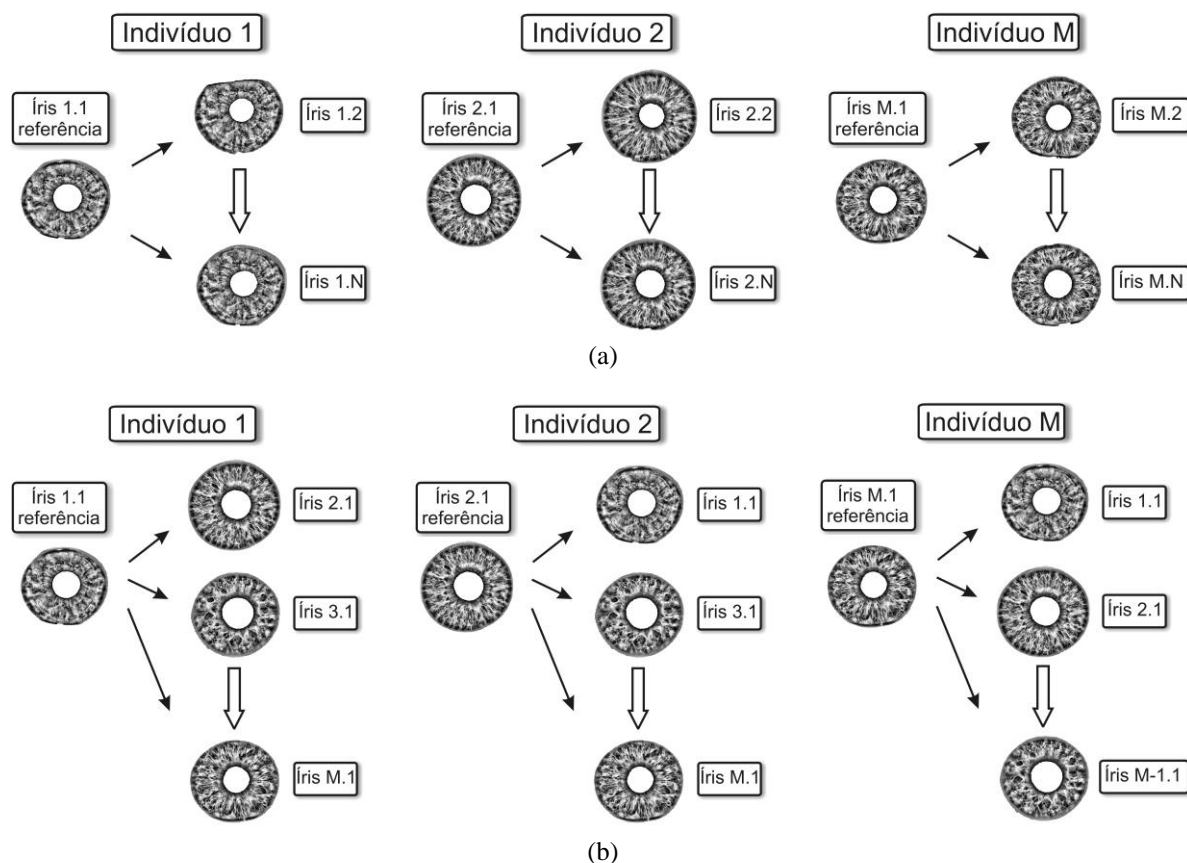


Figura 40: Avaliação estatística intraclasse e interclasses: (a) confronto intraclasse foi realizado entre amostras de íris do mesmo indivíduo, (b) confronto interclasses foi realizado entre amostras de íris de indivíduos diferentes.

Na etapa de confronto intraclasse o vetor de características de referência de cada indivíduo foi comparado contra os vetores de características de teste do mesmo indivíduo. Já na etapa de confronto interclasses, o vetor de características de referência de cada indivíduo foi comparado contra os vetores de características dos demais indivíduos.

Na Figura 41 pode-se observar o procedimento completo utilizado para realização dos experimentos. O bloco de processamento geral da íris corresponde aos passos de segmentação da região da íris (*ROI*), identificação e realce de padrões existentes na íris para obtenção das estruturas (processamento morfológico), remoção de pixels redundantes, alinhamento das imagens, extração de características e representação da íris processada.

Com a finalidade de ter uma referência para comparação dos resultados obtidos para o método proposto, também foi implementado o método proposto por Daugman de acordo

com o relatado em suas publicações (DAUGMAN, 1992; 1993; 2001; 2004), e os resultados obtidos foram utilizados para levantar as curvas das distribuições intra e interclasses e as respectivas curvas ROC, seguindo os procedimentos experimentais apresentados na Figura 40.

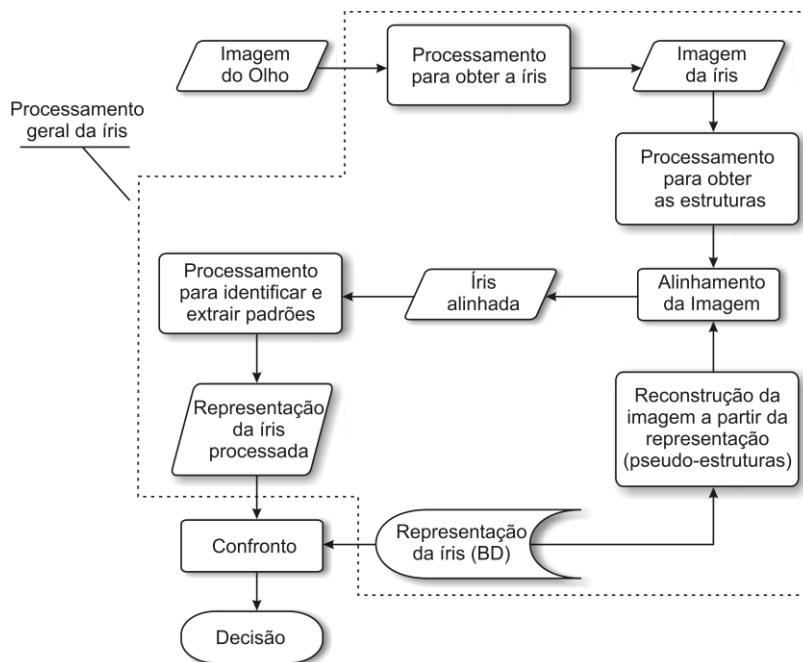


Figura 41: Diagrama dos passos do procedimento experimental.

Em função de alguns resultados obtidos durante a realização dos experimentos e de observações feitas no decorrer do desenvolvimento da pesquisa, outros dois testes foram realizados. Um para verificar a viabilidade de se introduzir uma etapa de pré-confronto (*pre-matching*) para interromper o processamento antes da etapa de alinhamento, uma vez que a mesma é responsável em média por 80% do tempo total de processamento (5 a 10 segundos)³. Os comentários referentes à etapa de pré-confronto, bem como os resultados obtidos na mesma, serão apresentados no próximo capítulo. O outro teste realizado foi para avaliar a influência da variação do diâmetro da pupila no desempenho de classificação do método proposto. A seguir serão discutidos e apresentados alguns aspectos relacionados ao assunto que envolve a variação do diâmetro da pupila.

³ O tempo total de processamento se refere aos algoritmos implementados no software *Matlab*, sendo executados em um microcomputador com processador AMD 64 X2 Dual-Core de 2GHz e 2MB de memória RAM.

4.8.1 VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DA PUPILA

Durante a realização dos experimentos pode-se observar que para algumas imagens de íris que estavam sendo processadas, o alinhamento foi mais crítico se analisado do ponto de vista de esforço computacional. Para tais imagens os valores da FRR foram maiores do que os obtidos para imagens onde o alinhamento transcorreu mais rapidamente. Uma análise destas imagens permitiu associar este comportamento àquelas imagens que apresentavam maiores variações no diâmetro das pupilas em relação à imagem de referência. Em outras palavras, tal fato ocorria quando a íris sob análise estava sendo confrontada com uma representação (armazenada no banco de dados) gerada a partir de uma íris cuja diferença existente entre os respectivos diâmetros das pupilas era maior.

Como visto no capítulo 3, o tecido da íris está sujeito a deformações devido a variações no diâmetro da pupila, causadas por movimentos involuntários de contração e dilatação. Tais movimentos estão associados a dois conjuntos de músculos, esfíncter e dilatador, que modificam o tamanho da íris para controlar a quantidade de luz que incide através da pupila (HOLLINGSWORTH, 2009a). Segundo Winn (WINN, 1994), são conhecidos diversos fatores que afetam o tamanho da pupila, entre eles: o nível de iluminância retinal (fluxo luminoso incidente na retina), o estado de acomodação dos olhos e diversas condições sensoriais e emocionais. A dinâmica que altera o tamanho da pupila também tende a mudar em função da idade.

Sob determinadas condições, os sistemas de reconhecimento de íris atuais podem atingir altos níveis de acertos, mas quando se deparam com imagens que sofreram considerável deformação devido a variações na iluminação, os mesmos enfrentam um desafio (WEI, 2007). O desenvolvimento de métodos mais robustos a variações de iluminação tornam-se uma necessidade, uma vez que na prática os requisitos de iluminação uniforme geralmente não podem ser assegurados.

Estudos apontam que variações no tamanho da íris afetam o desempenho dos métodos de reconhecimento. Ma (MA, 2004) caracterizou quanto do FNM (*False Non Match*) foi afetado devido à dilatação da pupila, sendo este um problema comum que ocorre com diversos métodos de reconhecimento de íris. Alguns métodos simplesmente ignoram tal problema, enquanto outros usam uma aproximação e consideram que a deformação da íris é linear na direção radial. Exemplos desses métodos são aqueles baseados no *modelo rubber sheet* proposto por Daugman (DAUGMAN, 1993). Segundo Wyatt (WYATT, 2000), o tecido da íris não segue um modelo *rubber sheet* perfeito para dilatação e contração, que pode ser

visto apenas como uma boa aproximação. Então, as mudanças na iluminação que causam variações no diâmetro da pupila, fazem com que a textura da íris passe por uma deformação não-linear. O processo de normalização tem a finalidade de reduzir os efeitos causados pela deformação da íris, no entanto, a maioria dos sistemas de reconhecimento existentes utiliza o algoritmo de normalização linear proposto por Daugman (DAUGMAN, 1993) para realizar tal tarefa.

Outro estudo abordando algumas condições médicas (cirurgia de catarata e dilatação da pupila) e seus efeitos no reconhecimento de íris foi apresentado por Rakshit e Monro (RAKSHIT & MONRO, 2007). Nesse estudo foram relatados alguns resultados iniciais envolvendo olhos recém operados de catarata e olhos com pupilas dilatadas através da administração de colírio midriático. Apesar do aumento da reflexão especular na pupila, devido às lentes artificiais implantadas na cirurgia, nenhuma mudança estrutural visível na íris foi observada e a sua segmentação pode ser realizada com sucesso. Os resultados obtidos não sugerem degradação no desempenho para os pacientes analisados, pois a identificação foi concluída para todos eles, indicando que o procedimento cirúrgico tem pouco ou nenhum efeito sobre um sistema de reconhecimento baseado em íris. No entanto, Monro ressalta a necessidade de se estender o estudo para mais pacientes. Em relação à dilatação da pupila, o uso de substâncias dilatadoras provoca mudanças substanciais na pupila e nas estruturas da íris. Deformações significativas e não-elásticas da pupila foram observadas na maioria dos casos, tornando inadequados os métodos convencionais de localização (baseados em círculos) para modelar seu contorno atual. Os resultados questionam a suposição da deformação elástica da íris e sugerem o desenvolvimento de modelos mais realistas para descrever o comportamento de suas estruturas sob efeito da dilatação.

De acordo com Wyatt (WYATT, 2000), o diâmetro da íris pode variar entre 1,5 e 7 mm. Quando a pupila se encontra muito dilatada as estruturas da íris tendem a ser comprimidas e o anel delimitado pela fronteira externa (*límbica*) torna-se menor. Quando comparadas às íris que apresentam pupilas mais contraídas, que fazem com que as estruturas se distribuam numa região maior, as muito dilatadas apresentam desempenho pior. O efeito causado nas distribuições quando um confronto de imagens com pupilas muito dilatadas é realizado, é que a média da *distância de Hamming* (HD) da distribuição intraclasse aumenta e sua largura pode ser ampliada, aproximando-a da distribuição interclasses e consequentemente aumentando a taxa de falsa rejeição. Até quando se trata de imagens de íris de um mesmo indivíduo, grandes diferenças no diâmetro da pupila levam a um alto grau de dissimilaridades e também aumentam a probabilidade de falsa rejeição (HOLLINGSWORTH,

2009a). A Figura 42 apresenta um gráfico de distribuições, onde a distribuição intraclasse representa o histograma das HDs para comparações de códigos entre imagens de uma mesma íris, ou seja, pertencentes a um mesmo indivíduo, e a distribuição interclasses representa as distâncias para comparações nas quais os códigos são gerados a partir de imagens de íris de indivíduos diferentes.

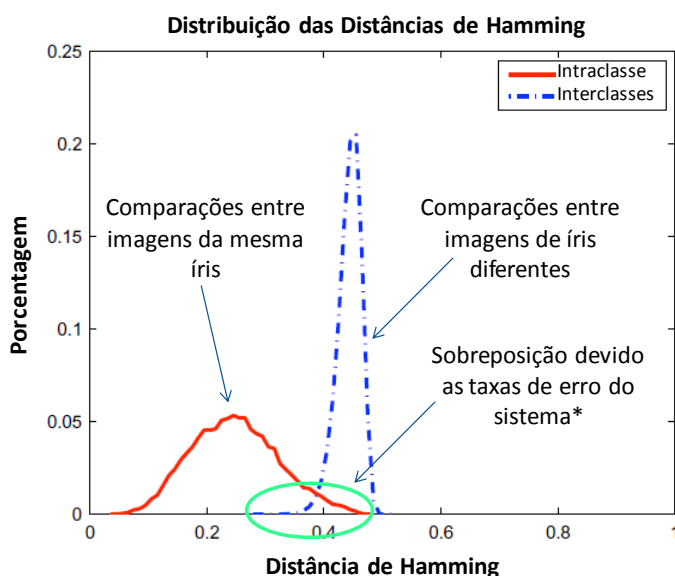


Figura 42: Gráfico das distribuições intraclasse e interclasses – curvas de similaridade. * em sistemas comerciais: ajuste de limiar para um nível especificado (p.ex.: 1 em 1 milhão).

Um exemplo do que ocorre em imagens da íris de um mesmo indivíduo, adquiridas com diferentes tamanhos da pupila e submetidas à normalização linear pode ser observado na Figura 43. Em (a) e (c) são apresentadas as duas imagens da mesma íris com tamanhos da pupila diferentes. Em (c) e (d) pode-se observar as respectivas versões normalizadas e em destaque uma mesma região em cada uma delas, onde podem ser vistas as diferenças encontradas em função da variação do diâmetro da pupila. Outro aspecto importante que pode ser visto nas versões normalizadas se refere à oclusão dos cílios e pálpebra (superior), que na versão com a pupila mais dilatada apresenta uma interferência consideravelmente maior que na outra.

Para evitar que as informações sobre a dilatação da pupila sejam descartadas, uma alternativa seria a inclusão de informações referentes ao grau de dilatação ou medida da pupila (p.ex. raio da pupila / raio da íris) como metadado no código gerado a partir da íris. Além disso, um fator, como por exemplo, a dilatação absoluta entre duas imagens ou a diferença da dilatação entre elas, poderia ser utilizado como medida do grau de confiança para uma comparação entre íris.

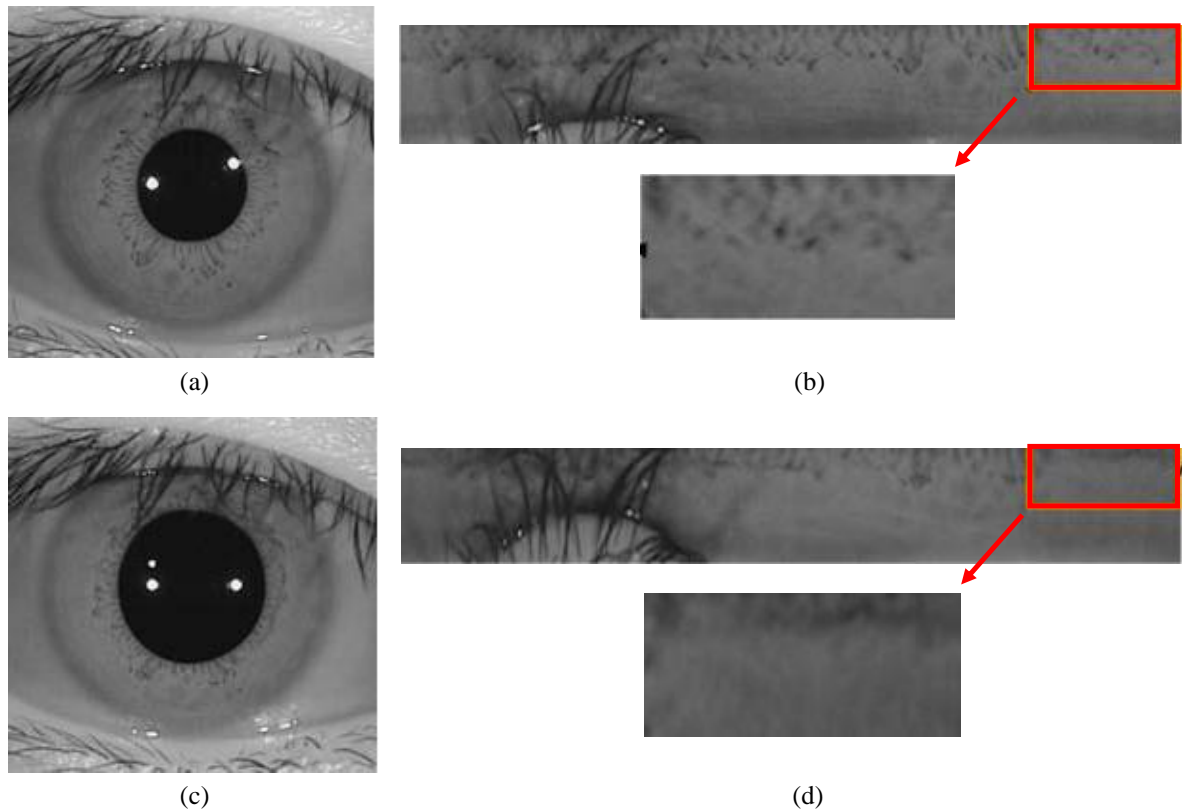


Figura 43: Exemplo de íris com pupilas de tamanho diferentes: (a) pupila com tamanho normal, (b) versão normaliza da íris apresentada em (a), (c) pupila dilatada e (d) versão normaliza da íris apresentada em (c). Em destaque as diferenças encontradas nas respectivas regiões devido a variações no tamanho da pupila [Fonte: adaptado de (WEI, 2007)].

Pode-se concluir então, que as deformações causadas na estrutura da íris devido a variações no tamanho da pupila, devem afetar os resultados dos confrontos e consequentemente o desempenho dos sistemas de reconhecimento de íris. Com o intuito de avaliar o desempenho de classificação do método proposto em função das variações no diâmetro da pupila, foram definidas algumas medidas que serão apresentadas a seguir.

Para estabelecer um parâmetro que fornecesse uma medida relativa do tamanho da pupila, ou seja, da sua dilatação, sem sofrer influência da escala, foi utilizada uma relação entre os diâmetros da íris e da pupila. Esta relação denominada de *dilatação relativa da pupila* (DR_p) é definida como:

$$DR_p = \frac{d_p}{d_i}, \quad (31)$$

onde d_p e d_i são respectivamente o diâmetro da pupila e o diâmetro da íris.

No entanto, para avaliar o desempenho de classificação para diferentes valores de DR_p , foi necessário utilizar outra medida que fornecesse a diferença absoluta entre o

tamanho relativo de duas pupilas. Esta medida foi denominada de *diferença absoluta entre dilatações relativas de pupilas* (ΔDR_p) e é definida por:

$$\Delta DR_p = |DR_{p1} - DR_{p2}|, \quad (32)$$

onde DR_{p1} e DR_{p2} representam a *dilatação relativa* das pupilas em questão. Para cada confronto entre duas íris, ou seja, entre seus respectivos vetores de características, a ΔDR_p deve ser calculada.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados da análise do desempenho do método proposto em função da variação do diâmetro da pupila, assim como alguns comentários a cerca dos mesmos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante a realização dos experimentos utilizando a base de dados de teste, bem como análises e discussões acerca dos mesmos, com base nas métricas utilizadas para avaliação estatística (curvas de distribuição, curvas ROC e figuras de mérito). A análise da introdução de uma etapa de pré-confronto, a avaliação da influência de variações do diâmetro da pupila no desempenho de classificação, assim como considerações acerca do banco de imagens BIRD, também são apresentadas neste capítulo.

A fim de avaliar o desempenho da abordagem proposta para classificação da íris foram computadas as curvas de distribuição do escore de confronto intra e interclasses e as curvas ROC para os *nós coincidentes*. Resultados análogos foram obtidos para o *número de ramos por nó coincidente*. Como mencionado anteriormente, o método de reconhecimento de íris proposto por Daugman também foi implementado e utilizado como referência para comparações de desempenho, com base nas curvas de distribuição da distância de Hamming intra e interclasses e nas correspondentes curvas ROC.

5.1 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE SIMILARIDADES

As curvas de distribuição representam graficamente os histogramas de dissimilaridades entre as classes. A Figura 44 apresenta as curvas de distribuição intraclasse e interclasses obtidas para o método proposto e para o método de Daugman, para o subconjunto UBIID. No caso do método proposto as curvas foram obtidas utilizando a segunda abordagem

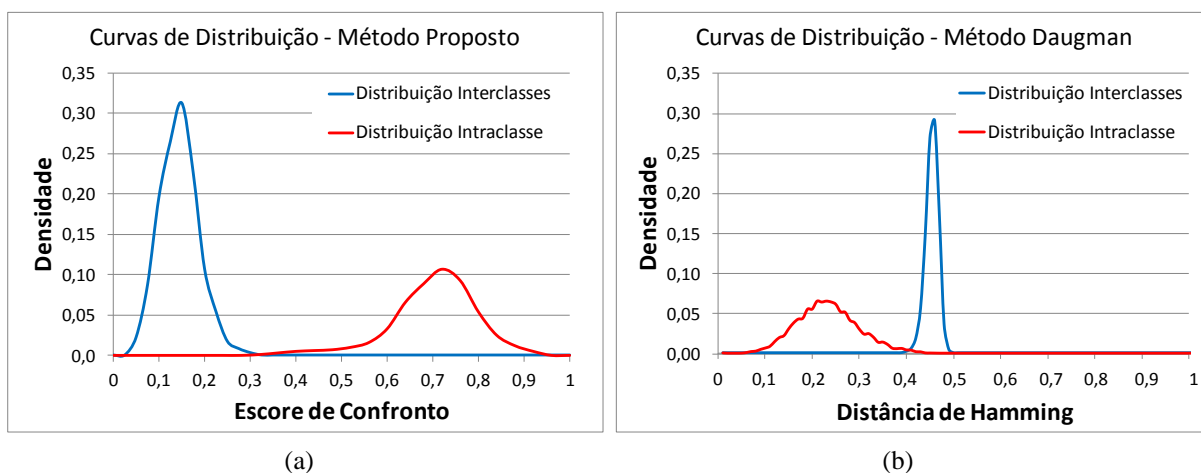


Figura 44: Distribuições intraclasse e interclasses: (a) escore de confronto – método proposto, (b) distância de Hamming normalizada – método de referência.

(*nós* mais consistentes) para gerar os vetores de características, conforme na seção 4.6. Pode-se observar a partir das curvas desta figura que existe uma clara separabilidade entre as distribuições intra e interclasses para ambos os métodos. As curvas de distribuição do método proposto aparecem mais espalhadas ao longo do eixo das similaridades, Figura 44(a), fato este que favorece a separação das classes, contribuindo para taxas de erro menores. Na Figura 44(b) as curvas de distribuição para as distâncias de Hamming utilizadas no método de Daugman encontram-se mais concentradas em um intervalo reduzido do eixo de dissimilaridades.

5.2 CURVAS ROC

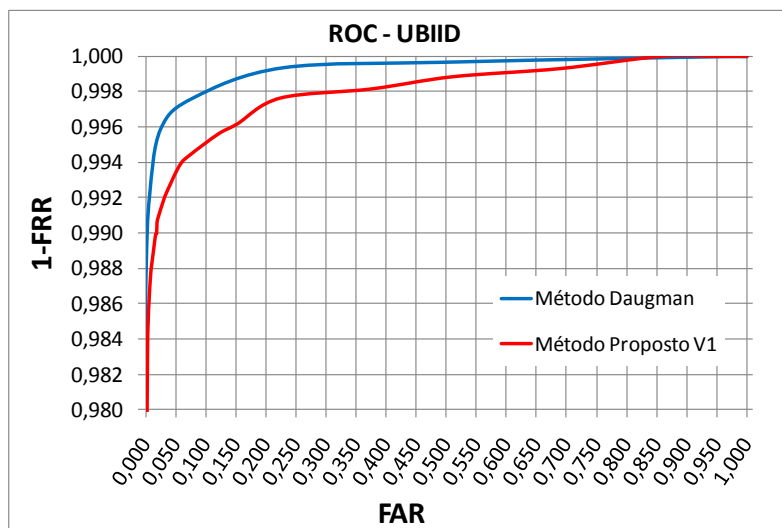
A curva ROC representa graficamente a taxa de falsa rejeição (FRR) como uma função da taxa de falsa aceitação (FAR) para diferentes valores de limiar (MANSFIELD & WAYMAN, 2002) – a FAR indica a probabilidade de aceitar um impostor e a FRR de rejeitar um indivíduo genuíno (autêntico) – obtido a partir de comparações intra e interclasses para cada amostra no banco de dados.

Além das curvas ROC, a taxa de erro igual (*Equal Error Rate* – EER) também foi utilizada para avaliar o desempenho e comparar o método proposto com o método de Daugman. A EER é uma importante figura de mérito para sistemas biométricos e representa o ponto onde a FAR e a FRR são iguais, correspondendo assim a taxas de erro de classificação iguais. Outra medida padrão utilizada para comparação dos dois métodos foi a área sob a curva (*Area Under the Curve* - AUC). A AUC, a qual é comumente empregada como uma medida de síntese de acurácia da classificação, foi utilizada para avaliar o desempenho global de ambos os métodos.

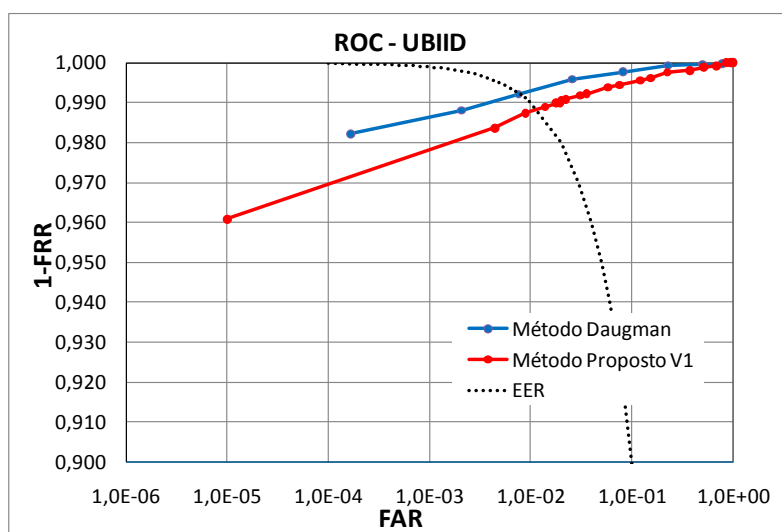
5.2.1 Curvas ROC – Abordagem Inicial (V1)

No presente trabalho, a representação adotada para caracterizar os padrões existentes na íris mostrou ser adequada, possibilitando a partir dela distinguí-los quando confrontados. Nos experimentos realizados foram utilizadas duas abordagens diferentes para construção dos vetores de características. Como descrito na seção 4.6, na abordagem inicial o vetor de características de referência para cada classe foi gerado a partir de uma única amostra de imagem da íris de cada indivíduo.

Os resultados obtidos na abordagem inicial podem ser observados através da Figura 45, que apresenta as curvas ROC em escalas linear e logarítmica para ambos os métodos, proposto e Daugman, utilizando imagens do UBIID. Na Figura 45(b) além das curvas ROC é apresentada a linha da EER, onde no gráfico a escala da FAR foi alterada para logarítmica para melhor visualização dos valores no início das curvas, ou seja, valores da FAR de pequena magnitude. Como os valores da FAR são frequentemente expressos em potências de 10, em porcentagens ou em proporções, como por exemplo, $1,0 \times 10^{-3}$, 0,001% ou 1:1000 - que neste caso expressam a existência de uma falsa aceitação para cada mil confrontos, a utilização da escala logarítmica para representar esta taxa também facilita a identificação gráfica de determinados pontos de operação do sistema.



(a)



(b)

Figura 45: Curvas ROC do método proposto (vermelho) e de Daugman (azul). (a) curvas em escala linear, (b) curvas em escala logarítmica e linha da EER (pontilhada). O método proposto apresenta desempenho inferior ao método de referência.

Pode-se observar na Figura 45, que apesar de satisfatórios do ponto de vista de classificação, os resultados obtidos para o método proposto apresentaram um desempenho inferior quando comparados aos do método de Daugman (referência). A Tabela 5 lista três estados de operação típicos, em função da FAR, para sistemas de reconhecimento biométrico e seus correspondentes valores para a FRR obtidos das curvas ROC da Figura 45, bem como os valores da EER para ambos os métodos. O método de referência apresenta um desempenho melhor que o método proposto para os três estados de operação considerados.

Tabela 5: Estados de operação típicos da FAR e as FRR correspondentes, valores da EER para ambos os métodos – Abordagem inicial.

FAR	FRR (Daugman)	FRR (Proposto)
0,1%	0,20%	0,48%
0,01%	0,70%	1,23%
0,001%	1,36%	2,19%
EER	0,79%	1,18%

5.2.2 Curvas ROC – Segunda Abordagem (V2)

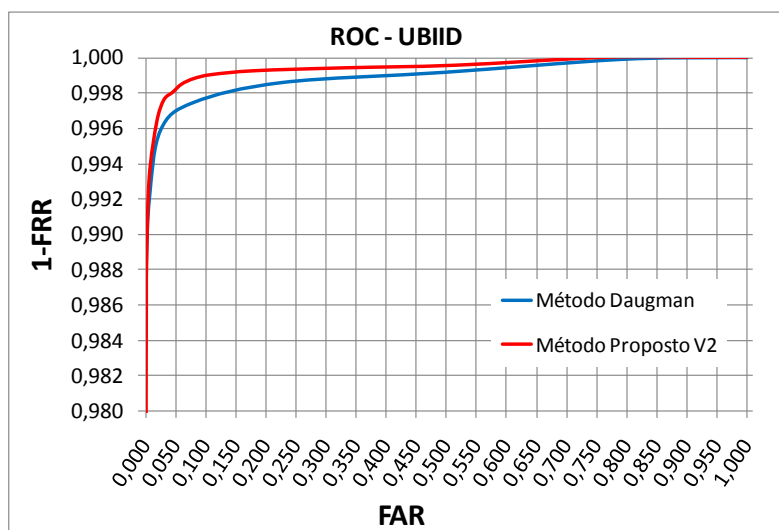
Visando melhorar o desempenho do processo de classificação, bem como aumentar a robustez da representação, numa segunda abordagem os vetores de características de referência para cada classe passaram a ser gerados a partir de cinco amostras diferentes da imagem da íris de cada indivíduo, utilizando características mais consistentes encontradas nas diferentes amostras, conforme descrito na seção 4.6.

Para realização dos experimentos nesta segunda abordagem, foram utilizadas as imagens dos subconjuntos UBIID, CASIA e BIRD, apresentados anteriormente na seção 4.8.

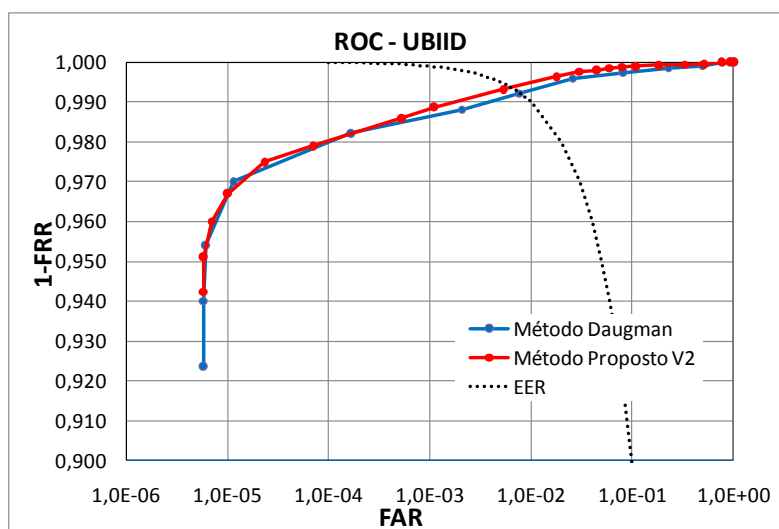
5.2.2.1 Curvas ROC – UBIID

A Figura 46 apresenta as curvas ROC para ambos os métodos utilizando imagens do UBIID. A curva ROC do método proposto, obtida a partir dos resultados referentes à segunda abordagem, mostra uma melhora no desempenho de classificação do mesmo, tanto se comparado à abordagem inicial (Figura 45), quanto se comparado ao método de Daugman (Figura 46). Em relação ao método de referência, as curvas mostram que o desempenho

apresentado pelo método proposto é superior e está relacionado com a obtenção de um erro de classificação menor, quando dois vetores de características são comparados.



(a)



(b)

Figura 46: Curvas ROC do método de Daugman (azul) e do método proposto (vermelho) para a segunda abordagem utilizando o UBIID. (a) curvas em escala linear, (b) curvas em escala logarítmica e linha da EER (pontilhada). O método proposto apresenta desempenho superior ao do método de referência.

A Tabela 6 resume o desempenho de ambos os métodos, apresentando alguns estados de operação típicos obtidos das curvas ROC da Figura 46, valores da EER, além dos respectivos valores da AUC. O método proposto supera o desempenho do método de referência para todos os quatro estados de operação considerados. Para a referida base, o método proposto apresenta um percentual de erro 0,13% menor que o do método de referência, no ponto de EER. As medidas da AUC apresentadas na Tabela 6 confirmam o melhor desempenho global para o método proposto (Figura 46), indicando assim a viabilidade

da utilização da abordagem baseada em morfologia matemática para o reconhecimento da íris em sistemas biométricos.

Tabela 6: Estados de operação típicos da FAR e as FRR correspondentes, valores da EER e da AUC para ambos os métodos – Segunda abordagem - UBIID.

FAR	FRR (Daugman)	FRR (Proposto)
0,1%	0,23%	0,11%
0,01%	0,71%	0,52%
0,001%	1,36%	1,16%
0,0001%	2,02%	1,97%
EER	0,78%	0,65%
AUC	0,99921	0,99941

Existem ainda duas taxas, provenientes das curvas de similaridades cumulativas, que podem ser utilizadas para comparar o desempenho em função dos valores percentuais dos erros máximos de classificação. Uma representa a máxima taxa de falsa aceitação (FAR) de impostores quando não se admite nenhuma falsa rejeição ($FRR=0$), ou seja, $FAR_{FRR=0}$. A outra, $FRR_{FAR=0}$, representa a máxima taxa de falsa rejeição (FRR) de autênticos quando não se admite falsa aceitação ($FAR=0$). A Tabela 7 apresenta os valores percentuais da $FAR_{FRR=0}$, $FRR_{FAR=0}$ e taxa de acerto ($1-EER$), obtidos para ambos os métodos. Uma análise mostra que os valores obtidos para o método proposto são menores que os do método de referência, em decorrência do espalhamento existente entre as curvas de distribuição intra e interclasses no eixo de similaridades ser maior para o método proposto se comparadas às do método de referência – Figura 44.

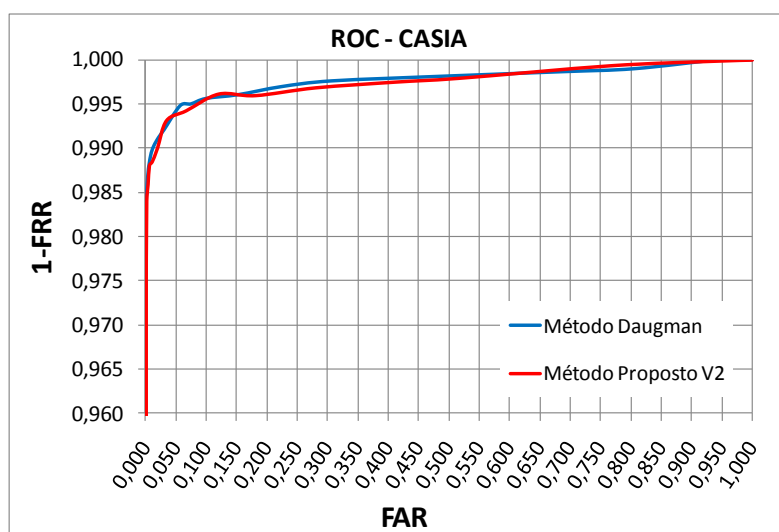
Tabela 7: Comparativo de desempenho do método proposto e de referência em função das taxas de erro.

Método	$FAR_{FRR=0}$	$FRR_{FAR=0}$	Acerto
Daugman	96,15%	14,80%	99,22%
Proposto	76,95%	3,35%	99,35%

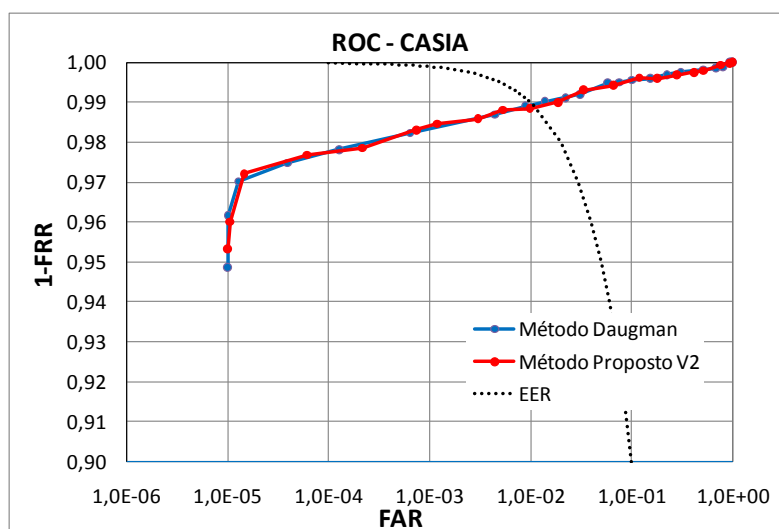
Em termos de percentual de acerto, a utilização da segunda abordagem (V2) para imagens do UBIID, se comparada à abordagem inicial (V1) cuja taxa de acerto foi de 98,82%, houve uma evolução de 44,9% em relação à margem restante para se atingir 100% de acerto. Já se considerada em relação ao método de referência, a evolução do método proposto foi de 16,7% na referida margem.

5.2.2.2 Curvas ROC – CASIA

O desempenho dos dois métodos também foi avaliado utilizando imagens do subconjunto CASIA. Na Figura 47 são apresentadas as curvas ROC para ambos os métodos, sendo que a curva referente ao método proposto foi obtida utilizando a segunda abordagem. Do ponto de vista de classificação, as curvas indicam que o desempenho para ambos os métodos é similar.



(a)



(b)

Figura 47: Curvas ROC do método de Daugman (azul) e do método proposto (vermelho) para a segunda abordagem utilizando o CASIA. (a) curvas em escala linear, (b) curvas em escala logarítmica e linha da EER (pontilhada). O método proposto e o de referência apresentam desempenho similar.

Tal fato pode ser verificado através de uma análise comparativa do desempenho entre os métodos, a partir dos resultados apresentados na Tabela 8, cujos valores da EER, AUC e de estados de operação típicos foram obtidos a partir das curvas ROC da Figura 47. Os valores obtidos para os quatro estados de operação avaliados confirmam que o desempenho é semelhante para os dois métodos, se igualando quando a FAR é de 0,1% e 0,0001%, com o método de referência superando o proposto para a FAR de 0,01% e sendo superado pelo mesmo para FAR de 0,001%. Para a base em questão, no ponto de EER o método proposto apresenta um percentual de erro 0,07% maior que o do método de referência. Com uma diferença de $0,9 \times 10^{-4}$, os valores da AUC também mostram que o desempenho global para ambos os métodos é similar, sendo o desempenho do método de referência um pouco melhor que o do método proposto.

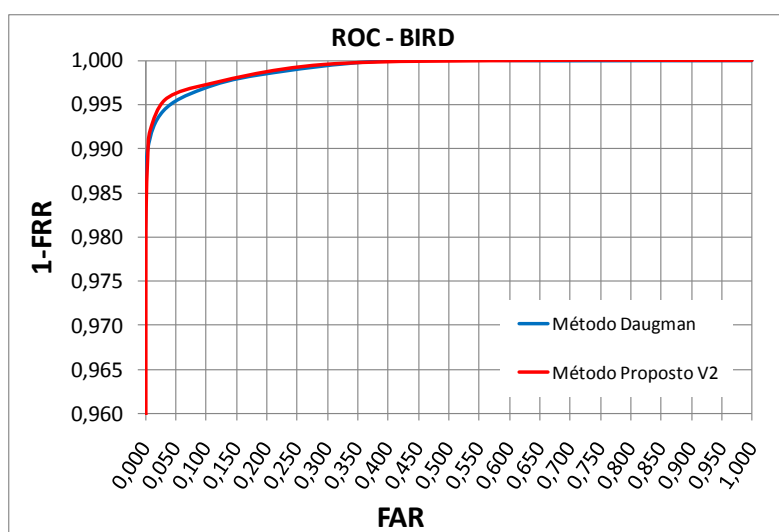
Uma das hipóteses que justificam tal desempenho está associada à diferença na resolução das imagens da CASIA (320x280) se comparadas às do UBIID (1280x960). Como os algoritmos foram originalmente desenvolvidos para trabalhar com imagens em resoluções maiores, os mesmos tiveram que ser adaptados para processar imagens com resoluções menores, como neste caso, as da CASIA. Alguns parâmetros dos algoritmos foram alterados segundo uma regra de proporcionalidade que leva em conta a diferença de tamanho (resolução) entre as imagens do UBIID e da CASIA. Deve-se observar que a resolução utilizada na base UBIID (i.e., 1280x960) não representa atualmente nenhum desafio tecnológico e tanto sensores quanto a capacidade de processamento disponível tendem a aumentar mesmo com diminuição de custos.

Tabela 8: Estados de operação típicos da FAR e as FRR correspondentes, valores da EER e da AUC para ambos os métodos – Segunda abordagem - CASIA.

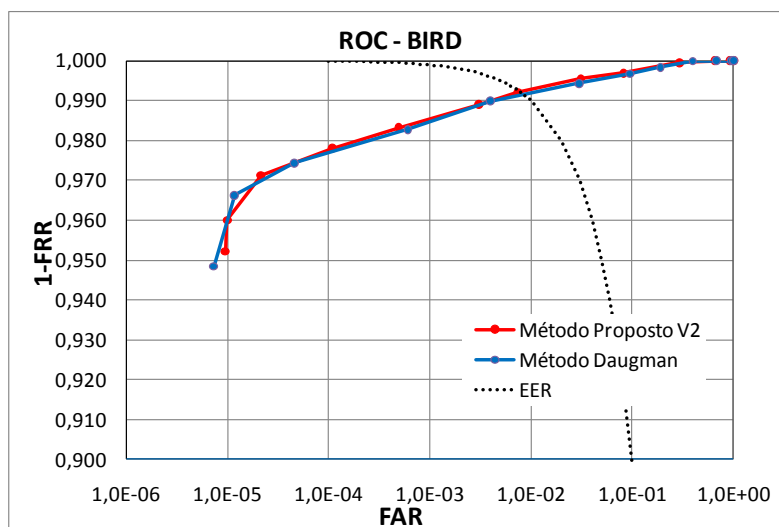
FAR	FRR (Daugman)	FRR (Proposto)
0,1%	0,44%	0,44%
0,01%	1,06%	1,15%
0,001%	1,66%	1,59%
0,0001%	2,25%	2,25%
EER	1,05%	1,12%
AUC	0,99766	0,99757

5.2.2.3 Curvas ROC – BIRD

Outra base utilizada para avaliação de desempenho foi a BIRD. A segunda abordagem foi usada para processar as imagens do subconjunto BIRD e levantar a curva ROC correspondente para o método proposto. A Figura 48 apresenta as curvas ROC para ambos os métodos, onde se pode observar que o desempenho de classificação do método proposto é superior ao do método de referência.



(a)



(b)

Figura 48: Curvas ROC do método de Daugman (azul) e do método proposto (vermelho) para a segunda abordagem utilizando o BIRD. (a) curvas em escala linear, (b) curvas em escala logarítmica e linha da EER (pontilhada). O método proposto apresenta desempenho superior ao do método de referência.

A Tabela 9 apresenta um comparativo do desempenho dos dois métodos para quatro estados de operação típicos, EER e AUC, cujos valores foram obtidos a partir das curvas ROC

da Figura 48. Para os quatro estados de operação analisados o desempenho do método proposto supera o do método de referência. Para as imagens do subconjunto BIRD o método proposto também apresenta um percentual de erro 0,14% menor que o do método de referência, no ponto de EER. Os valores da AUC mostram que o desempenho global do método proposto é um pouco superior ao do método de referência.

Tabela 9: Estados de operação típicos da FAR e as FRR correspondentes, valores da EER e da AUC para ambos os métodos – Segunda abordagem - BIRD.

FAR	FRR (Daugman)	FRR (Proposto)
0,1%	0,31%	0,26%
0,01%	0,81%	0,72%
0,001%	1,53%	1,45%
0,0001%	2,31%	2,23%
EER	0,92%	0,78%
AUC	0,99905	0,99912

5.3 PRÉ-CONFRONTO

Durante o desenvolvimento da pesquisa, pode-se constatar que o algoritmo que faz a compensação de movimento para o alinhamento das estruturas da íris, submetidas posteriormente ao processo de confronto de similaridades (*matching*), é responsável em média por 80% do tempo gasto em todo processamento, ou seja, de 4 a 8 segundos. Como o referido algoritmo é o que mais penaliza o custo computacional envolvido em todo processo, a redução do tempo gasto neste estágio teria um impacto direto no tempo total de processamento.

Uma das possibilidades seria introduzir uma etapa de pré-confronto (*pre-matching*), na qual o processamento poderia ser interrompido antes da etapa de alinhamento. Com isto, todo o tempo que seria gasto para a realização da compensação de movimento e nas etapas de classificação e confronto poderia ser poupado. Para interromper o processamento seria necessário utilizar algum parâmetro que permitisse uma rápida comparação para uma tomada de decisão e que pudesse ser disponibilizado sem a necessidade de se realizar o alinhamento.

O parâmetro escolhido com tais características foi o *número total de nós*, que está disponível no vetor de características de referência e também pode ser levantado para a íris sob análise.

No caso dos confrontos interclasses, onde na maior parte dos casos o alinhamento é mais crítico do ponto de vista de esforço computacional, ou seja, é mais demorado se comparado aos confrontos intraclasse, o processamento poderia ser abortado precocemente, apresentando ganhos expressivos em termos de redução de tempo computacional.

Para verificar a viabilidade de uso do *número total de nós*, foram realizados testes com as imagens do UBIID. O procedimento consiste na comparação direta do *número total de nós de referência* (N_{Ref}), obtido pela média do *número total de nós* das 5 amostras de imagens da íris que compõem a base para geração do vetor de características de referência, com o *número total de nós* obtido para a imagem da íris sob análise (N_{ISO}). O critério utilizado para tomada de decisão de interromper ou não o processamento, consiste em verificar se o *número total de nós* da íris sob análise está dentro de uma faixa de valores definida a partir do *número total de nós de referência* mais ou menos uma tolerância (ΔN), ou seja, $N_{Ref} \pm \Delta N$. Se o *número total de nós* estiver dentro desta faixa o processamento prossegue, caso contrário, será interrompido.

A tolerância foi determinada através dos testes, onde se constatou que quanto maior a margem de tolerância, maior a probabilidade do valor do *número total de nós* de um determinado indivíduo cair na faixa de outro indivíduo diferente. Tal fato acabaria prejudicando o objetivo da inclusão da etapa de pré-confronto, que é a redução do tempo total de processamento, uma vez que um confronto interclasses, onde o processamento deveria ser interrompido, passaria a ser encarado como intraclasse e o processamento seguiria até sua etapa final (decisão).

De acordo com os testes realizados, o valor selecionado para a tolerância foi de $\pm 5\%$, pois os resultados obtidos apresentaram a melhor relação entre o valor da margem de tolerância e a probabilidade dos valores do *número total de nós* caírem na faixa de outros indivíduos, sem penalizar os confrontos interclasses. Para este valor de tolerância, em 100% dos casos para os confrontos intraclasse, os valores do *número total de nós* caíram dentro das faixas ($N_{Ref} \pm \Delta N$) das suas respectivas classes. Para os confrontos interclasses, foram analisadas três possibilidades para a faixa das imagens testadas: a) a probabilidade dela não coincidir com a faixa de qualquer outra imagem; b) a probabilidade dela coincidir, mesmo que parcialmente, com a faixa de outra imagem; c) a probabilidade dela coincidir, mesmo que parcialmente, com a faixa de outras duas imagens. Estas três condições estão diretamente relacionadas com a eficiência da etapa de pré-confronto, pois a sobreposição dos intervalos

das faixas implica em tratar um confronto interclasses como um intraclasse. A Tabela 10 apresenta uma síntese dos resultados obtidos para uma margem de tolerância de $\pm 5\%$.

Tabela 10: Probabilidades de sobreposição das faixas para uma tolerância de $\pm 5\%$.

nº de imagens	Probabilidade	
	coincidir c/ 1 faixa	coincidir c/ 2 faixas
142 (28,4%)	0%	0%
289 (57,8%)	13%	0%
69 (13,8%)	-	19%

Com a introdução da etapa de pré-confronto pode-se obter uma redução da ordem de 70% no tempo total de processamento, se comparado ao tempo gasto sem a introdução da mesma. Se considerado o pior caso, onde em média o tempo gasto para o processamento completo é de 10 segundos, a etapa de pré-confronto proporciona uma redução de 7 segundos, abaixando o tempo total de processamento para cerca de 3 segundos.

Outros parâmetros ou informações (p.ex.: cor), disponíveis sem a necessidade de se realizar o alinhamento, poderiam ser considerados e analisados em conjunto na etapa de pré-confronto com o intuito de aumentar a eficiência da mesma. Tais informações poderiam ser disponibilizadas como metadados junto aos vetores de características das imagens das íris.

Nos casos onde o processamento deveria ter sido interrompido e não foi, a análise de outro parâmetro pode ser considerada para evitar que o processamento continue. Como visto anteriormente na seção 4.5, o alinhamento é feito através da estimação do erro entre a posição original e a posição atual das estruturas, com base na diferença absoluta mínima (*MAD*). No algoritmo que faz a compensação de movimento a cada iteração é feito um refinamento para encontrar a posição na qual o erro é minimizado e as correspondentes variações no posicionamento que levaram a ele, para na sequência estimar o erro para a referida posição. No caso dos confrontos intraclasse as variações obtidas a cada iteração levam a correções no posicionamento que o fazem convergir rapidamente para um ponto de estabilidade. Já no caso dos confrontos interclasses, as iterações são mais demoradas uma vez que as variações no posicionamento geralmente não levam a uma posição onde o erro é mínimo, acarretando em uma estimativa de erro com valores maiores. Devido este comportamento, a tendência de evolução do erro poderia ser monitorada e utilizada para interromper o processamento na etapa de alinhamento, antes que a mesma fosse concluída. Com isto o tempo total de processamento seria reduzido, apesar do processamento não ter sido abortado antes do início do alinhamento.

Para verificar a eficiência deste procedimento de interrupção, foram selecionadas imagens do UBIID onde o processamento não foi abortado em decorrência da análise do parâmetro utilizado na etapa de pré-confronto e outras onde tal condição foi forçada artificialmente, perfazendo um total de 50 imagens. O acompanhamento da evolução do erro foi implementado através da verificação do parâmetro ΔE , cujo valor corresponde ao erro estimado a cada iteração. Após três iterações o valor do ΔE é comparado ao valor inicial do erro para verificar seu comportamento. Um acréscimo no valor do ΔE é um indício de que se trata de um confronto interclasses e o processamento é interrompido, caso contrário o processamento continua até a etapa final. Em 90% das imagens analisadas o procedimento de interrupção abortou o processamento antes do término da etapa de alinhamento, mostrando desta forma que sua utilização é viável e contribui para atingir o objetivo de redução do tempo de processamento. Através da análise dos resultados obtidos, estima-se que a redução seja em média de 50% no tempo total de processamento, podendo chegar a 60% em alguns casos.

5.4 VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DA PUPILA X DESEMPENHO

Para analisar o desempenho do método proposto quando as representações eram provenientes de íris com diferentes diâmetros da pupila, foram levantadas as curvas ROC para diferentes valores de ΔDR_p , a partir das imagens do UBIID. Para tanto, foram definidas algumas faixas de valores de ΔDR_p , procurando garantir um número mínimo de confrontos por faixa. A Figura 49 apresenta as curvas ROC para as respectivas faixas de valores de ΔDR_p , onde se pode observar a influência da variação do diâmetro da pupila no desempenho de classificação do método proposto. Uma análise das curvas mostra que para um confronto entre dois vetores de características, quanto menor o valor da *diferença absoluta entre dilatações relativas de pupilas*, menor será o erro de classificação obtido. Então, o desempenho de classificação para diferentes valores de ΔDR_p depende das deformações causadas no tecido da íris, quando são feitas comparações de imagens com diferentes tamanhos de pupila para uma mesma íris.

Uma alternativa para minimizar os efeitos causados pela variação do diâmetro da pupila seria a realização de um estudo para analisar e modelar as deformações do tecido da íris. Um modelo baseado na deformação das estruturas poderia ser utilizado para compensar o

movimento e corrigir as distorções na forma causadas pelas mudanças no tamanho da íris, em função da diferença entre o diâmetro da pupila da imagem que está sendo processada e o da imagem de referência, utilizada para gerar o vetor de características armazenado no banco de dados. Neste contexto, a informação da DR_p também poderia ser usada como um parâmetro de referência, para auxiliar na etapa de alinhamento. Sendo assim, durante a realização da compensação de movimento o valor da DR_p seria considerado para limitar as correções nas distorções de forma. Outra possibilidade inclui o armazenamento de diversos vetores de características gerados a partir de íris com diferentes diâmetros de pupila, onde um deles seria selecionado para realização de um determinado confronto, de acordo com um critério de menor valor de ΔDR_p em relação ao que está sob análise. Tais assuntos devem ser objeto de estudos futuros, onde se pretende dispor de uma base de dados cujas imagens tenham sido capturadas com a inclusão do monitoramento da variação do diâmetro da pupila, fornecendo assim dados para a realização de estudos sobre a dinâmica da deformação dos tecidos da íris e seus efeitos nas diversas etapas do processamento, bem como no desempenho dos sistemas de reconhecimento.

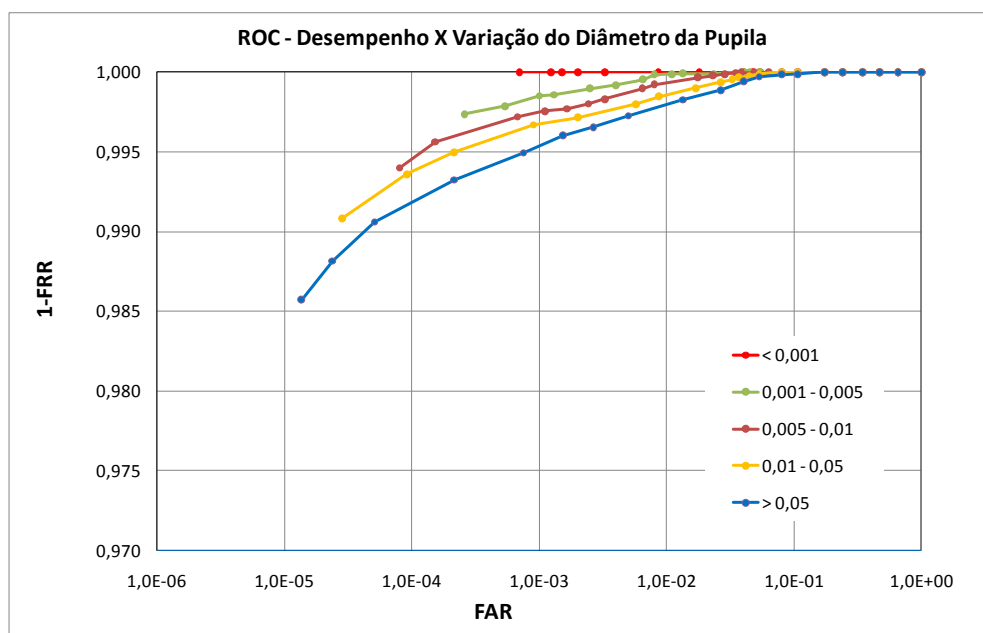


Figura 49: Curvas ROC para diferentes faixas de valores de ΔDR_p - influência da variação do diâmetro da pupila no desempenho de classificação. Para um confronto entre dois vetores de características, quanto menor o valor da ΔDR_p , menor o erro de classificação.

5.5 BANCOS DE IMAGENS DE ÍRIS

Para avaliar o desempenho dos algoritmos de reconhecimento de íris, diversos bancos de imagens encontram-se disponíveis. A maioria deles foi criada e é administrada por universidades e centros de pesquisas. Dentre os que aparecem referenciados em trabalhos e publicações com maior frequência estão: CASIA (Center for Biometrics and Security Research – China), UBIID (University of Bath / Smart Sensors – Inglaterra), UBIRIS (Soft Computing and Image Analysis Group / Universidade Beira Interior – Portugal), UPOL (Palacký University – República Tcheca) e ND-IRIS (Computer Vision Research Lab - University of Notre Dame).

Os bancos de imagens de íris atualmente disponíveis, em geral não seguem um padrão para sua construção. Diversos aspectos relacionados ao processo de captura das imagens e construção dos bancos são desconhecidos. Essa falta de padronização leva a inúmeras diferenças, que vão desde os formatos dos arquivos, tamanho e resolução das imagens, número de indivíduos, quantidade de imagens por indivíduo, intervalo entre as aquisições das imagens, tipo de iluminação, tipo de câmera, até diferenças nas distâncias entre câmera e olho, entre outras. Por este motivo, em alguns casos uma análise comparativa mais criteriosa pode ser inviabilizada.

A fim de avaliar o desempenho da abordagem baseada em operadores morfológicos, foram utilizados o UBIID, CASIA e BIRD, conforme mencionado anteriormente no capítulo 4. A maior parte do desenvolvimento da pesquisa foi feita utilizando as imagens do UBIID para realização dos experimentos. No entanto, as imagens contidas no referido banco limitavam a realização de um estudo mais abrangente para avaliar os efeitos causados pelas deformações nos tecidos da íris, em função de variações no diâmetro da pupila, nas diversas etapas de processamento e no desempenho do sistema. Então, para viabilizar a realização desses estudos finais, optou-se pela criação de um banco de imagens de íris próprio, o BIRD (*Brazilian Iris Research Database*), que além de atender aos requisitos destes estudos possibilitaria a realização de muitos outros, uma vez que todas as informações e a metodologia utilizada no processo de construção do banco seriam conhecidas.

5.5.1 Especificações do BIRD

Para construção do referido banco de imagens de íris foram relacionados diversos aspectos, referentes à aquisição das imagens, procedimentos e sistema de captura, que

deveriam ser considerados. Em relação à aquisição das imagens, por exemplo, seriam considerados aspectos como: seleção de voluntários (sexo masculino / feminino, raça e cor da íris); tipo de iluminação (visível x IR, posicionamento da fonte luminosa, difusores/dispersores de iluminação e controle e monitoramento da intensidade luminosa); captura das imagens (aquisição de sequências de vídeo e fotos, aquisição de imagens dos dois olhos - D/E, classificação quanto ao grau de dilatação da pupila, oclusão - pálpebras / cílios, tamanho das imagens - ISO/IEC 19794-6: íris com 200 pixels de diâmetro). Deve-se ressaltar que um dos bancos de dados mais utilizados em análises comparativas, o CASIA, não garante essa recomendação da ISO/IEC 19794-6.

Para que as imagens deste banco também pudessem ser utilizadas em estudos futuros e com diferentes objetivos, outros aspectos foram considerados. O objetivo é permitir que no futuro, imagens do banco sirvam para a realização de estudos sobre: anatomia, fisiologia e patologias da íris, características e atributos de imagens (tamanho, resolução, iluminação, interferências, etc.), análise e estimação estatística, deformação e estimação de movimento, modelagem e síntese, entre outros. Não obstante, outra importante contribuição almejada diz respeito à análise e avaliação de algoritmos e modelos, que poderiam ter seu desempenho e robustez verificados a partir das imagens deste banco.

5.5.2 Composição do BIRD

A primeira versão do BIRD seria composta inicialmente por três grupos de voluntários: militares, estudantes e funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

O primeiro grupo de voluntários a participar da pesquisa foi o dos militares. O grupo foi formado por militares do Exército Brasileiro, com faixa etária entre 18 e 20 anos, membros do 5º Grupo de Artilharia de Campanha Autopropulsado (grupo Salomão Rocha) – Curitiba - PR. A captura das imagens foi realizada em dois dias e dividida em quatro sessões, distribuídas de acordo com a disponibilidade dos soldados.

Durante a realização das sessões, ocorreram diversas situações que a princípio não haviam sido previstas, relacionadas tanto ao sistema de captura quanto aos usuários. Uma em particular, prejudicou bastante o procedimento de captura das imagens: a impossibilidade de monitorar a aquisição da sequência de imagens em tempo real. Esta e outras situações, que serão discutidas posteriormente neste capítulo, foram determinantes para mostrar a necessidade de se fazer modificações tanto nos procedimentos quanto no sistema de captura,

sem as quais não será viável a realização de novas sessões de captura com este ou com os outros grupos. Portanto, a primeira versão do BIRD acabou ficando restrita às imagens adquiridas dos 123 voluntários do Exército e, em virtude das dificuldades encontradas, apresenta limitações para utilização genérica como as demais bases de imagens.

5.5.3 Sistema de Captura

De acordo com as especificações do sistema, o conjunto de aquisição de imagens foi composto por: uma câmera digital montada em um suporte com altura regulável, um dispositivo de iluminação e um apoio de cabeça. Para evitar o reposicionamento da câmera para focalizar o olho/íris durante o processo de aquisição e a necessidade de se realizar novos ajustes, um aparato foi montado, onde a distância câmera-olho foi fixada para uma determinada posição de foco. O objetivo foi evitar variações nas configurações do sistema de captura, visando ter um controle efetivo dos parâmetros envolvidos no processo de aquisição das imagens.

A câmera utilizada para a captura das imagens deveria atender a alguns requisitos básicos, tais como: boa resposta no espectro óptico na região próxima ao IR; boa resolução espacial (maior que 640x480) para fotos e sequência de vídeo; taxa de quadros entre 10 e 15fps; ajustes manuais (foco, balanço de branco, exposição, etc.) e interface com computador (p.ex.: IEEE-1394 FireWire ou USB 2.0). Além destes requisitos, alguns detalhes relativos à câmera, lente e dispositivo de iluminação deveriam ser observados, como por exemplo: o posicionamento da câmera a uma curta distância (10 a 20 cm) para possibilitar um melhor enquadramento do olho na imagem capturada, maximizando a resolução na região de interesse – íris, e assim atendendo a norma ISO/IEC 19794-6; a lente da câmera deveria estar focada na íris para garantir uma imagem nítida da mesma; o dispositivo de iluminação deveria ser posicionado para que as reflexões por ele causadas ficassem restritas a região da pupila e nenhuma textura da íris fosse perdida. Um dispersor poderia ser utilizado como alternativa para evitar que tal problema ocorresse.

Então, para atender às especificações, a captura das imagens foi realizada utilizando uma câmera monocromática CMOS modelo DMK 72BUC02 da *The Imaging Source*. Esta câmera possui interface USB 2.0, resolução máxima de 2592x1944 pixels, sensor CMOS de 1/2.5", velocidade de até 52 fps (quadros por segundo) e aceita lentes com montagem C/CS.

Para compor o conjunto foi utilizada uma lente varifocal de 6,0-15mm de distância focal, com dupla regulagem de foco e montagem CS.

A Figura 50 apresenta uma visão geral do aparato montado para captura das imagens.



Figura 50: Sistema de Captura – aparato utilizado para aquisição das imagens dos voluntários.

Para compor o sistema de captura, além do conjunto lente-câmera foi utilizado um dispositivo de iluminação misto, composto por LEDs IR e brancos (emissão de luz visível). O conjunto lente-câmera, dispositivo de iluminação e olho deveriam ser dispostos para se evitar a influência da iluminação ambiente (p.ex. reflexões) e possibilitar a aquisição de imagens de íris com variações no diâmetro da pupila. A princípio seria utilizado um cone com a superfície interna escura (preta), mas durante a montagem do aparato, optou-se por usar um cilindro ao invés do cone, devido a uma questão mecânica que facilitou a conexão do conjunto lente-câmera-dispositivo de iluminação, bem como da interface para posicionamento/acoplamento do olho do usuário. Para estimular a contração da pupila foi utilizado um pulso de luz visível de curta duração disparado durante a captura. Na Figura 51 são apresentadas três vistas laterais do conjunto de aquisição de imagens, sendo que em (a) pode-se observar a interface para acoplamento do olho do usuário, em (b) o botão para acionamento do sistema de iluminação visível e em (c) o conjunto lente-câmera.

O apoio de cabeça inicialmente previsto para auxiliar no posicionamento do usuário foi abolido, uma vez que o mesmo teria que mover a cabeça durante o processo de captura, para que fossem adquiridas imagens da íris sujeitas ao movimento de rotação.

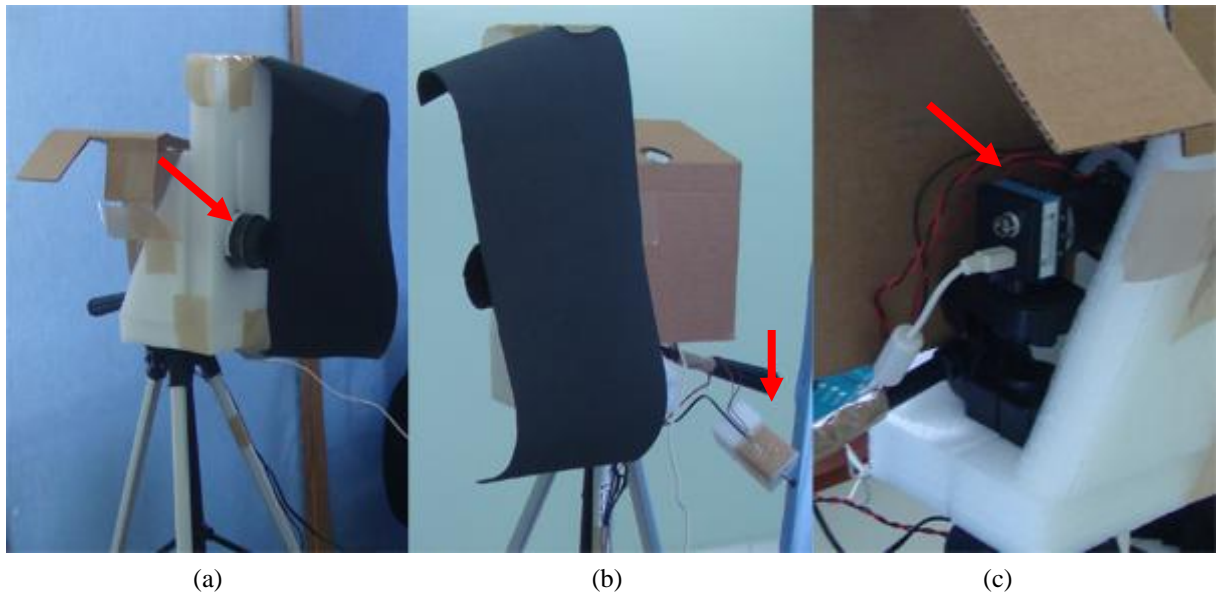


Figura 51: Conjunto de aquisição de imagens: as setas indicam em (a) a interface para acoplamento do olho do usuário, (b) o botão para acionamento da iluminação visível e (c) o conjunto lente-câmera.

5.5.4 Procedimento de Captura

O procedimento típico para aquisição das imagens do olho consistiu em um indivíduo posicionar seu olho em frente à câmera para que a íris fosse focalizada. Uma sequência de quadros foi então adquirida, dos quais um determinado número foi selecionado para compor o banco de imagens. O tempo gasto no procedimento de captura de um olho dependeria a princípio da velocidade de captura (taxa de quadros por segundo) e da quantidade de quadros que seriam capturados. No entanto, verificou-se que outros fatores mais críticos afetavam tal procedimento, entre eles o correto posicionamento do usuário antes e durante a captura.

Para a realização da aquisição das imagens foi necessário que alguns parâmetros fossem determinados, tais como: a taxa de quadros a ser utilizada (p.ex.: 30fps); o tempo de exposição (mínimo e máximo) em função tanto dos tempos de resposta e de acomodação da pupila, quanto da intensidade de radiação emitida pelo dispositivo de iluminação; o tempo de

captura ou tamanho da sequência de quadros (mínimo e máximo), que deveria ser de duas a três vezes maior que o número de imagens que seriam selecionadas para compor o banco de dados; o número de imagens por indivíduo para compor o banco.

No caso da captura típica de imagens da íris, a pupila aparece com tamanho fixo, pois o procedimento é realizado procurando-se manter a iluminação ambiente constante, sem qualquer variação intencional da intensidade de luz visível. No caso do BIRD, a captura foi feita com uma variação controlada da luz visível para aquisição de imagens com diferentes tamanhos de pupila, possibilitando assim a realização de estudos sobre a dinâmica de deformação dos tecidos da íris, bem como a avaliação do desempenho de sistemas de reconhecimento em função da dilatação da pupila. No apêndice D são feitas algumas considerações a respeito da iluminação e do procedimento de captura das imagens.

O procedimento de captura foi realizado em duas etapas, cada uma delas utilizando um dos dois olhos (direito e esquerdo) para aquisição de imagens. Em cada etapa, o indivíduo foi orientado a colocar a cabeça em três posições diferentes: POSIÇÃO_1 – cabeça posicionada para que o eixo dos olhos permanecesse na horizontal; POSIÇÃO_2 – cabeça posicionada com leve rotação à esquerda (+/- 15°); POSIÇÃO_3 – cabeça posicionada com leve rotação à direita (+/- 15°).

O procedimento teve início com o indivíduo colocando seu olho na extremidade do aparato que tem a interface e deslocando sua cabeça para a POSIÇÃO_1. A seguir, iniciava-se a captura apenas com a iluminação IR acionada. O pulso de luz visível era acionado 5 segundos após iniciada a captura e decorridos mais 5 segundos solicitava-se ao indivíduo que alterasse o posicionamento da cabeça para a POSIÇÃO_2 e posteriormente para a POSIÇÃO_3. A captura na POSIÇÃO_2 e POSIÇÃO_3 era realizada sem o acionamento do pulso de luz visível e cada uma delas tinha duração de aproximadamente 5 segundos. Cada uma das três posições utilizadas para captura das imagens tinha um objetivo diferente. Na POSIÇÃO_1 o objetivo foi adquirir imagens com diferentes tamanhos de pupila, por isso foi utilizado o pulso de luz visível para estimular a contração da mesma, mas sem a influência de qualquer tipo de movimento (translação, rotação ou escalamento). Na POSIÇÃO_2 e POSIÇÃO_3 ao contrário, o intuito foi adquirir imagens com diferentes ângulos de rotação, por isso foram utilizados deslocamentos da cabeça do usuário tanto no sentido horário como no anti-horário, apenas com a iluminação IR acionada.

5.5.5 Discussões

Como mencionado anteriormente, durante o processo de captura das imagens para construção do BIRD foram enfrentados diversos problemas e situações que não haviam sido previstas.

Entre os diversos testes feitos em laboratório, foram realizadas diversas aquisições de sequências de vídeo, em diferentes resoluções e com o monitoramento em tempo real, para determinar, entre outras coisas, a resolução que seria utilizada para captura das imagens do BIRD. A resolução selecionada foi de 1628x916 pixels, pois além de atender aos requisitos previstos para as imagens do banco, possibilitaria a realização de outros estudos no futuro.

No entanto, quando da realização das sessões de captura das imagens dos militares, um problema no software da câmera, que é responsável pelas configurações, interface e gerenciamento do processo de captura, impossibilitou que as aquisições pudessem ser monitoradas em tempo real. A princípio pensou-se que o problema poderia estar associado a um requisito de memória do computador onde o software estava sendo executado. Porém, foram realizados testes com a utilização de resoluções menores e mesmo assim o problema persistiu, impondo assim a condição de aquisição das imagens sem o referido monitoramento. Tal condição prejudicou bastante o procedimento de captura, uma vez que a aquisição das imagens foi feita “às cegas”, sem a possibilidade de acompanhar pelo monitor do computador o que se passava durante a aquisição da sequência de vídeo permitindo a correção da captura de imagens em tempo real. Após iniciada a aquisição, a janela de monitoramento que ficava aberta na tela do software simplesmente congelava a imagem e deste ponto em diante não se tinha mais nenhuma informação visual do processo. O acompanhamento visual permitiria ao operador identificar possíveis falhas ou problemas no decorrer da aquisição e naquele momento intervir no processo ou interagir com o voluntário, para fazer as devidas correções ou ajustes necessários. Com isso, na maioria dos casos, problemas como posicionamento incorreto do usuário/olho, perda de foco, captura fora de eixo, oclusão excessiva, entre outros, poderiam ser solucionados sem colocar em risco a qualidade e as características da sequência adquirida, evitando inclusive se chegar ao extremo de se perder uma sequência inteira, como aconteceu em diversos casos com o grupo dos militares. A Figura 52 apresenta imagens que ilustram alguns dos problemas ocorridos na aquisição de uma das sequências, durante o processo de captura para construção do BIRD.

Em alguns casos as sequências de imagens foram totalmente perdidas, sendo o mau posicionamento do olho/usuário o principal motivo. Geralmente, o mau posicionamento teve

como causa o fato da cabeça estar desalinhada em relação ao eixo do conjunto e se mover em diversas direções quando solicitado ao usuário para rotacioná-la, ou ainda pelo olho estar fora da interface de acoplamento, permitindo assim a entrada de luz ambiente para dentro do conjunto. Nas sequências que apresentavam tais problemas, as imagens geralmente apareciam fora de foco, distorcidas e em alguns casos com os olhos quase ou fechados.



Figura 52: Imagens de uma das sequências adquiridas para construção do BIRD, que ilustram alguns dos problemas ocorridos durante o processo de captura, tais como: oclusão excessiva, posicionamento incorreto do olho, olho fechado e perda de foco.

Outros fatores que influenciaram no processo de aquisição das imagens, estão relacionados ao dispositivo de iluminação (IR / visível) e a contagem dos tempos. O controle do acionamento do dispositivo de IR, do LED de luz visível e da temporização foi feito manualmente pelo operador do sistema de captura, situação esta que não era a ideal, uma vez que os tempos envolvidos no processo acabavam sofrendo variações de uma aquisição para outra. Tal fato ocorreu devido falta de tempo hábil para implementação de um sistema de controle mais eficiente, uma vez que a janela de tempo para a realização das sessões de captura no quartel do 5º Grupo de Artilharia de Campanha Autopropulsado (Grupo Salomão da Rocha) foi informada aos pesquisadores envolvidos com apenas uma semana de antecedência. Portanto, o conjunto de aquisição teve que ser montado e testado em praticamente um dia com os recursos disponíveis, sendo o projeto original simplificado para torná-lo operacional.

Sendo assim, verificou-se a necessidade de se desenvolver um sistema automatizado de captura, que possibilite a mínima interferência do operador e do usuário no processo. Desta forma, caberia ao operador apenas dar início ao processo de captura e monitorar a aquisição das imagens para interagir com o usuário caso necessário, pois as demais ações (disparo da câmera, contagem de tempos, acionamento dos dispositivos de iluminação, pulso de luz

visível, ajuste de foco, entre outros) serão realizadas automaticamente pelo sistema. O sistema também será dotado de motores acoplados a câmera, para possibilitar tanto um deslocamento linear para se posicionar para captura de imagens de cada um dos olhos (esquerdo e direito), como um deslocamento angular (nos sentido horário e anti-horário) para aquisição de imagens sujeitas ao movimento de rotação. A interface de acoplamento para o referido sistema será construída para acoplar os dois olhos simultaneamente e como o posicionamento da câmera será feito automaticamente, o usuário ficará com a cabeça em uma única posição durante todo o processo de captura. Sendo assim, não haverá mais a necessidade do operador interagir com o usuário durante o processo de captura para solicitar a mudança no posicionamento da cabeça, para fazer a rotação ou a troca de olho. O operador terá apenas que dar o comando para início do processo de captura e depois de terminada a aquisição da sequência de imagens para um dos olhos, acionar o comando para alterar o posicionamento da câmera para o outro olho e dar início à aquisição. No anexo C encontra-se uma breve descrição do sistema automatizado de captura de imagens do olho que está sendo desenvolvido.

A automatização do sistema de captura trará diversas vantagens. Uma delas será a reprodutibilidade dos testes, que assegurará uma maior confiabilidade para o sistema. Outra está relacionada às melhorias que serão implementadas, as quais facilitarão a operação do sistema e permitirão que o operador monitore a aquisição em tempo real. Isto possibilitará ao operador interagir e orientar o usuário, caso haja necessidade, quanto ao posicionamento correto da cabeça/olho, abertura das pálpebras (para evitar oclusões excessivas), bem como realizar correções e ajustes (eg.: no foco), ou até mesmo abortar e repetir a aquisição de uma sequência, fazendo uma nova captura.

Face ao exposto, apesar de terem sido capturadas sequências de imagens dos dois olhos de 123 voluntários, poucas puderam ser aproveitadas, reduzindo assim tanto o número de indivíduos como o de imagens para compor o banco de dados. Como mencionado na seção 4.8, o subconjunto utilizado nos experimentos foi composto por 20 indivíduos, dos 123 que participaram do processo, cada qual com 10 imagens de um dos olhos.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho é continuidade da proposta apresentada por MIRA & MAYER (2003) onde testes preliminares de desempenho com imagens de apenas quatro indivíduos de um banco próprio adquiridas em tons de cinza e sob iluminação convencional, com resolução de 640x480 pixels foram realizados. Neste trabalho, foram realizados extensivos testes de desempenho utilizando as imagens do UBIID após sucessivas inovações de algoritmo. Cabe ressaltar que apesar da base conceitual dos algoritmos ser praticamente a mesma do trabalho iniciado por Mira e Mayer, todos os algoritmos foram aperfeiçoados e sofreram contínuas modificações para adequá-los às novas condições de processamento, como por exemplo, as relacionadas às características das imagens (resolução, tipo de iluminação, contraste, etc.) e à determinação de parâmetros de forma automática em função dessas características. O desempenho das duas bases, banco próprio com quatro indivíduos e UBIID, nos testes foi semelhante e uma análise dos resultados obtidos mostra que os algoritmos de segmentação, processamento morfológico e confronto podem ser aplicados tanto para imagens capturadas sob iluminação convencional quanto infravermelho e ainda em imagens com diferentes resoluções. No UBIID existem algumas imagens de olhos com lentes de contato e os resultados obtidos para tais imagens mostram que a presença das lentes não afeta o desempenho dos algoritmos.

Existem outros fatores que influenciam a sensibilidade do sistema e consequentemente seu desempenho, dentre eles: iluminação ambiente, nitidez, contraste, resolução, ruído, escala e tamanho.

O método proposto por Daugman foi implementado de acordo com informações disponíveis na literatura (DAUGMAN, 1992; 1993; 2001) e utilizado como referência para comparações de desempenho de classificação entre os dois métodos. O valor da média de 0,46 obtido para a distribuição da distância de Hamming para os confrontos interclasses (Figura 44(b)) é praticamente o mesmo relatado na literatura, apesar do fato de que uma base de dados de imagem da íris diferente foi usada, indicando que a implementação do método Daugman utilizada no presente trabalho apresenta um desempenho de classificação coerente.

Diversos métodos de reconhecimento de íris encontrados na literatura utilizam o modelo *rubber-sheet homogeneous* proposto por Daugman (DAUGMAN, 1992) para mapear

a íris em um sistema de coordenadas adimensional, para compensar os efeitos causados pela sua variação de tamanho e pela dilatação da pupila. No entanto, tais métodos são criticamente dependentes da precisão em encontrar as fronteiras interna e externa da íris durante o processo de segmentação. Diferentes mapeamentos de padrões da íris podem ser causados pela inexatidão na detecção destas fronteiras, acarretando falhas na etapa de confronto de similaridades. Outros fatores que afetam estes métodos estão relacionados à não-concentricidade e à não-circularidade das fronteiras da íris. Tais fatos são geralmente desconsiderados por muitos métodos usados para detecção e modelagem das fronteiras da íris, que relaxam estas condições para melhorar o desempenho dos algoritmos de reconhecimento. A oclusão é outro fator importante que afeta a identificação das fronteiras da íris. Frequentemente a fronteira interna (íris-pupila) está sujeita aos efeitos causados por reflexões da iluminação e pode sofrer uma oclusão parcial. O mesmo acontece com a fronteira externa da íris em suas porções superior e inferior, que também podem sofrer uma oclusão parcial devido à presença das pálpebras. No método apresentado neste trabalho estes problemas podem ser evitados, pois nenhuma restrição relacionada a formas e contornos é imposta pelos operadores morfológicos utilizados no processo de segmentação. Os resultados obtidos na etapa de segmentação mostraram que mesmo em situações onde a imagem da íris apresentava oclusão, devido às pálpebras, cílios e reflexões na região da pupila, o algoritmo conseguiu realizar a tarefa de identificar as fronteiras interna e externa da íris, para obter a *ROI*.

Além das reflexões e oclusões das pálpebras, as informações provenientes da imagem da íris podem ser degradadas pela oclusão dos cílios (pálpebra superior). Os cílios apresentam intrincadas formas aleatórias que são difíceis de ser detectadas por modelos básicos de forma. Em termos de energia e contraste, os cílios podem aparecer como um sinal predominante na imagem da íris. Se este sinal não for detectado e minimizado, pode comprometer código gerado e possivelmente degenerar o vetor de características com informações espúrias (ruído). Como a abordagem proposta se baseia nas informações obtidas das estruturas da íris e não em toda região da íris segmentada para construir o vetor de características, os efeitos causados pela oclusão dos cílios tendem a afetar menos a extração de características. Geralmente, a perda de informação produzida pela oclusão típica causada pelas pálpebras e cílios não é suficiente para comprometer o desempenho dos algoritmos propostos. Devido à disposição das estruturas na íris e a forma com a qual os algoritmos processam estas informações, as áreas remanescentes da íris que estão livres de oclusão contêm informações (estruturas) suficientes para permitir comparações com suficiente eficácia. Novos estudos estão sendo realizados para estabelecer a porcentagem mínima de

área livre de oclusão que é necessária para realizar comparações sem comprometer o desempenho de classificação.

Para compensar os efeitos do desalinhamento das íris, causados por movimentos de translação, rotação e escalamento durante a aquisição das imagens, assim como variações no diâmetro da pupila, a região segmentada da íris sob análise é submetida a um procedimento de normalização. Diversas abordagens utilizam o método de normalização proposto por DAUGMAN (1993) para realizar esta tarefa. No entanto, elas descartam a informação do grau de dilatação da pupila e assumem que a deformação do tecido da íris na direção radial é linear. Diferentemente delas, a abordagem proposta utiliza informações diretamente das estruturas existentes na imagem da íris para compensar as variações e desalinhamentos. O procedimento de normalização baseado na morfologia matemática, que é responsável pelo alinhamento das estruturas, consome cerca de 80% do tempo total de processamento do algoritmo proposto para o reconhecimento da íris. Alternativas para reduzir o custo computacional desta importante etapa do processamento e a introdução de novos procedimentos com o uso de diferentes abordagens foram estudadas. Dessa forma foi possível identificar que as imagens em que mais tempo foi gasto para o alinhamento também resultavam em valores mais elevados da FRR. Uma análise desses casos indica que grandes variações no diâmetro da pupila, entre imagens da íris referência e da sob análise, é um dos aspectos mais críticos e merece ser analisado. Conforme mencionado no capítulo 5, foi analisada a introdução de uma etapa de pré-confronto que permite a interrupção do processamento antes da etapa completa de alinhamento, poupando o tempo que seria gasto na compensação de movimento e nas etapas de classificação e confronto. Nos testes realizados com a introdução desta etapa, os resultados apontaram para uma redução no tempo total de processamento da ordem de 70% em relação ao tempo gasto para realizar o processamento sem a introdução da mesma. Neste caso, para interromper o processamento foi utilizado como parâmetro o *número total de nós*. Assim como o *número de nós*, existem outros parâmetros que não dependem do alinhamento e, portanto, poderiam ser considerados e analisados para aumentar a eficiência da referida etapa. Um exemplo disto foi a utilização de um segundo parâmetro para interromper o processamento, pois em alguns casos identificados durante a realização dos testes, o processamento deveria ter sido interrompido antes de se iniciar o alinhamento e não foi. Como visto na seção 5.3, a tendência de evolução do erro entre a posição original e a posição atual das estruturas da íris foi monitorada através do parâmetro ΔE , cujo valor corresponde ao erro estimado a cada iteração do algoritmo responsável pelo alinhamento. Os resultados obtidos mostraram que a utilização deste segundo parâmetro é

viável, pois em 90% das imagens analisadas o processamento foi abortado antes do término da etapa de alinhamento, com uma redução média estimada de 50% no tempo total de processamento e em alguns casos podendo chegar a 60%.

Em relação aos formatos adotados para representação das características da íris, como mencionado no relatório de Desempenho de Algoritmos de Identificação de Íris – IREX III do NIST, nenhum padrão já foi formalizado pelos comitês da ISO (*International Organization for Standardization*), NIST, ou por qualquer outra organização de normalização reconhecida (IREX III, 2012). Os formatos que vem sendo adotados acabam incorporando suas próprias características de acordo com os dados extraídos de imagens da íris. Neste trabalho, a representação proposta para as estruturas da íris, baseada nos *nós consistentes*, *ramos* e nas *terminações*, mostrou ser adequada para caracterizar os padrões existentes na íris humana, alcançando elevados índices de desempenho de classificação. A representação adotada também é compacta, uma vez que os vetores de características obtidos utilizando o método proposto requerem, em média, 1 Kbyte (KB) de tamanho de armazenamento para cada imagem de olho, sendo compatível ao tamanho dos formatos relatados no IREX III. Ainda que apenas os *nós coincidentes* e o *número de ramos por nós coincidentes* tenham sido utilizados nos experimentos, outras informações sobre as *terminações* poderiam ser utilizadas para aumentar a robustez da representação e consequentemente a confiabilidade do sistema. Com o objetivo de armazenar a menor quantidade de dados possível, mas suficiente para permitir o alinhamento das íris, bem como sua comparação baseada na representação, foram realizados testes com três tipos diferentes de informação a ser armazenada no banco de dados, ou seja: a imagem da íris - Figura 23(a), a imagem binária contendo as estruturas de interesse - Figura 27(a) ou a representação extraída das estruturas, baseada nas *terminações* e nos *nós*. Em termos de desempenho todas apresentaram resultados similares e se mostraram eficientes com respeito à capacidade de discriminação, porém, o armazenamento da representação mostrou ser o mais adequado em termos de tamanho.

Para avaliação mais abrangente do desempenho de classificação do método proposto foi utilizada para realização dos experimentos uma base de dados de teste que era composta por subconjuntos de várias bases de imagens (i.e., UBIID, CASIA e BIRD), cujos resultados foram apresentados no capítulo 5. No caso do UBIID os testes foram realizados utilizando duas abordagens diferentes para gerar os vetores de características de referência, como descrito na seção 4.6. Numa abordagem inicial (V1) o vetor de características de referência foi gerado a partir de uma única amostra de imagem da íris de cada indivíduo e numa segunda abordagem (V2) foram gerados utilizando características mais consistentes encontradas em

cinco amostras diferentes. Os resultados obtidos para o método proposto com a abordagem inicial apresentavam um desempenho similar, mas inferior aos do método de referência. Com a segunda abordagem, o desempenho global do método proposto superou o do método de referência, podendo ser confirmado pelos resultados obtidos para os estados de operação típicos, EER e AUC (Tabela 6), indicando assim a viabilidade da utilização da abordagem baseada em morfologia matemática em sistemas de reconhecimento biométricos de íris. Para as imagens da CASIA, o desempenho para ambos os métodos é similar, sendo o desempenho do método de referência um pouco superior ao do método proposto. Uma justificativa para tal fato pode estar associada à diferença na resolução das imagens da CASIA (320x280) e as do UBIID (1280x960), pois os algoritmos tiveram que ser adaptados para processar imagens com resoluções menores (CASIA), uma vez que os mesmos foram desenvolvidos para trabalhar com resoluções maiores (UBIID). O comparativo do desempenho para os dois métodos utilizando as imagens do BIRD mostrou que o desempenho do método de referência é um pouco inferior ao do método proposto. No entanto, uma análise mais abrangente das imagens do BIRD ficou prejudicada em função dos problemas enfrentados nas sessões de captura das imagens para sua construção, mencionados anteriormente na seção 5.5.

6.2 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um método de identificação biométrica da íris em que operadores morfológicos foram utilizados para extrair padrões para representar e caracterizar a íris humana. A abordagem fundamentada na Morfologia Matemática foi utilizada com sucesso em vários estágios de processamento, como de localização da íris, segmentação e extração de características, apresentando resultados que confirmam tal afirmação.

Os resultados dos experimentos usando imagens do Banco de Dados de Imagens de Íris da Universidade de Bath (UBIID), da base de dados do Instituto de Automação da Academia Chinesa de Ciências (CASIA) e imagens adquiridas para compor a Banco de Dados Brasileiro de Pesquisa de Íris (BIRD) mostram que a abordagem proposta é adequada para ser utilizada em sistemas de reconhecimento da íris. A análise estatística dos experimentos foi baseada em um método que permite a determinação de um limiar ótimo de decisão para curvas de distribuição de confrontos intraclasse e interclasses. A análise de curvas ROC, figuras de mérito e AUC foram utilizadas a fim de comparar o desempenho de classificação do método proposto e do método de referência (Daugman). Através da análise dos resultados

obtidos, pode-se concluir que o método proposto apresenta desempenho de classificação superior ao do método de referência, atingindo 99,35% de acerto no ponto de EER contra 99,22% do método de referência, utilizando a segunda abordagem (V2) para geração dos vetores de características de referência e as imagens do UBIID. Analisando o desempenho em termos globais, pode-se dizer que o desempenho do método proposto foi superior ao do método de referência para as imagens do UBIID e do BIRD e similar para as imagens da CASIA.

O desempenho de classificação do método proposto também foi avaliado em função das variações no diâmetro da pupila. Os resultados mostram que, para um confronto entre dois vetores de características de um mesmo indivíduo, quanto menor a diferença entre o tamanho relativo das duas pupilas, menor o erro de classificação obtido. Portanto, o desempenho de classificação é afetado quando são comparadas duas íris que apresentam diferentes tamanhos da pupila, devido às deformações causadas no tecido da íris pela variação no diâmetro das respectivas pupilas.

Em relação ao BIRD, o processo de captura completa das imagens para a construção de um banco de imagens com pelo menos 200 indivíduos foi prejudicado por diversos fatores, sendo um dos principais que a aquisição das imagens foi feita “às cegas”. Devido a este e outros fatores relacionados ao dispositivo de iluminação, posicionamento do usuário e contagem dos tempos, constatou-se a necessidade de se desenvolver um sistema automatizado de captura para minimizar a interferência do operador e do usuário no processo, facilitando assim a operação do sistema e o monitoramento em tempo real da aquisição das imagens, bem como a reprodutibilidade dos testes.

Um novo projeto está sendo desenvolvido para construção do sistema automatizado de captura de imagens e encontra-se em fase de implementação e montagem do circuito de controle (Anexo C). O referido sistema permitirá a realização da captura das imagens dos olhos seguindo os procedimentos e protocolos que estão sendo definidos, tanto para atender aos requisitos necessários para a realização dos estudos previstos, quanto para garantir o bem estar do usuário segundo normas de segurança.

Todos os objetivos da pesquisa foram atingidos, sendo que apenas o relacionado à construção do banco de imagens e à avaliação da influência das variações do diâmetro da pupila no desempenho de classificação foram somente parcialmente alcançados, em função dos problemas relatados.

6.3 TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do desenvolvimento da pesquisa surgiram diversas propostas para realização de novos estudos, bem como, para dar continuidade àqueles que não foram completamente desenvolvidos. Sendo assim, a seguir estão relacionados alguns assuntos que serão objeto de estudo para realização de trabalhos futuros:

- 1- Concluir o desenvolvimento do sistema automatizado para captura de imagens, considerando o exposto nas subseções 5.5.3 e 5.5.6;
- 2- Dar continuidade à construção do banco de imagens BIRD, seguindo as especificações da seção 5.5.1. Com isso pretende-se, além de suprir as deficiências dos bancos de imagens existentes, criar uma estrutura de meta-dados para as imagens capturadas, onde uma série de informações será agregada a elas, enriquecendo assim a semântica do dado produzido, dando suporte para realizar a administração e gerenciamento desses dados, e fornecendo subsídios para realização de outros estudos e análises que poderão vir a ser desenvolvidos;
- 3- Realizar um estudo mais aprofundado para avaliar a influência das variações do diâmetro da pupila no desempenho de classificação dos sistemas de reconhecimento de íris;
- 4- Analisar a dinâmica de deformação dos tecidos da íris causadas pelas variações no tamanho da pupila, para desenvolver abordagens que minimizem seus efeitos, conforme descrito na seção 5.4;
- 5- Desenvolver um modelo para representar as deformações da textura da íris, que poderá ser utilizado para compensar o movimento e corrigir as distorções na forma causadas pelas mudanças no tamanho da íris;
- 6- Desenvolver novas versões dos algoritmos de extração de características para determinar automaticamente os valores de alguns parâmetros (p.ex. limiares e áreas) para torná-los adaptativos às variações nas características das imagens, como por exemplo, o processamento de imagens com diferentes resoluções;
- 7- Desenvolver modelos para geração aleatória de imagens de íris sintéticas, que possibilitaria, entre outras coisas, a construção de bancos de imagens para testar o desempenho de algoritmos e simular diversas situações que as bases de dados compostas por imagens reais não contemplam;

- 8- Realizar um estudo para acompanhar a estabilidade da íris ao longo do tempo, através do monitoramento periódico de voluntários, possibilitando assim uma análise mais criteriosa a respeito do assunto;
- 9- Realizar estudos para verificar a possibilidade de utilização de outras características e estruturas da íris para compor a representação, bem como a utilização de outros classificadores. Uma alternativa a ser avaliada é a de implementar uma estratégia utilizando diversos classificadores fracos para compor um classificador mais robusto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARVACHEH, E. M.; TIZHOOSH, H. R. Iris Segmentation: Detecting Pupil, Limbus and Eyelids. *IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE ICIP 2006 Proceedings, pp. 2453-2456, Oct. 2006.
- ASHBOUM, J. Management Summary – The Busy Persons Guide to Biometrics. Disponível em: <<http://www.biometrics.org>>. Acesso em: 20 de março 2001.
- ATLAS DE OFTALMOLOGIA. Base de dados em Oftalmologia. Unimagem Produções LTDA, 1999. 1 disco laser.
- BIOMETRICS Glossary. Disponível em: <<http://www.biometrics.gov/Documents/glossary.pdf>>. Acesso em: 07 de junho de 2010.
- BIOMETRICS. IEEE Bombay Section - *Biometrics*. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/r10/bombay/news5/Biometrics.htm>>. Acesso em: 27 de setembro de 2010.
- BOLES, W.; BOASHASH, B. A Human Identification Technique Using Images of the Iris and Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 46, No. 4, pp. 1185-1188, Apr. 1998.
- BONNEY, B.; IVES, R.; ETTER, D.; DU, Y. Iris Pattern Extraction using Bit Planes and Standard Deviations. *IEEE Asilomar Conference on Signals Systems and Computers.*, Vol 1, pp 582-586, 2004.
- BOVIK, A.I. *Handbook of Image and Video Processing*. Academic Press, 2000.
- CASIA. Chinese Academy of Sciences Institute of Automation. Disponível em: <<http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris%20Databases%20CH.asp>> Acesso em: 15 de dezembro de 2010.
- CHEN, W.; YUAN, S. A Novel Personal Biometric Authentication Technique using Human Iris based on Fractal Dimension Features. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. ICASSP '03, vol. 3, pp. 201-204, April 2003.
- CHORAS, R. S. Iris Image Recognition. *IEEE International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management Applications*. CISIM'07, pp. 26-30, June 2007.
- CONTI, V.; MILICI, G.; SORBELLO, F.; VITABILE, S. A Novel Iris Recognition System based on Micro-Features. *IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies*. pp. 253-258, June 2007.
- CUI, J., WANG, Y., HUANG, J., TAN, T., SUN, Z. & MA, L. An Iris Image Synthesis Method Based on PCA and Super-resolution. *Proceedings of 17th International Conference on Pattern Recognition*, 471–474, 2004.
- DAUGMAN, J. High Confidence Personal Identification by Rapid Video Analysis of Iris Texture. *Proceedings of IEEE, International Carnahan Conference on Security Technology*, 50-60, 1992.
- _____. High Confidence Visual Recognition of Persons by a Test of Statistical Independence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 15, no. 11, pp. 1148-1161, Nov. 1993.

_____. How Iris Recognition Works. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. Vol. 1, pp. 21-30, 2004.

_____. Iris Recognition. Disponível em: <<http://www.cl.cam.ac.uk/users/jgd1000>>. Acesso em: 10 outubro 2008.

_____. Statistical Richness of Visual Phase Information: Update on Recognizing Persons by Iris Patterns. *International Journal of Computer Vision*. Vol. 45, no. 1, pp. 25-38, October 2001.

DOUGHERTY, E.R.; LOTUFO, R.A. *Hands-on Morphological Image Processing*. SPIE Press, July 2003.

DUANE'S OPHTHALMOLOGY. Base de dados em Oftalmologia. Lippincott Williams & Wilkins Publishers, 2000. 1 disco laser.

ESTADÃO. *PM de SP terá óculos especiais para achar criminosos*. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,pm-de-sp-tera-oculos-especiais-para-achar-criminosos,704650,0.htm>>. Acesso em: 30 de novembro de 2011.

FACE-REC. *Face Recognition Homepage*. Disponível em: <<http://www.face-rec.org/>>. Acesso em: 05 de outubro de 2010.

GALBALLY, J.; ORTIZ-LOPEZ, J.; FIERREZ, J.; ORTEGA-GARCIA, J. Iris Liveness Detection based on Quality Related Features. *Proceedings of International Conference on Biometrics*. ICB 2012, March 2012.

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2001.

HARVARD. *Data Acquisition Lab*. Disponível em: <<http://www.nmr.mgh.harvard.edu/~rhoge/HST583/doc/HST583-Lab1.html>>. Acesso em: 11 de março de 2010.

HOLLINGSWORTH, K.P.; PETERS, T.; BOWYER, K.W.; FLYNN, P.J. Iris Recognition Using Signal-Level Fusion of Frames From Video. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. v.4, no. 4, pp. 837 -848, Dec. 2009.

HOLLINGSWORTH, K.P.; BOWYER, K.W.; FLYNN, P.J. Pupil dilation degrades iris biometric performance. *Computer Vision and Image Understanding*. v. 113, no. 1, pp.150-157, Jan. 2009a.

_____. Image Averaging for Improved Iris Recognition. *Advances in Biometrics: Lecture Notes in Computer Science*. No. 5558, pp. 1112-1121, 2009b.

_____. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. v. 31, no. 6, pp. 964-973, June 2009c.

_____. Using Fragile Bit Coincidence to Improve Iris Recognition. *IEEE 3rd International Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems (BTAS 09)*. pp. 1-6, Sept. 2009d.

IBG. *Biometric Technologies*. Disponível em: <<http://www.biometricgroup.com>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2010.

_____. *Biometrics Market and Industry Report 2007-2012*. Disponível em: <<http://www.biometricgroup.com>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2009.

IPS. *United Kingdom Passport Service Biometrics Enrolment Trial Report*. Disponível em: <<http://www.ips.gov.uk/passport/downloads/UKPSBiometrics-Enrolment-Trial-Report.pdf>>. Acesso em: 17 de janeiro de 2009.

- IREX III. *Performance of Iris Recognition Algorithms – NIST Interagency Report 7836*. Disponível em: <http://biometrics.nist.gov/cs_links/iris/irexIII/IREXIII_full.zip>. Acesso em: 15 de maio de 2012.
- IRIS-SCAN. *Iris Recognition: The Technology*. Disponível em: <<http://www.iris-scan.com>>. Acesso em: 07 dezembro 2001.
- ISO/IEC 19794-6. *Information technology - Biometric data interchange formats - Part 6: Iris image data*. Disponível em: <http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=38750>. Acesso em: 24 de setembro de 2010.
- IT GOVERNANCE INSTITUTE. *Risk and Control of Biometric Technologies - A Security, Audit and Control Primer*. Disponível em: <<http://www.isaca.org/Knowledge-Center/Research/ResearchDeliverables/Pages/Risk-and-Control-of-Biometric-Technologies-A-Security-Audit-and-Control-Primer.aspx>>. Acesso em: 09 de novembro de 2009.
- JAIN, A.K.; ROSS, A.; PRABHAKAR, S. An Introduction to Biometric Recognition. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. Vol. 14, no. 1, pp. 4-20, Jan. 2004.
- JOHNSON, P.; LAZARICK, R.; MARASCO, E.; NEWTON, E.; ROSS, A.; SCHUCKERS, S. Biometric Liveness Detection: Framework and Metrics. *Proceedings of International Biometric Performance Conference, IBPC*, March, 2012.
- KEREKES, R., NARAYANASWAMY, B., THORNTON, J., SAVVIDES, M. & VIJAYA KUMAR, B. V. K. Graphical Model Approach to Iris Matching Under Deformation and Occlusion. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1-6, 2007.
- LIAM L. W.; CHEKIMA, A.; FAN L. C.; DARGHAM, J. A. Iris Recognition using Self-organizing Neural Network. *IEEE Student Conference on Research and Developing Systems. SCORed '02*, pp. 169-172, 2002.
- LIM, S.; LEE, K.; BYEON, O.; KIM, T. Efficient Iris Recognition through Improvement of Feature Vector and Classifier. *ETRI Journal*. Vol. 23, No. 2, pp. 61-70, June 2001.
- MA, L.; WANG, Y.; TAN, T. Iris Recognition Based on Multichannel Gabor Filtering. In: *Asian Conference on Computer Vision (5th: January 2002 : Melbourne, Australia)*. *Proceedings*. Melbourne, 2002.
- _____. Personal Identification Based on Iris Texture Analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 25, no. 12, pp. 1519-1533, December 2003.
- MA, L.; TAN, T.; WANG, Y.; ZHANG, D. Efficient Iris Recognition by Characterizing Key Local Variations. *IEEE Transactions on Image Processing*. Vol. 13, no. 6, pp. 739-750, June 2004.
- MAKTHAL, S. & ROSS, A. Synthesis of Iris Image using Markov Random Fields. *Proceedings of the 13th European Signal Conference*, Sep. 2005.
- MALTONI, D.; MAIO, D.; JAIN, A.K.; PRABHAKAR, S. *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer-Verlag, 2009.
- MANSFIELD, A.J. & WAYMAN, J.L. Best Practices Standards for Testing and Reporting on Biometric Device Performance. *Technical Report*, National Physical Laboratory, Middlesex, U.K., 2002.
- MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. *Processamento Digital de Imagens*. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

- MILLER, N.R., NEWMAN, N.J., WALSH, F.B., BIOUSSE, V., HOYT, W.F., & KERRISON, J.B. *Clinical Neuro-Ophthalmology*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2005.
- MIRA JUNIOR, J.; MAYER, J. Identification of Individuals through the Morphological Processing of the Iris. *IEEE International Conference On Image Processing - ICIP 2003*, Barcelona. IEEE ICIP 2003 Proceedings, vol.1, pp 341-344, Sep. 2003.
- MONRO, D.M.; RAKSHIT, S.; ZHANG, D. DCT - Based Iris Recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 29, no. 4, pp. 586-595, Apr. 2007.
- MONRO, D.M.; ZHANG, D. An Effective Human Iris Code with Low Complexity. *IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE ICIP 2005 Proceedings, vol. 3, no. 3, pp. 277-280, Sept. 2005.
- NAMUDURI, K.R. & JI, A. (2001). Computation and Performance Trade-Offs in Motion Estimation Algorithms. *International Conference on Information Technology: Coding and Computing*. pp 263-267, Apr. 2001
- ND-IRIS. *The ND-IRIS-0405 Iris Image Dataset*. BOWYER, K.W.; FLYNN, P.J. *Notre Dame CVRL Technical Report*. Department of Computer Science & Engineering - University of Notre Dame. Disponível em: <<http://www.nd.edu/~cvrl/papers/ND-IRIS-0405.pdf>>. Acesso em: 06 de outubro de 2010.
- NOH, S.-I.; BAE, K.; PARK, K.R.; KIM, J. A New Iris Recognition Method Using Independent Component Analysis. *IEICE Transactions on Information and Systems*. Vol. 88, no. 11, pp. 2573-2581, 2005.
- PASSI, A.; KUMAR, A. Improving Iris Identification using User Quality and Cohort Information *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. CVPR '07, pp. 1-6, June 2007.
- PHANG, S.S., BOLES, W. & COLLINS, M.J. Tracking Iris Surface Deformation using Elastic Graph Matching. *Proceedings of the Twenty-first International Conference, Image and Vision Computing*, 2006.
- PHILLIPS, P.J.; BOWYER, K.W.; FLYNN, P.J. Comment on the CASIA version 1.0 Iris Dataset. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 29, no. 10, pp. 1869-1870, Oct. 2007.
- PRABHAKAR, S. Fingerprint Classification and Matching Using a Filterbank. PhD Thesis, Michigan State University, 2001.
- PROENÇA H.; ALEXANDRE, L.A. Toward Noncooperative Iris Recognition: A Classification Approach Using Multiple Signatures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 29, no. 4, pp. 607-612, Apr. 2007.
- QUEIROLO, C. C.; SILVA, L.; BELLON, O. R. P.; SEGUNDO, M. P. 3D Face Recognition using Simulated Annealing and the Surface Interpenetration Measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 32, no. 2, pp. 206-219, 2010.
- RAKSHIT, S.; MONRO, D. M. Medical Conditions: Effect on Iris Recognition. *Proceedings of IEEE 9th Workshop on Multimedia Signal Processing*, IEEE Computer Society, pp. 357-360, Oct. 2007.

- ROCHE, D.M.; AVILA, C.S.; REILLO, R.S. Iris Recognition for Biometric Identification using Dyadic Wavelet Transform Zero-Crossing. *IEEE 35th International Carnahan Conference on Security Technology*. pp. 272-277, Oct. 2001.
- SCHREINER, K. Biometrics: Prospects for going the distance. *IEEE Intelligent Systems*. Vol. 14, no. 6, pp. 2-6, Nov./Dec. 1999.
- SEGUNDO, M. P.; QUEIROLO, C. C.; BELLON, O. R. P.; SILVA, L. Detecção de características para o reconhecimento de faces 3D com expressão facial. *V Workshop of Undergraduate Work - XX Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, 2007*. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens - SIBGRAPI, 2007
- SEGUNDO, M.P.; SILVA, L.; BELLON, O. R. P. Segmentação Facial e Detecção de Características para o Reconhecimento Facial 3D sob Variações Causadas por Expressões Faciais. *IX Workshop of Thesis and Dissertations - 23rd Conference on Graphics, Patterns and Images*. Proceedings of IX Workshop of Thesis and Dissertations - 23rd Conference on Graphics, Patterns and Images, 2010.
- SERPRO. *Passaporte para o futuro*. Disponível em: <http://www.serpro.gov.br/imprensa/publicacoes/Tema/tema_179/materias/passapote-para-o-futuro>. Acesso em: 17 de outubro de 2009.
- SERRA, J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, 1988.
- SOILLE, P. *Morphological Image Analysis – Principles and Applications*. 2nd ed. Springer-Verlag, 2003.
- STILLER, C.; KONRAD, J. Estimating Motion in Image Sequences. *IEEE Signal Processing Magazine*. pp. 70-91, July 1999.
- SUESS, M.J. & MORISON, D.A. *Nonionizing Radiation Protection*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 1989.
- THORNTON, J., SAVVIDES, M.; KUMAR, V. A Bayesian Approach to Deformed Pattern Matching of Iris Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 29, no. 4, pp. 596–606, Apr. 2007.
- TISSE, C.; MARTIN, L.; TORRES, L.; ROBERT, M. Person Identification Technique using Human Iris Recognition. *Proceedings 15th International Conference on Vision Interface*. pp. 294-299, Jan. 2002.
- TRE. *Mais de um milhão de eleitores serão identificados pela impressão digital nestas eleições*. Disponível em: <http://www.tre-ap.gov.br/Eleicoes2010/index.jsp?cod_pag=11&id_noticia=2953>. Acesso em: 28 de julho de 2010.
- TSE. *Recadastramento Biométrico*. Disponível em: <<http://www.tse.jus.br/hotSites/urnaEletronica/recadastramentoBiometrico.html>>. Acesso em: 04 de janeiro de 2012.
- UBIID. University of Bath Iris Image Database. Disponível em: <<http://www.bath.ac.uk/eleceng/pages/sipg/irisweb/>> Acesso em: 9 de novembro de 2007.
- VINCENT L. Morphological Area Opening and Closing for Grayscale Images. *Proc. NATO Shape in Picture Workshop*, Driebergen, The Netherlands, Springer-Verlag, pp. 197-208, Sep. 1992.
- _____. Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 2, No. 2, pp. 176-201, Apr. 1993.

_____. *Current Topics in Applied Morphological Image Analysis. Current Trends in Stochastic Geometry and its Applications*, W.S. Kendall, O.E. Barndorff-Nielsen, and M.C. van Lieshout eds., Chapman & Hall, 1997.

VISÃO. *Estrutura do Olho*. Disponível em: <<http://www.drvisao.com.br/olho/asp>>. Acesso em: 5 de abril de 2001.

WEI, Z., TAN, T.; SUN, Z. Nonlinear Iris Deformation Correction Based on Gaussian Model. *International Conference on Biometrics*. Springer LNCS: *Advances in Biometric*, vol. 4642, 780–789, Aug. 2007.

WILDES, R.P. Iris Recognition: An Emerging Biometric Technology. *Proceedings of IEEE*, Vol.85, No. 9, pp. 1347-1363, Sept. 1997.

WINN, B., WHITAKER, D., ELLIOTT, D.B.; PHILLIPS, N.J. Factors Affecting Light-adapted Pupil Size in Normal Human Subjects. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. Vol. 35, pp. 1132–1137, 1994.

WYATT, H.J. A minimum wear-and-tear meshwork for the iris. *Vision Research*. Vol. 40, no.9, pp. 2167–2176, July 2000.

XU, G.Z., ZHANG Z.F., MA Y. Automatic Iris Segmentation Based on Local Areas. *International Conference on Pattern Recognition*. ICPR'06, pp. 505-508, 2006.

YUAN, X.; SHI, P. A non-linear normalization model for iris recognition. *International Workshop on Biometric Recognition Systems*. Springer LNCS: *Advances in Biometric Person Authentication*. Vol. 3781, pp. 135–141, Sept. 2005.

ZAIM, A. Automatic Segmentation of Iris Images for the Purpose of Identification. *IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE ICIP 2005 Proceedings, pp. 273-276, Sept. 2005.

ZHAO,W.; CHELLAPPA, R.; ROSENFELD, A.; PHILLIPS, P.J. Face Recognition: A Literature Survey. *ACM Computing Surveys*, pp. 399-458, 2003.

ZHU, Y.; TAN, T.; WANG, Y. Biometric Personal Identification Based on Iris Patterns. *International Conference on Pattern Recognition*. ICPR '00, vol. 2, pp. 801-804, March 2000.

ZUO, J.; SCHMID, N.A. A Model Based, Anatomy Based Method for Synthesizing Iris Images. *Proceedings of 2006 International Conference on Biometrics*. pp. 428-435, Jan. 2006.

APÊNDICE A - Técnicas e Conceitos Básicos de Processamento Digital de Imagens

A.1 VIZINHOS DE UM PIXEL

Seja p um pixel com coordenadas (x,y) . O conjunto dos pixels mostrados na Figura 53(a) é chamado de 4-vizinhos (N_4), em 53(b) de vizinhos diagonais (N_D) e em 53(c) de 8-vizinhos (N_8) (GONZALEZ & WOODS, 2001).

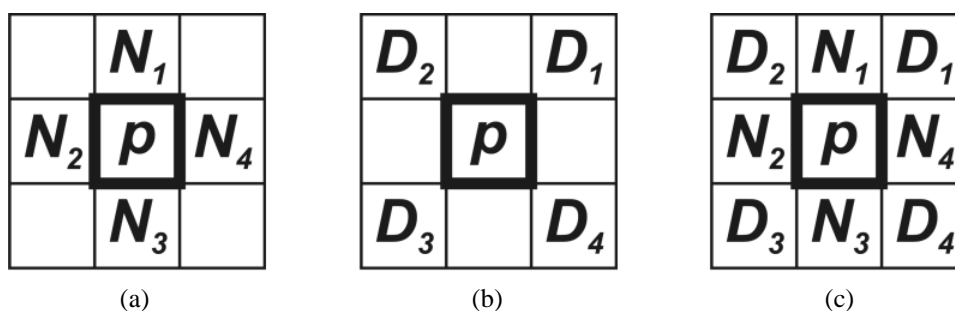


Figura 53: Vizinhança de um pixel p : (a) 4-vizinhos, (b) vizinhos diagonais e (c) 8-vizinhos.

A.2 CONECTIVIDADE

No processamento de imagens, muitas vezes faz-se necessário à identificação dos componentes de regiões ou mesmo estabelecer as fronteiras de objetos. Um conceito muito importante usado para realizar estas tarefas é o da conectividade (GONZALEZ & WOODS, 2001).

A conectividade entre pixels leva em conta não somente a posição, se eles são adjacentes, mas também um critério de similaridade. Um exemplo de avaliação de similaridade é a verificação se os níveis de cinza de um pixel se seus satisfazem um determinado critério. Em se tratando de uma imagem binária, por exemplo, onde os pixels podem assumir os valores 0 e 1, dois pixels adjacentes só serão ditos conectados se seus valores forem iguais. No caso de uma imagem em tons de cinza, pode-se definir a conectividade através de um conjunto de valores de níveis de cinza, onde os pixels cujos valores de intensidade pertencem a esta faixa são ditos conectados, se também forem adjacentes.

A conectividade pode ser dividida em três tipos:

- conectividade-4: dois pixels cujos valores satisfazem o critério de similaridade são 4-conectados se um deles pertence ao conjunto N_4 do outro;
- conectividade-8: dois pixels cujos valores satisfazem o critério de similaridade são 8-conectados se um deles pertence ao conjunto N_8 do outro;
- conectividade-m (ou conectividade composta): dois pixels cujos valores satisfazem o critério de similaridade são m-conectados se:
 - (i) um deles pertence ao conjunto N_4 do outro, ou
 - (ii) se ele pertence ao conjunto N_D do outro e a interseção do conjunto N_4 dele com o N_4 do outro pixel é vazio.

A.3 HISTOGRAMA

O histograma de uma imagem digital é um conjunto de números indicando o percentual de pixels naquela imagem, que apresentam um determinado nível de cinza. Estes valores são normalmente representados por um gráfico de barras que fornece para cada nível de cinza o número (ou o percentual) de pixels correspondentes na imagem. Analisando a distribuição do histograma de uma imagem podem-se obter informações do nível de contraste e do brilho médio (imagem predominantemente clara ou escura) (GONZALEZ & WOODS, 2001).

Para uma imagem com níveis de cinza na faixa $[0, L-1]$, o histograma é uma função discreta dada por:

$$p(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (33)$$

onde r_k é o k ésimo nível de cinza, n_k é o número de pixels na imagem com aquele nível de cinza, n é o número total de pixels na imagem e $k = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1$. A função $p(r_k)$ dá uma estimativa da probabilidade de ocorrência do nível de cinza r_k . Uma descrição global da aparência da imagem pode ser obtida através da representação gráfica desta função para todos os valores de k . Os quatro tipos básicos de histogramas são mostrados na Figura 54. Em 54(a) os níveis estão concentrados em torno do lado escuro da faixa da escala de cinza, correspondendo a uma imagem com características escuras. O oposto ocorre em 54(b). Na Figura 54(c) o formato estreito indica pequena faixa dinâmica, correspondendo a uma imagem com baixo contraste. Finalmente em 54(d), um histograma com espalhamento significativo,

podendo corresponder a uma imagem com alto contraste. O formato do histograma de uma imagem fornece informações úteis sobre a possibilidade de realce do contraste.

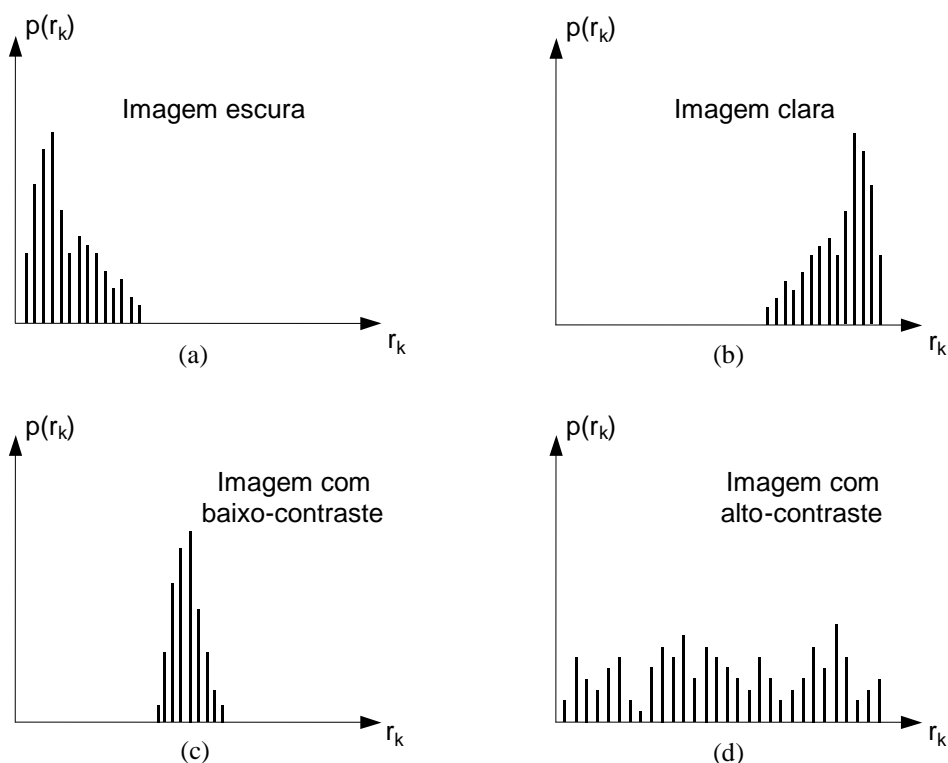


Figura 54: Histogramas correspondentes aos quatro tipos básicos de imagem: (a) escura, (b) clara, (c) baixo-contraste e (d) alto-contraste [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)].

A.4 EQUALIZAÇÃO DE HISTOGRAMA

Numa imagem a ser realçada, a variável r representa os níveis de cinza. Para o caso onde os valores dos pixels são contínuos e pertencem ao intervalo $[0, 1]$, $r = 0$ representa o preto e $r = 1$ o branco. Neste intervalo, para qualquer valor de r , a função de transformação é

$$s = T(r) \quad (34)$$

que produz um nível s para cada valor de pixel r na imagem original e deve satisfazer as seguintes condições:

- (a) $T(r)$ assume valores distintos e cresce monotonicamente no intervalo $0 \leq r \leq 1$;
- (b) $0 \leq T(r) \leq 1$ para $0 \leq r \leq 1$.

A condição (a) preserva a ordem do preto para o branco na escala de cinza, enquanto (b) garante um mapeamento que é consistente com a faixa permitida de valores do pixel (GONZALEZ & WOODS, 2001). A Figura 55 mostra um exemplo de uma função que satisfaz estas condições.

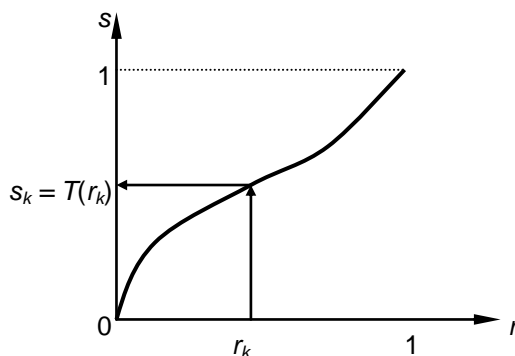


Figura 55: Uma função de transformação de nível de cinza

[Fonte: (GONZALEZ & WOODS, 2001)].

A transformação inversa, que também satisfaz as duas condições em relação à variável s , é dada por:

$$r = T^{-1}(s) \quad 0 \leq s \leq 1. \quad (35)$$

Os níveis de cinza de uma imagem podem ser vistos como quantidades aleatórias no intervalo $[0, 1]$. Se eles são variáveis contínuas, os níveis de cinza original e transformado podem ser caracterizados por suas funções densidade de probabilidade $p_r(r)$ e $p_s(s)$. Se $p_r(r)$ e $T(r)$ são conhecidos e $T^{-1}(s)$ satisfaz a primeira condição, a função densidade de probabilidade do nível de cinza transformado é:

$$p_s(s) = \left[p_r(r) \frac{dr}{ds} \right]_{r=T^{-1}(s)} \quad (36)$$

Técnicas para realce podem ser baseadas no controle da função densidade de probabilidade, de seus níveis de cinza, via função de transformação $T(r)$, para modificar a aparência da imagem (GONZALEZ & WOODS, 2001).

Usando uma função de transformação igual à distribuição cumulativa de r , obtém-se em uma imagem cujos níveis de cinza tem uma densidade uniforme. Em termos de realce, este resultado implica em um aumento na faixa dinâmica dos pixels, que pode causar uma melhoria na aparência da imagem.

Para o processamento digital de imagem, considera-se uma formulação discreta, sendo que os valores dos pixels variam em um intervalo $[0, L-1]$. Para níveis de cinza que assumem valores discretos, tem-se:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad 0 \leq r_k \leq 1 \text{ e } k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (37)$$

A técnica usada para obter um histograma uniforme é conhecida como *equalização de histograma* (GONZALEZ & WOODS, 2001).

A função de transformação na forma discreta é dada pela relação

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) \quad 0 \leq r_k \leq 1 \text{ e } k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (38)$$

e a inversa por

$$r_k = T^{-1}(s_k) \quad 0 \leq s_k \leq 1 \quad (39)$$

onde assume-se que $T(r_k)$ e $T^{-1}(s_k)$ satisfazem as condições (a) e (b).

A Figura 56 mostra o resultado da equalização de histograma aplicada a uma imagem escura e de pouco contraste.

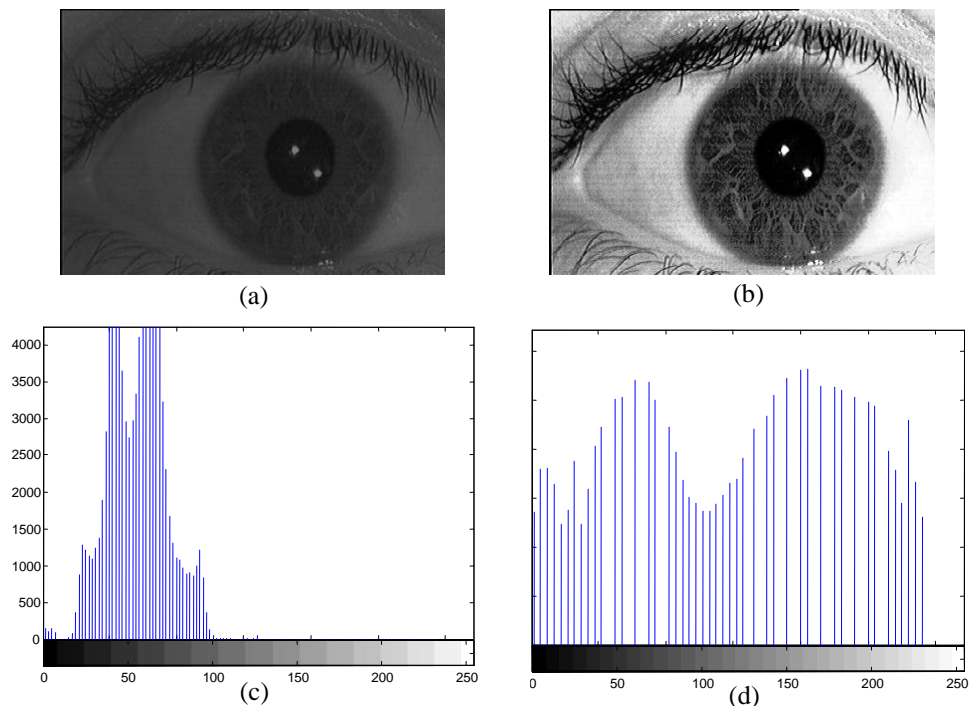


Figura 56: Exemplo: (a) imagem original, (b) imagem submetida à equalização de histograma e (c, d) seus respectivos histogramas.

A.5 LIMIAZIZAÇÃO (THRESHOLDING)

A *limiarização* é usada para segmentar uma imagem colocando todos os pixels cujos valores estão acima de um limiar (*threshold*) para um valor do objeto em primeiro plano (*foreground*) e os demais pixels para um valor de fundo (*background*) (GONZALEZ & WOODS, 2001).

O operador de *limiarização* convencional usa um limiar *global* para todos os pixels, ao contrário do operador *adaptativo* que altera dinamicamente o limiar de acordo com a região da imagem, podendo acomodar mudanças nas condições de iluminação na imagem, como por exemplo, aquelas que ocorrem como resultado de um forte gradiente de iluminação ou sombras.

Geralmente uma imagem em tons de cinza é tomada como entrada e, numa implementação mais simples, uma imagem binária na saída representa a segmentação em função de um valor de limiar adotado. No caso da *limiarização global*, se o valor do pixel está abaixo do limiar (T) ele é ajustado para o valor de fundo, caso contrário ele assume o valor de primeiro plano (objeto). Quando os níveis de cinza encontram-se divididos basicamente em duas classes, o que corresponde a um histograma que apresenta dois picos distintos (um referente ao objeto e outro ao fundo), a escolha do limiar (T) é mais intuitiva; Figura 57.

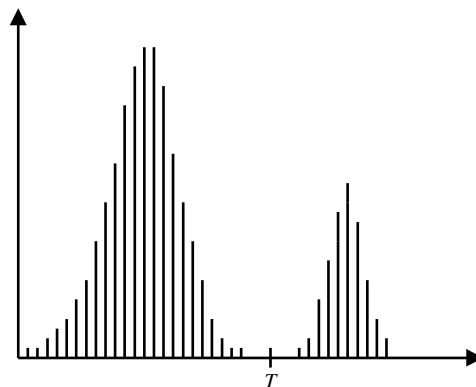


Figura 57: Histograma em níveis de cinza de uma imagem composta de objeto claro com um fundo escuro, que pode ser separado por um limiar único [Fonte: (GONZALEZ & WOODS, 2001)].

Para encontrar o limiar, são duas as principais abordagens: *Chow e Kaneko* e *limiarização local* (GONZALEZ & WOODS, 2001). Ambos os métodos partem da suposição que pequenas regiões da imagem provavelmente tem iluminação aproximadamente uniforme, sendo então mais apropriadas para a *limiarização*. Na primeira abordagem uma imagem é

dividida em um arranjo de sub-imagens sobrepostas e então se encontra um limiar ótimo para cada sub-imagem através da análise do histograma. O limiar para cada pixel é encontrado interpolando-se os resultados das sub-imagens. Por tratar-se de um método que tem um custo computacional elevado, sua desvantagem é que ele não é adequado para aplicações em tempo-real.

Uma alternativa é a abordagem que, para encontrar o limiar local, examina estatisticamente os valores dos pixels da vizinhança de cada pixel. O dado estatístico mais apropriado depende muito do tipo da imagem de entrada. Funções simples e rápidas incluem a *média* de uma distribuição de intensidade local, a *mediana* ou ainda a média entre os valores máximo e mínimo.

O tamanho da vizinhança tem que ser grande o bastante para cobrir uma quantidade suficiente de pixels do objeto e do fundo, do contrário um limiar inadequado pode ser escolhido. Por outro lado, escolhendo regiões muito grandes pode-se violar a suposição de iluminação aproximadamente uniforme. Este método apresenta bons resultados para algumas aplicações, com a vantagem de ser computacionalmente menos pesado que a abordagem anterior.

Assim como a *limiarização global*, a *adaptativa* é usada para separar imagens de objetos em primeiro plano do fundo, baseado na diferença de intensidade dos pixels de cada região. A *limiarização global* utiliza um limiar fixo para todos os pixels na imagem e então funciona somente se o histograma da imagem de entrada contém picos separados correspondendo ao(s) objeto(s) desejado(s) e ao fundo. Portanto, esta técnica de limiarização não deve ser aplicada a imagens contendo uma forte variação na iluminação. Já a *limiarização adaptativa* seleciona um limiar individual para cada pixel, baseado na faixa de valores de intensidade na sua vizinhança local.

APÊNDICE B - Operadores e Transformações Morfológicas

B.1 DILATAÇÃO (Dilatation) - δ

A *dilatação* (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) é um dos dois operadores básicos na área de *Morfologia Matemática*, sendo o outro *erosão*. Tipicamente aplicado a imagens binárias, mas também há versões que trabalham em tons de cinza. O efeito básico do operador em uma imagem binária é aumentar gradualmente as fronteiras do objeto, Figura 58. Então a área do objeto cresce em tamanho enquanto que os buracos dentro do objeto tornam-se menores.

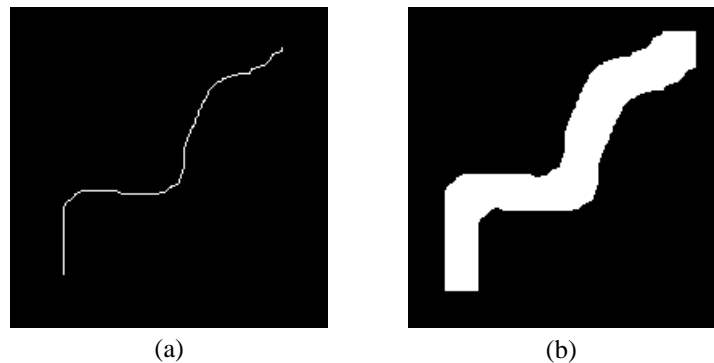


Figura 58: Dilatação (imagem binária): (a) imagem original e (b) imagem após a dilatação.

O operador *dilatação* tem como entradas uma imagem (t) a ser dilatada e um conjunto usualmente pequeno de pixels conhecido como *elemento estruturante* (EE). É este EE que determina o efeito da *dilatação* na imagem de entrada.

A definição matemática da *dilatação* para imagens binárias é a seguinte:

Seja X um conjunto que corresponde à imagem de entrada, e K o EE ;

$(K)_x$ é a translação de K sobre sua origem x ;

\hat{K} é a reflexão de K ;

Então a *dilatação* de X por K é simplesmente o conjunto de todos os pontos x tal que a interseção de $(\hat{K})_x$ com X é diferente de \emptyset (conjunto vazio), ou seja:

$$X \oplus K = \delta_K(X) = \{x \mid (\hat{K})_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (40)$$

Para imagens em tons de cinza, a definição matemática da *dilatação* é a seguinte:

Seja $F(x, y)$ uma função que corresponde à imagem de entrada, e $K(x, y)$ o EE , e também uma função subimagem;

F e K são funções que atribuem um valor de nível de cinza para cada par de coordenadas distintas (x, y) ;

Então a *dilatação* em tons de cinza de F por K é definida como:

$$(F \oplus K)(s, t) = \max\{ F(s-x, t-y) + K(x, y) \mid (s-x), (t-y) \in D_F; (x, y) \in D_K \} \quad (41)$$

onde D_F e D_K são os domínios de F e K , respectivamente.

As condições para definição da *dilatação* em tons de cinza e binária são análogas. Para tons de cinza, os parâmetros deslocados $(s-x)$ e $(t-y)$ tem que estar contidos no domínio de F , o que corresponde à sobreposição de pelo menos um elemento dos dois conjuntos, no caso da *dilatação* binária.

Uma função unidimensional (1D) pode ser utilizada para descrever o mecanismo dado pela equação 41, que fica reduzida a expressão:

$$(F \oplus K)(s) = \max\{ F(s-x) + K(x) \mid (s-x) \in D_F \text{ e } x \in D_K \} \quad (42)$$

A Figura 59 ilustra a *dilatação* de F pelo deslizamento de K . Em 59(a) e (b) são apresentadas a função F e o EE K , respectivamente. Em 59(c) está ilustrado o deslizamento de K sobre F , e em 59(d) o resultado da *dilatação*.

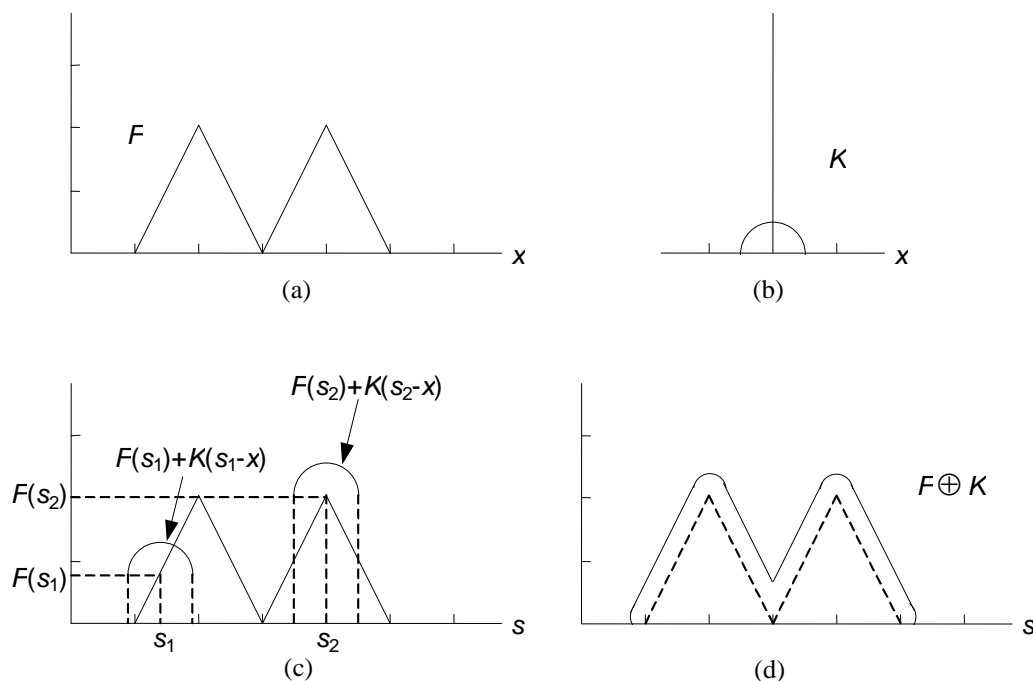


Figura 59: Dilatação em tons de cinza: (a) função F , (b) elemento estruturante K , (c) deslizamento do EE sobre a função e (d) resultado após a dilatação [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)].

A *dilatação* em tons de cinza geralmente clareia a imagem, como pode ser observado na Figura 60. Regiões claras rodeadas por regiões escuras crescem em tamanho, enquanto regiões escuras rodeadas por regiões claras se contraem. Pequenos pontos escuros desaparecem enquanto os claros tornam-se maiores. O efeito é mais intenso em locais da imagem onde a intensidade muda rapidamente e regiões de intensidade razoavelmente uniforme não sofrerão mudanças exceto em suas bordas.



Figura 60: Exemplo do efeito da *dilatação* em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem após a *dilatação*.

B.2 EROSÃO (Erosion) - ε

Assim como a *dilatação*, a *erosão* (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) é outro operador básico na área de *Morfologia Matemática*, tipicamente aplicado a imagens binárias, mas assim como para a *dilatação*, existem versões para tons de cinza. Seu efeito básico em uma imagem binária é “corroer” as fronteiras do objeto, como apresentado na Figura 61. Então a área do objeto contrai em tamanho e os buracos dentro do objeto tornam-se maiores.



Figura 61: *Erosão* (imagem binária): (a) imagem original e (b) imagem após a *erosão*.

Analogamente à *dilatação*, as entradas da *erosão* são uma imagem e o *EE*, sendo que o efeito da *erosão* na imagem de entrada é determinado pelo *EE*.

A definição matemática da *erosão* para imagens binárias é a seguinte:

Seja X um conjunto que corresponde à imagem de entrada, e K o *EE*;

$(K)_x$ é a translação de K sobre sua origem x ;

Então a *erosão* de X por K é simplesmente o conjunto de todos os pontos x tal que a interseção de $(K)_x$ é um subconjunto de X , ou seja:

$$X \ominus K = \varepsilon_K(X) = \{x \mid (K)_x \subseteq X\} \quad (43)$$

A *erosão*, para imagens em tons de cinza, de F por K é definida como:

$$(F \ominus K)(s, t) = \min\{F(s+x, t+y) - K(x, y) \mid (s+x), (t+y) \in D_F; (x, y) \in D_K\} \quad (44)$$

onde D_F e D_K são os domínios de F e K , respectivamente.

As condições para definição da *erosão* em tons de cinza e binária são análogas. Para tons de cinza, os parâmetros deslocados $(s+x)$ e $(t+y)$ tem que estar contidos no domínio de F , o que corresponde à condição do *EE* ter que estar completamente contido pelo conjunto que está sendo erodido, no caso da *erosão* binária.

Para descrever o mecanismo dado pela equação (44), uma função 1D pode ser utilizada, reduzindo a expressão para:

$$(F \ominus K)(s) = \min\{F(s+x) - K(x) \mid (s+x) \in D_F \text{ e } x \in D_K\} \quad (45)$$

A Figura 62 ilustra o resultado da *erosão* da função F , apresentada na Figura 59(a), pelo *EE* K , apresentado em 59(b).

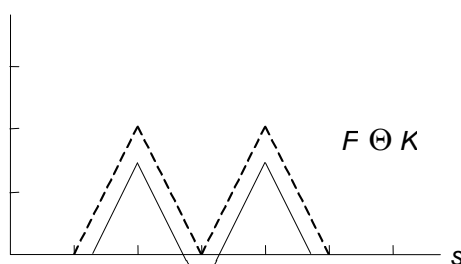


Figura 62: Resultado da *erosão* em tons de cinza de F pelo deslizamento de K [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)].

A *erosão* geralmente escurece imagens em tons de cinza, Figura 63. Regiões claras rodeadas por regiões escuras contraem em tamanho, enquanto regiões escuras rodeadas por regiões claras crescem. Pequenos pontos claros desaparecem enquanto os escuros tornam-se

maiores. Assim como na *dilatação*, o efeito é mais intenso em locais da imagem onde a intensidade muda rapidamente e regiões de intensidade razoavelmente uniforme não sofrerão tantas mudanças exceto em suas bordas.

A dilatação é a dual da erosão, isto é, aplicar dilatação aos pixels do objeto é equivalente a aplicar erosão aos pixels do fundo, equação (46).

$$X^c \oplus \hat{K} = (X \ominus K)^c \quad (46)$$



Figura 63: Exemplo do efeito da *erosão* em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem após a *erosão*.

B.3 ABERTURA (Opening) - γ

É um operador derivado dos operadores básicos: *dilatação* e *erosão*. Assim como os demais operadores são normalmente aplicados a imagens binárias, mas com versões em tons de cinza. A *abertura* (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) suaviza contornos, quebra istmos estreitos e elimina proeminências delgadas. O efeito do operador é preservar regiões do objeto que tem forma similar ao *EE*, ou que contém completamente o *EE*, enquanto elimina outras regiões do objeto, Figura 64.



Figura 64: *Abertura* (imagem binária): (a) imagem original e (b) imagem após a *abertura*.

A *abertura* é definida como uma *erosão* seguida por uma *dilatação*, ambas usando o mesmo EE , ou seja:

$$X \circ K = (X \ominus K) \oplus K \quad \text{ou} \quad \gamma_K(X) = \delta_K(\varepsilon_K(X)) \quad (47)$$

A expressão da *abertura* para imagens em tons de cinza tem a mesma forma da sua correspondente binária, ou seja, a *abertura* da imagem F pelo $EE K$ é dada por:

$$F \circ K = (F \ominus K) \oplus K \quad \text{ou} \quad \gamma_K(F) = \delta_K(\varepsilon_K(F)) \quad (48)$$

observando que a *erosão* e a *dilatação* são em tons de cinza.

Para melhor entender a operação de *abertura* de imagens em tons de cinza, pode-se lançar mão de uma interpretação geométrica. Suponha uma função imagem $F(x, y)$ vista em uma perspectiva tridimensional (3D), como por exemplo, um mapa de relevo, onde os eixos x e y dão as coordenadas espaciais e o terceiro eixo o brilho, isto é, o valor de F . Nesta representação, a imagem aparece como uma superfície discreta, cujo valor em qualquer ponto (x, y) é correspondente ao valor de F nessas coordenadas.

Para ilustrar a interpretação geométrica, F será submetida a uma *abertura* por um EE esférico K , que será visto como uma “bola rolando”. Isto equivale a um processo de empurrar a bola contra o lado de inferior da superfície, e ir rolando de forma que este lado inteiro da superfície seja atravessado. Então, a *abertura* corresponde ao mais alto ponto alcançado por qualquer parte da esfera, enquanto a mesma desliza sobre toda extensão da face inferior de F .

Este conceito é ilustrado na Figura 65, onde 65(a) mostra uma linha de uma imagem em tons de cinza como uma função contínua para simplificar a ilustração. 65(b) mostra a bola rolando em diversas posições, e em 65(c) o resultado da *abertura* de F por K ao longo da linha. Os picos estreitos, com relação ao diâmetro da esfera, têm sua amplitude e nitidez reduzidas.

A *abertura* geralmente é aplicada para remover pequenos detalhes claros, quando comparados ao tamanho do EE , enquanto deixa os níveis de cinza e características maiores relativamente estáveis, Figura 66. A *erosão* inicial remove os pequenos detalhes, mas também escurece a imagem. Em seguida a *dilatação* aumenta novamente a claridade (brilho) da imagem sem reintroduzir os detalhes removidos pela *erosão*.

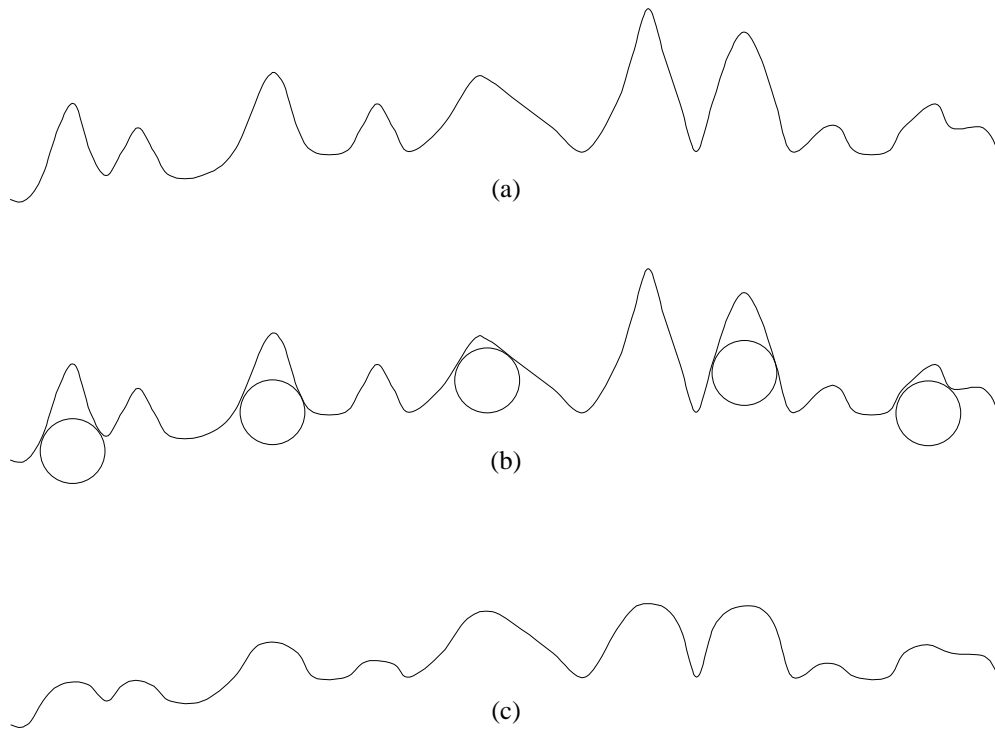


Figura 65: *Abertura* em tons de cinza: (a) função contínua representando uma imagem, (b) *EE* esférico em diversas posições e (c) resultado após a *abertura* [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)].



Figura 66: Exemplo do efeito da *abertura* em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem após a *abertura*.

B.4 FECHAMENTO (Closing) - ϕ

Também é um operador derivado dos operadores básicos: *dilatação* e *erosão*, e assim como os demais são normalmente aplicados a imagens binárias, mas com versões em tons de cinza. O *fechamento* (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) funde pequenas quebras, alarga vales

estreitos, elimina pequenos buracos e preenche falhas (gaps) no contorno. O efeito do operador é preservar regiões do fundo que tem forma similar ao EE , ou que podem conter completamente o EE , enquanto eliminam outras regiões do fundo, Figura 67.



Figura 67: *Fechamento* (imagem binária): (a) imagem original e (b) imagem após o *fechamento*.

O *fechamento* é definido como uma *dilatação* seguida por uma *erosão*, ambas usando o mesmo EE , ou seja:

$$X \bullet K = (X \oplus K) \ominus K \quad \text{ou} \quad \varphi_K(X) = \varepsilon_K(\delta_K(X)) \quad (49)$$

O *fechamento* é o dual da *abertura*, isto é, aplicar *abertura* aos pixels do objeto com um determinado EE é equivalente a aplicar *fechamento* aos pixels do fundo com o mesmo EE .

A definição de *fechamento* também pode ser usada para imagens em tons de cinza, assim como a *abertura*, observando apenas que a *dilatação* e a *erosão* são em tons de cinza. A expressão do *fechamento* para imagens em tons de cinza tem a mesma forma da sua correspondente binária, ou seja, o *fechamento* da imagem F pelo EE K é dada por:

$$F \bullet K = (F \oplus K) \ominus K \quad \text{ou} \quad \varphi_K(F) = \varepsilon_K(\delta_K(F)) \quad (50)$$

Assim como para a *abertura*, uma interpretação geométrica pode ser utilizada para o *fechamento*. O conceito difere do da *abertura*, pois no *fechamento* a bola desliza sobre o lado superior da superfície. Os picos permanecem inalterados, desde que sua separação ao ponto mais estreito exceda o diâmetro da bola.

O conceito está ilustrado na Figura 68, onde 68(a) mostra uma linha de uma imagem em tons de cinza, 68(b) a bola rolando em diversas posições, e 68(c) o resultado do *fechamento* de F por K ao longo da linha.

O *fechamento* é geralmente usado para remover pequenos detalhes escuros da imagem, enquanto deixa características claras relativamente estáveis – Figura 69. A *dilatação* inicial remove detalhes escuros e clareia a imagem, em seguida a *erosão* escurece a imagem sem reintroduzir os detalhes removidos pela *dilatação*.

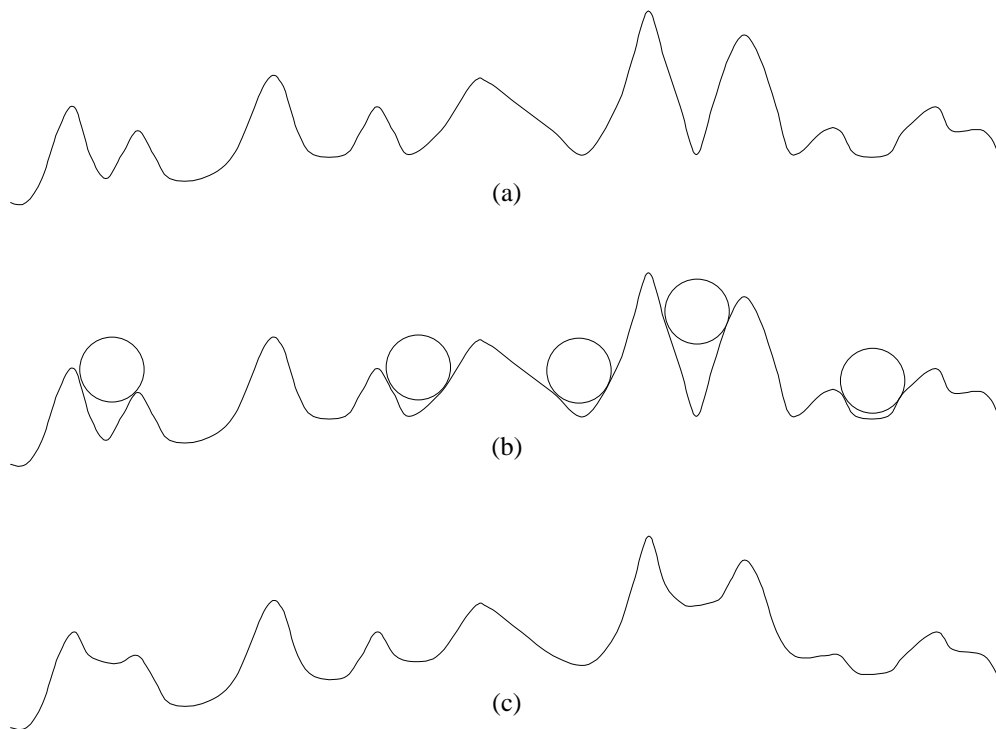


Figura 68: *Fechamento* em tons de cinza: (a) função contínua representando uma imagem, (b) *EE* esférico em diversas posições e (c) resultado após o *fechamento* [Fonte: adaptado de (GONZALEZ & WOODS, 2001)].



Figura 69: Exemplo do efeito do *fechamento* em tons de cinza: (a) imagem original e (b) imagem após o *fechamento*.

B.5 TRANSFORMAÇÃO *HIT-OR-MISS* - *hmt*

A transformação *hit-or-miss* (SERRA, 1988; SOILLE, 2003) é uma operação morfológica genérica que pode ser usada para encontrar determinados padrões em orientações fixas, de pixels do objeto e do fundo em uma imagem. Também pode ser usada para procurar

vários padrões (ou alternativamente pelo mesmo padrão em várias orientações) simplesmente rodando sucessivas transformações usando diferentes *EEs*, e então fazendo uma operação lógica “OU” entre os resultados. Ela é a operação básica da morfologia binária visto que todos os outros operadores morfológicos binários podem ser derivados dela. Assim como os demais operadores morfológicos binários ela toma como entrada uma imagem binária e um *EE*, e produz outra imagem binária como saída.

O *EE* usado no *hit-or-miss* pode ser considerado como uma extensão do tipo de *EE* que foi introduzido para a erosão e dilatação, sendo que ele pode conter pixels do objeto e do fundo, ao invés de pixels do objeto apenas.

O tipo mais simples de *EE* usado com a erosão e com a dilatação é frequentemente descrito como contendo ambos *uns* e *zeros*, mas naquele caso os *zeros* representam realmente “*não interessa*” (*don't care*), e são usados apenas para preencher o *EE* para um formato de núcleo conveniente. Na Figura 70 é mostrado um tipo estendido de *EE*, onde os *uns* denotam pixels do objeto, os *zeros* pixels do fundo e os espaços em branco os “*não interessa*”.

	1	
0	1	1
0	0	

Figura 70: Exemplo de tipo estendido de *EE* usado na operação de *hit-or-miss*.

A operação *hit-or-miss* é executada da mesma forma que outros operadores morfológicos, pela translação da origem do *EE* por todos os pontos da imagem, e então comparando o *EE* com os pixels da imagem que estão por baixo dele. Se os pixels do objeto e do fundo no *EE* coincidem exatamente com os pixels do objeto e do fundo na imagem, então o pixel abaixo da origem do *EE* recebe o valor do pixel do objeto, caso contrário, ele receberá o valor do pixel do fundo.

A expressão generalizada para a operação *hit-or-miss* é dada por:

$$X \otimes K = (X \ominus K_1) \cap (X^c \ominus K_2) \quad \text{ou} \quad hmt_B(F) = (\varepsilon_{B_1}(F)) \cap (\varepsilon_{B_2}(F^c)) \quad (51)$$

onde K_1 (ou B_1) é o conjunto formado por elementos de K (ou de B) associados ao objeto, K_2 (ou B_2) é o conjunto formado por elementos de K (ou de B) associados ao fundo e X^c (ou F^c) é o complemento de X (ou F). A operação *hit-or-miss* resulta num conjunto de pontos

(coordenadas) nos quais, simultaneamente, K_1 (ou B_1) encontra uma correspondência (*hit*) em X (ou F) e K_2 (ou B_2) encontra uma correspondência em X^c (ou F^c).

O *EE* mostrado na Figura 70 pode ser usado para encontrar os pontos de canto em ângulo reto convexo em imagens. Os pixels neste elemento têm o formato de um canto convexo inferior esquerdo. Para encontrar todos os cantos em uma imagem binária são necessárias quatro passagens, cada uma com um elemento diferente, representando um dos quatro tipos de cantos com ângulo reto. A Figura 71 mostra os quatro elementos usados nesta operação, que na realidade são o mesmo elemento apenas com três rotações consecutivas de 90° .

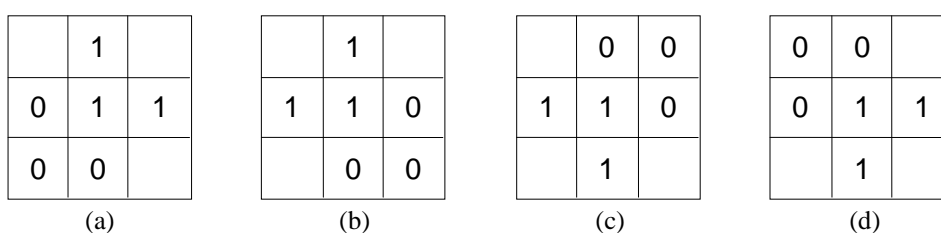


Figura 71: Os *EEs* usados para encontrar cantos em ângulo reto nas quatro orientações, usando a operação *hit-or-miss*.

Depois de obter a localização dos cantos em todas as orientações, pode ser feita uma operação lógica “ou” entre todas estas imagens para conseguir o resultado final, mostrando a localização dos cantos em ângulo reto convexo em qualquer orientação. Na Figura 72(a) é apresentada a estrutura original e em (b) o resultado obtido após a aplicação do operador.

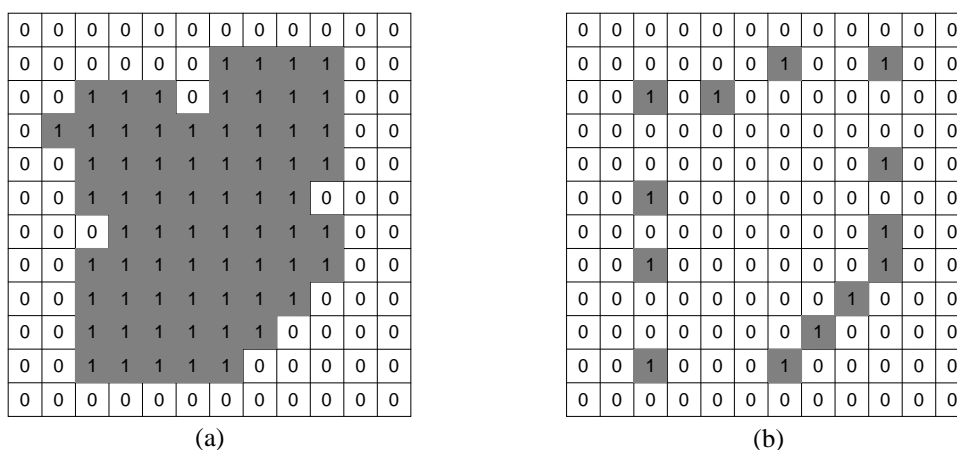


Figura 72: Localização dos cantos através da operação *hit-or-miss*: (a) imagem original e (b) imagem onde os cantos em qualquer orientação foram localizados.

A transformação *hit-or-miss* tem muitas aplicações em operações morfológicas mais complexas. Ela pode ser usada para construir os operadores *afinamento* (*thinning*) e

operação de *afinamento* pode ser expressa em função da transformação *hit-or-miss* como a seguir:

$$X \text{ thin } K = X - X \text{ hmt } K \quad (52)$$

onde a subtração é uma *subtração lógica* definida por $X - Y = X \cap Y^c$, portanto:

$$X \text{ thin } K = X \cap (X \text{ hmt } K)^c \quad (53)$$

Em condições usuais, o *afinamento* é calculado pela translação da origem do *EE* para cada posição de pixel possível na imagem. Para cada posição é feita uma comparação pixel a pixel, entre o *EE* e os pixels da imagem que estão abaixo dele. Se os pixels do objeto e do fundo no *EE* coincidem exatamente com os pixels do objeto e do fundo na imagem, então o pixel abaixo da origem do *EE* recebe o valor do pixel do fundo. Caso contrário é deixado inalterado. Para que a operação surta efeito a origem do *EE* deve ter sempre um **1** ou um *espaço em branco* ('*não interessa*'). A escolha do *EE* determina sobre que situações um pixel do objeto receberá o valor do pixel do fundo, e conseqüentemente determina a aplicação para a operação de *afinamento*.

A descrição acima se refere aos efeitos de uma única passagem de uma operação de *afinamento* sobre uma imagem. De fato, o operador é normalmente aplicado repetidamente até que não cause nenhuma mudança adicional à imagem, isto é, até a convergência. A Figura 74 mostra um exemplo da aplicação do operador *afinamento* para obter a *esqueletonização*. Na Figura 74(a) a estrutura original e em (b) o resultado obtido após a aplicação do operador.

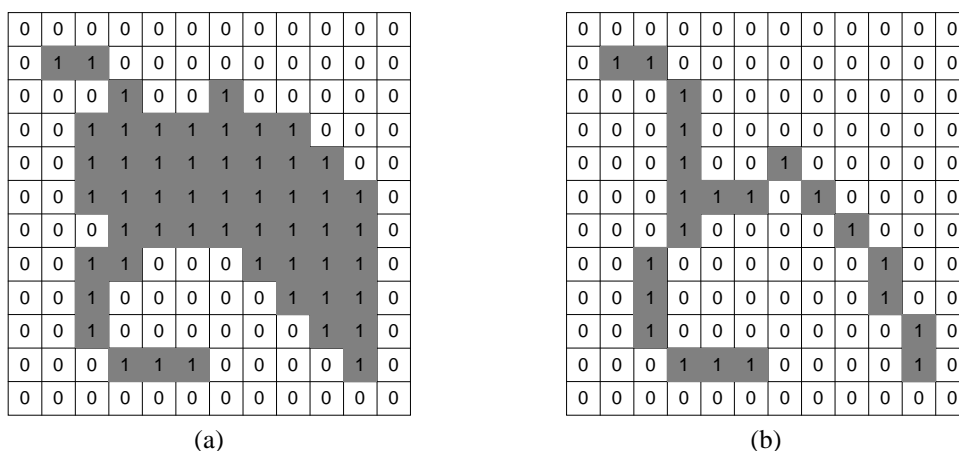


Figura 74: *Esqueletonização*: (a) imagem original e (b) imagem obtida após a aplicação do operador *afinamento*.

B.7 COMPONENTE CONECTADO

Dois pixels de um sub-conjunto Y de uma imagem estão conectados em Y se existe um caminho entre eles formado exclusivamente por pixels pertencentes a Y . Então, um *componente conectado* é o conjunto de pixels em Y que estão conectados a um pixel qualquer (em Y). Portanto, como em um *componente conectado* quaisquer dois pixels estão conectados um ao outro, *componentes conectados* distintos são *disjuntos* (GONZALEZ & WOODS, 2001).

Na análise automatizada de imagens, a capacidade de atribuir rótulos diferentes para diversos *componentes conectados* é uma característica muito importante. Duas abordagens são usuais para extrair *componentes conectados*: a convencional e a baseada em morfologia matemática (GONZALEZ & WOODS, 2001).

B.7.1 Abordagem Convencional para extração de Componentes Conectados

O processo tem início com a varredura da imagem, da esquerda para a direita e de cima para baixo, pixel por pixel. Os vizinhos que serão examinados dependem do tipo de conectividade desejada. Na Figura 75(a) para conectividade-4, examinam-se os pixels r e t , e em (b) para conectividade-8, examinam-se q , r , s e t .

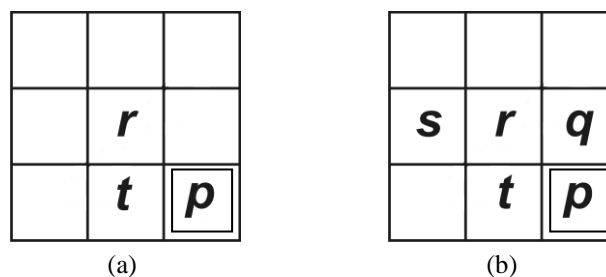


Figura 75: Componente conectado (abordagem convencional).

A seguir são descritos os procedimentos para conectividade-4 e conectividade-8.

B.7.1.1 Conectividade-4

- se $p = 0$: mover para o próximo pixel;
- se $p = 1$: examinar r e t :
 - a) se $r = t = 0$, atribuir um novo rótulo para p ;

- b) se um dos dois vizinhos é 1, atribuir seu rótulo para p ;
- c) se $r = t = 1$ e tem o mesmo rótulo, atribuir este rótulo para p ;
- d) se $r = t = 1$ e tem rótulos diferentes, atribuir um dos rótulos para p e fazer uma nota que os dois rótulos são equivalentes (isto é, os pontos r e t estão conectados através de p);
- colocar todos pares de rótulos equivalentes em classes de equivalência e atribuir diferentes rótulos para cada classe;
- substituir cada rótulo pelo rótulo atribuído à sua classe de equivalência.

B.7.1.2 Conectividade-8

- se $p = 0$: mover para o próximo pixel;
- se $p = 1$: examinar q, r, s e t :
 - a) se $q = r = s = t = 0$, atribuir um novo rótulo para p ;
 - b) se um dos vizinhos é 1, atribuir seu rótulo para p ;
 - c) se dois ou mais vizinhos são 1, atribuir um dos rótulos para p e fazer uma nota que os dois rótulos são equivalentes;
 - d) se $q = r = s = t = 1$ e tem o mesmo rótulo, atribuir este rótulo para p ;
- colocar todos pares de rótulos equivalentes em classes de equivalência e atribuir diferentes rótulos para cada classe;
- substituir cada rótulo pelo rótulo atribuído à sua classe de equivalência.

B.7.2 Abordagem baseada em Morfologia para extração de Componentes Conectados

Operadores morfológicos podem ser utilizados para extrair componentes conectados e rotulá-los, podendo ser implementados de diversas maneiras. Um método simples, para extrair componentes conectados de uma imagem, combina o operador dilatação com a operação de interseção. Primeiramente identificam-se os pixels que são parte de uma região contínua pertencentes a um conjunto comum de valores de intensidade $V=\{1\}$, e depois se eliminam as dilatações centradas em pixels com $V=\{0\}$. O elemento estruturante (EE) usado define a conectividade desejada.

Seja A um conjunto e Y um componente conectado (sub-conjunto de A) e p um ponto conhecido, pertencente a Y . A expressão iterativa que leva a todos os elementos de Y , é dada por:

$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (54)$$

onde $X_0 = p$ e B é o EE .

Apesar do método descrito anteriormente aplicar-se a imagens binárias, os operadores morfológicos básicos (dilatação, erosão, abertura e fechamento) também são definidos para imagens em tons de cinza, dando origem a vários algoritmos morfológicos básicos.

Outros métodos mais sofisticados incluem um conjunto de funções *geodésicas* para medidas do formato exato de objetos distintos em uma imagem. Estes operadores são baseados na noção de *distância geodésica*, que é definida como a menor distância entre dois pontos localizados dentro de um objeto, tal que o caminho inteiro entre os pontos está incluído no objeto. Uma forma de obter esta informação é aplicar uma série de dilatações de tamanho 1 (SERRA, 1988; SOILLE, 2003).

APÊNDICE C - Sistema Automatizado para Captura de Imagens do Olho

C.1 DESCRIÇÃO

O sistema automatizado de captura tem por finalidade a aquisição de imagens dos olhos, com a mínima interferência do operador e do usuário no processo. O sistema permitirá ao operador monitorar a aquisição das imagens em tempo real e interagir com o usuário caso necessário. Dentre as tarefas que serão realizadas pelo sistema, estão: o disparo da câmera, a contagem dos tempos envolvidos no processo, o acionamento dos dispositivos de iluminação (IR e visível), o ajuste de foco, o controle dos motores para o posicionamento da câmera, entre outras. A interface de acoplamento do sistema possibilitará o posicionamento dos dois olhos simultaneamente para que o usuário permaneça com a cabeça em uma única posição durante todo o processo de captura.

A Figura 76 apresenta o diagrama do circuito responsável pelo controle do disparo, foco e posicionamento da câmera, da temporização e da iluminação.

C.2 FUNCIONAMENTO

O circuito possui dois motores de passo unipolares que fazem o posicionamento da câmera, sendo um deles responsável pelo deslocamento linear para aquisição de imagens de ambos os olhos (esquerdo e direito), e o outro pelo deslocamento angular (nos sentido horário e anti-horário) para aquisição de imagens sujeitas à rotação. O controle do circuito é feito por um microcontrolador PIC18F4550 (<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010300#1>) da *Microchip*, escolhido, entre outras características, por possuir interface de comunicação USB. O *clock* do circuito é fornecido por um cristal de 12MHz. Para fazer a interface do microcontrolador com os motores de passo foram utilizados dois CIs ULN2003A, que são *drivers* de corrente, pois a saída do PIC18F4550 não fornece a corrente necessária para alimentar os motores.

Para controlar o posicionamento da câmera, através dos motores de passo, e os dispositivos de iluminação foi desenvolvido um programa no LabView, que se comunica com o PIC18F4550 através da porta USB.

C.3 LÓGICA DE CONTROLE

O programa de controle criado no LabView recebe as imagens da câmera e através de um “botão” na tela é possível deslocar a mesma para se posicionar para captura das imagens do olho. Ao clicar no “botão” um comando é enviado via protocolo USB para o microcontrolador que aciona o motor de passo que faz o deslocamento linear. Uma vez posicionada a câmera é disparada para dar início a captura da sequência de imagens do olho e o dispositivo de iluminação IR é acionado. Depois de alguns segundos o pulso de luz visível é acionado para provocar a dilatação da pupila. Em seguida o motor de passo que faz o deslocamento angular é acionado e a câmera começa a girar. Inicialmente ela se desloca no sentido horário e depois no anti-horário, podendo rotacionar até 60° em cada sentido. Após terminada a aquisição da sequência de imagens, a câmera pode ser reposicionada para dar início a captura das imagens do outro olho.

C.4 MONITORAMENTO DA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS

Para fazer o monitoramento do processo de captura das imagens do olho foram utilizados o NI-IMAQ, que é um *driver* utilizado para aquisição de imagens, e o NI-VISION, que é um módulo de desenvolvimento utilizado para adquirir, exibir e processar imagens, sendo ambos compatíveis com o LabView.

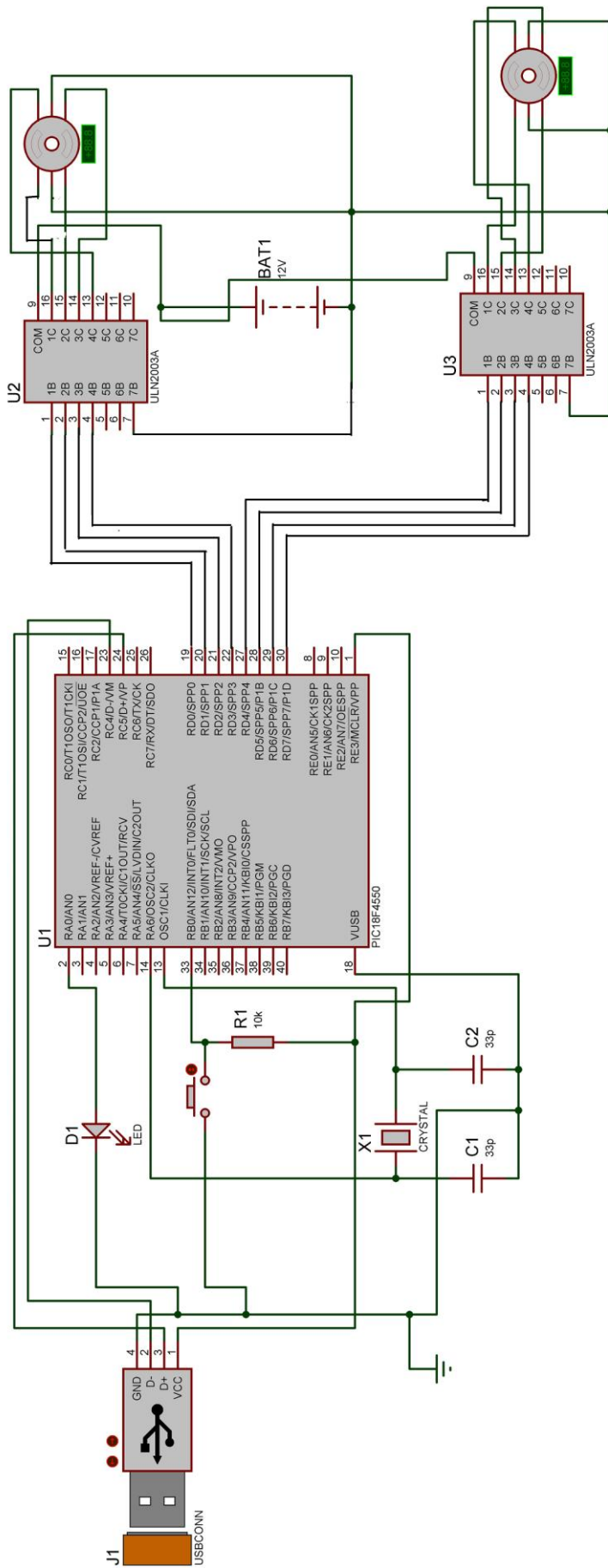


Figura 76: Circuito de controle baseado no microcontrolador PIC18F4550.

APÊNDICE D - Iluminação e Procedimento de Captura

D.1 ILUMINAÇÃO

A iluminação da região do olho durante o processo de aquisição da imagem tem por objetivo garantir um nível de contraste suficiente entre os elementos visíveis do olho (pupila, íris, esclera, cílios e pálpebras), essencial para a segmentação da região de interesse. Por outro lado, mudanças na intensidade luminosa causam variações no tamanho da íris em função do movimento da pupila e por consequência alteram sua textura, deformando as estruturas nela existentes.

A fim de estudar os efeitos causados nos padrões da íris pelos movimentos de dilatação e contração, será necessário dispor de um conjunto de imagens que apresentem variações no grau de dilatação da pupila. Para tanto, será montado um dispositivo para iluminação da íris, composto por um conjunto de LEDs IR e brancos (emissão de luz visível). A iluminação IR, além de não estimular a pupila, é utilizada com a finalidade de capturar imagens da íris com sua textura mais nítida do que é possível com o uso de luz visível. Para estimular a contração e dilatação da pupila é necessário o uso de luz visível durante a captura, com o benefício adicional de proteger a córnea restringindo a quantidade de luz incidente. O dispositivo de iluminação será provido de um “ajuste”, através do qual será possível variar a intensidade luminosa da luz visível, permitindo assim o controle do tamanho do diâmetro da pupila.

Uma vez que a exposição a raios infravermelho pode causar lesões no olho, alguns cuidados devem ser tomados tanto na realização da captura das imagens, quanto na confecção e utilização do dispositivo de iluminação. De acordo com os procedimentos definidos para realização da captura diversos parâmetros como iluminância, intensidade de radiação, distância, posição e tempo de exposição, devem ser considerados para o cálculo da luminância máxima permitida. A norma ANSI/ESNA RP.27.1-05 (*Recommended Practice for Photobiological Safety for Lamps and Lamp Systems – General Requirements*) especifica o valor da luminância máxima permitida para exposição, tanto para os LEDs IR quanto para os LEDs brancos.

No caso dos LEDs IR, de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante para o valor de intensidade de radiação e com o posicionamento em relação ao olho, o valor de luminância poderá ser determinado levando em conta os demais parâmetros relevantes para

realização da captura. Os LEDs brancos utilizados para estimulação da pupila geralmente emitem luz na faixa de 400 a 700nm e possuem poucas ou nenhuma componente espectral nas regiões do infravermelho e ultravioleta. Assim como para os LEDs IR, o valor da luminância máxima permitida deverá ser determinado para os LEDs brancos, considerando os critérios pertinentes à sua utilização.

Para calcular a potência incidente no olho, pode-se utilizar o modelo apresentado na Figura 77 (SUESS & MORISON, 1989). O modelo leva em conta que o olho está a uma distância D da fonte de iluminação IR, que se encontra posicionada no vértice de um cone cuja potência emitida se concentra numa abertura de ângulo α . Através da equação (55) pode-se calcular a potência incidente por unidade de área, onde P_o é a potência óptica emitida pela fonte de IR em watts, D é a distância entre a fonte de iluminação e o olho e α é o ângulo de abertura do cone de iluminação.

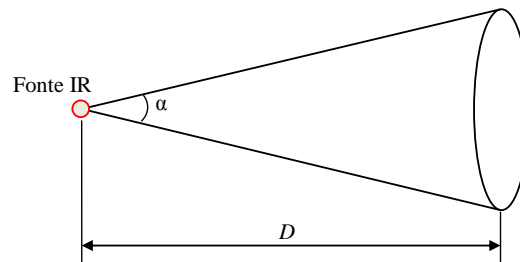


Figura 77: Modelo para cálculo da potência incidente no olho.

$$P = \frac{P_o}{\pi \cdot \left(D \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right)^2} \quad (55)$$

Para se evitar a influência da iluminação ambiente (p.ex. reflexões), que pode interferir no diâmetro da pupila, pretende-se criar uma cobertura para proteger o conjunto câmera, dispositivo de iluminação e olho, permitindo assim um controle mais efetivo da variação do tamanho da pupila. Outra possibilidade seria a utilização de um filtro (*daylight cut-off filter*) para remover as reflexões causadas pela luz natural e outras fontes de luz do ambiente, mas que no entanto não evitaria a interferência destas fontes no diâmetro da pupila. Outro aspecto a ser considerado diz respeito às sombras, que geralmente aparecem sobre a íris devido aos cílios e cujo surgimento pode ser evitado com o correto posicionamento do dispositivo de iluminação. Também precisa ser levada em conta a reflexão especular, que deve ficar restrita à região da pupila para evitar a perda de informações de textura da íris devido ao aparecimento de manchas brilhantes.

D.2 PROCEDIMENTO DE CAPTURA DAS IMAGENS

O procedimento para aquisição das imagens do olho, para fins de estudo dos efeitos causados pelas variações no diâmetro da pupila, é semelhante ao descrito na subseção 5.4.4. No entanto, além daqueles fatores mencionados para aquisição típica das imagens, outros deverão ser considerados, pois neste caso a pupila terá que ser estimulada para produzir variações no seu diâmetro. Então, com este objetivo, deve-se determinar:

- como será feito o controle do incremento e a graduação dos níveis a serem ajustados para variar a intensidade de luz visível;
- como será feita a estimulação da pupila (através de variação gradual ou pulsada da iluminação visível);
- o tempo de resposta da pupila;
- o tempo de latência;
- o intervalo de exposição (parcial e total);
- qual a taxa de quadros que será utilizada, que implica diretamente no número de imagens com diferentes tamanhos de pupila (diâmetro).

Uma vez definidos os parâmetros de captura, em função dos requisitos necessários para a aquisição das imagens e segurança do usuário, a aquisição das imagens deverá seguir os protocolos definidos para realização desses procedimentos.

APÊNDICE E - Estudo das Características da Íris para Criação de um Modelo de Deformação

A seguir serão abordados alguns aspectos relacionados às deformações da textura da íris, entre eles: modelos de deformação, estimação de movimento e síntese de íris para realização de estudos com o objetivo de desenvolver um modelo de íris.

E.1 MODELOS DE DEFORMAÇÃO DA ÍRIS

Em geral, os sistemas de reconhecimento de íris apresentam um bom desempenho, mas ainda enfrentam um desafio quando se deparam com imagens com deformações causadas por variações na iluminação. Portanto, o desenvolvimento de métodos que minimizem os efeitos da deformação torna-se uma necessidade, uma vez que os requisitos de iluminação uniforme frequentemente não são uma realidade prática. Apesar dos sistemas de reconhecimento de íris terem sido objeto de inúmeros estudos realizados na última década, poucos trabalhos focam na questão da deformação.

Alguns métodos vêm sendo apresentados com o objetivo de corrigir as deformações não-lineares da íris. Wei e colaboradores (WEI *et al.*, 2007) propõem um algoritmo baseado num modelo Gaussiano para correção da deformação. Neste caso, considerando o estiramento não-linear da íris, assume-se que a distância de qualquer ponto nela localizado até a fronteira da pupila é correspondente à distância sob estiramento linear mais um desvio aditivo. A função Gaussiana é então aplicada para modelar tal desvio. Para compor a estrutura da íris é utilizado um modelo de *esqueleto de malhas (meshwork skeleton)*. Nesse modelo, uma série de arcos fibrosos (arcos à esquerda e arcos à direita) que conectam as fronteiras interna e externa da íris, são entrelaçados para formar sua estrutura, Figura 78. O modelo de malhas também é utilizado por YUAN & SHI (2005), onde algumas suposições são feitas, entre elas, que os ângulos que correspondem aos arcos fibrosos da íris são de 90° , e que os arcos fibrosos são parte do círculo cuja relação entre o estiramento linear e não-linear pode ser obtida resolvendo duas equações de circunferências. No método proposto por Wei tais restrições não são feitas porque o ângulo tenderia a permanecer constante e os arcos fibrosos permaneceriam como círculos durante as frequentes mudanças de diâmetro da pupila.

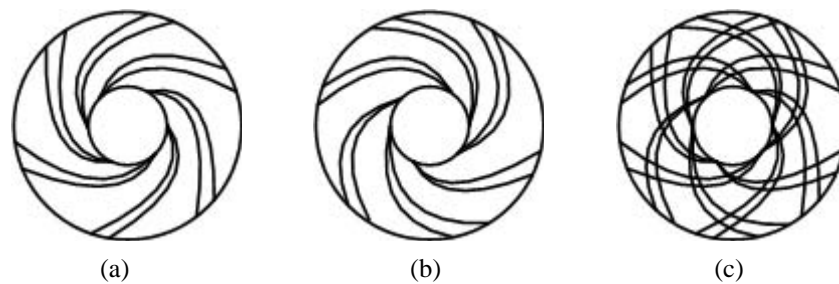


Figura 78: Modelo de malhas da íris. (a) arcos à esquerda, (b) arcos à direita e (c) modelo de malhas [Fonte: (WEI *et al.*, 2007)].

O método proposto por Thornton e colaboradores (THORNTON *et al.*, 2007) apresentam uma abordagem Bayesiana para o confronto de padrões deformados de imagens de íris. Ele combina num mesmo processo a estimação da deformação com a etapa de confronto, uma vez que visa não apenas o alinhamento, mas também a comparação dos padrões da íris. A partir de duas imagens obtém-se a *máxima probabilidade a posteriori* (MAP) estimada dos parâmetros da deformação relativa entre elas. O modelo de deformação utilizado para a implementação do algoritmo se baseia em campo de vetores, Figura 79, por ser apropriado para abordagens baseadas em correlação. Este modelo consiste de um conjunto de translações locais, como as especificadas pelo campo de vetores.

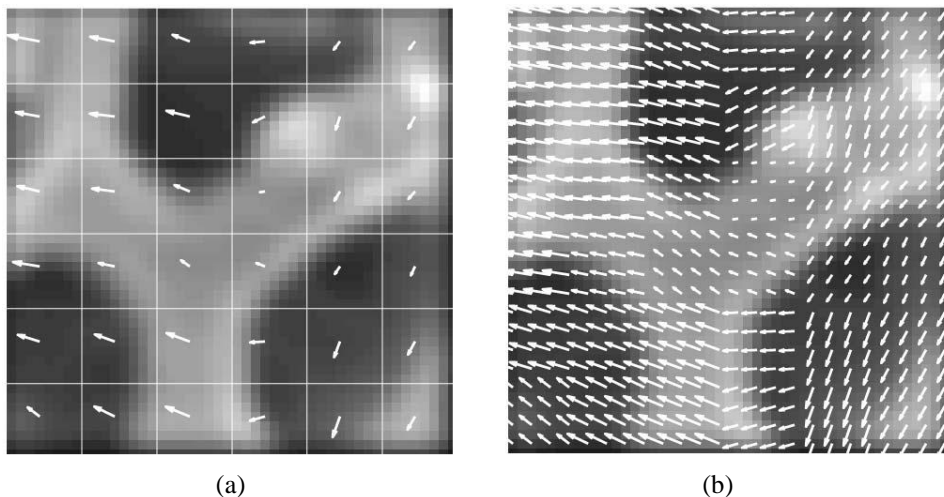


Figura 79: Ilustração do modelo de deformação em um padrão da amostra: (a) campo de vetores do bloco, (b) campo de vetores em nível de pixel [Fonte: (THORNTON *et al.*, 2007)].

Em outro trabalho, Kerekes e colaboradores (KEREKES *et al.*, 2007) utilizam um modelo gráfico tipo *lattice não-guiado* (*undirected lattice-type graphical model*) para modelar a deformação não-linear e a oclusão local em imagens de íris. Para representar a deformação é usado um campo de vetores direcionais e para a oclusão um campo de variáveis binárias. Uma

distribuição de probabilidade é imposta a estes campos, onde as interdependências entre regiões vizinhas da íris são representadas por grafos de bordas (*graph edges*). Segundo Karekes, a principal vantagem do modelo utilizado é a capacidade de calcular as distribuições sobre deformações locais ao invés de estimar pontos.

Phang e colaboradores (PHANG *et al.*, 2006) propõem um método para rastrear a deformação da superfície da íris usando confronto de grafo elástico (*elastic graph matching*). Um grafo de grade elástica circular é utilizado para rastrear o movimento radial e circular dos padrões da íris em função da atividade pupilar, causado por variações das condições de iluminação. Os resultados obtidos mostram que durante a contração da pupila a deformação da área da superfície da íris se dá principalmente na sua parte do meio. A Figura 80 mostra os resultados do rastreamento durante a contração da pupila.

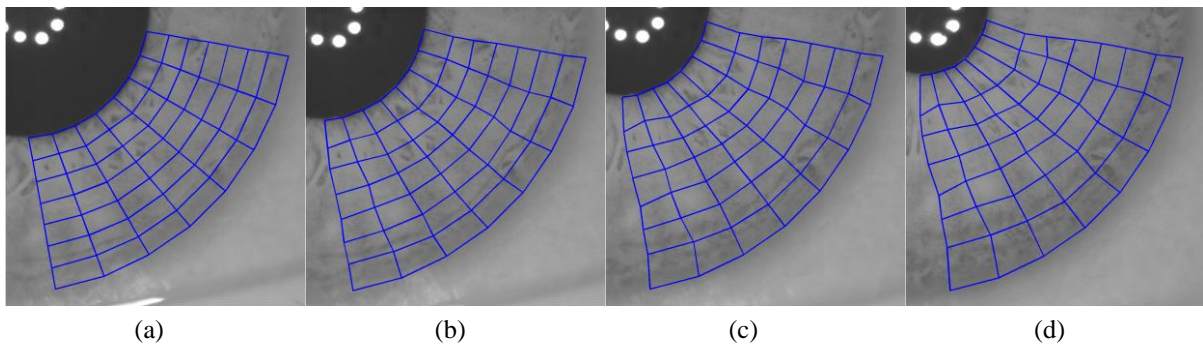


Figura 80: Rastreamento durante a contração da pupila. Grafo de progressão da deformação de (a), com a pupila dilatada, para (d) com a contraída [Fonte: (PHANG *et al.*, 2006)].

A abordagem morfológica apresentada no capítulo 4, utiliza um algoritmo baseado no modelo de movimento afim (*affine motion model*)⁴ (STILLER & KONRAD, 1999; BOVIK, 2000) para compensar os efeitos causados pela translação, rotação e escalamento, fazendo assim o alinhamento das estruturas da íris. A escolha deste modelo bidimensional (2D) para representar o movimento aparente estava mais focada nas características de movimento global das imagens adquiridas. No entanto, este modelo poderia ser utilizado para compensar os efeitos causados por deformações na textura da íris, consequentemente nas suas estruturas, desde que fosse implementada uma mudança de escala, ou seja, de movimento global para local.

A equação paramétrica (56) que descreve o movimento afim é composta por seis parâmetros, dos quais dois correspondem à translação (a_3 e b_3), e os outros quatro ao escalamento (a_1 e b_2) e rotação (a_2 e b_1).

⁴ A descrição do *modelo de movimento afim* encontra-se na subseção 3.4.2.

$$d(x) = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (56)$$

O algoritmo que faz a compensação dos efeitos causados por tais movimentos utiliza uma imagem como referência e a compara com outra que está sob análise. Esta comparação permite estimar o erro existente entre a posição original e a posição atual das estruturas. Inicialmente o algoritmo faz a procura pelo movimento de translação.

Uma vez encontrado o deslocamento translacional, o algoritmo passa para a procura dos movimentos de rotação e escalamento, que nesta etapa são estimados em conjunto. A associação destes dois movimentos é conhecida como transformação de forma, e está relacionada a variações no formato das estruturas. Sendo assim, esta transformação poderia ser utilizada para estimar os parâmetros que melhor representam os efeitos causados pelos referidos movimentos, para então compensar as deformações ocorridas nas estruturas da íris.

E.2 ESTIMAÇÃO DE MOVIMENTO

A estimação do movimento em sequências de imagens é uma técnica utilizada na compressão de vídeo em diversas normas e que permite melhorar a predição entre quadros adjacentes.

Os algoritmos para detectar movimento em imagem podem ser classificados em três tipos básicos:

- PRA (*Pixel Recursive Algorithms*) – algoritmos que fazem a pesquisa de movimento pixel a pixel. Geralmente os algoritmos deste tipo apresentam sua complexidade como uma desvantagem;
- Object Based ME – algoritmos que pesquisam o movimento de objetos. Estes algoritmos são normalmente utilizados para a identificação de objetos ou das suas fronteiras num quadro;
- Block-by-block ME – algoritmos de pesquisa de movimento em blocos de pixels. Este método de pesquisa de movimento é o mais comum e um dos mais usados, já que apresenta uma boa relação entre complexidade e resultado final.

Em qualquer problema de estimação de movimento as três questões chave são: a área a ser analisada, o processo de pesquisa de movimento e a métrica de erro. De acordo com a

área da região que será analisada e com o tipo de algoritmo utilizado, a demanda computacional pode variar bastante. Para tentar resolver o problema de determinar o melhor confronto (*match*) com o menor custo computacional, diversas técnicas têm sido propostas (NAMUDURI & JI, 2001). As métricas de erro, ou critérios de similaridade, são utilizadas para encontrar a maior semelhança entre dois quadros (ou duas imagens). Entre elas, as utilizadas comumente incluem o erro médio quadrático (MSE), o erro absoluto médio (MAE), o erro absoluto mínimo ou diferença absoluta mínima (MAD) e a soma dos erros absolutos ou soma das diferenças absolutas (SAE ou SAD).

A estimação de movimento utilizada na abordagem proposta está baseada no critério do erro absoluto mínimo (MAD – *Minimum Absolute Difference*) (BOVIK, 2000), onde os parâmetros estimados fornecem o movimento ao qual a imagem está sujeita. Através dos parâmetros estimados é possível fazer a compensação de movimento da imagem que está sob análise. Desta forma, as imagens podem ser alinhadas, ficando com suas estruturas sobrepostas para posteriormente serem comparadas na etapa de confronto (*matching*).

E.3 SÍNTESE DE ÍRIS

Um assunto que tem despertado interesse diz respeito à geração de íris sintéticas. Diversos fatores motivam as pesquisas nesta área, entre eles: a dificuldade para se capturar as imagens da íris (custo em termos de tempo e recursos), a necessidade de se realizar testes extensivos e a disponibilidade de poucos bancos de dados públicos. O desenvolvimento de algoritmos para geração de imagens de íris sintéticas possibilita a construção de bases de dados para testar o desempenho de algoritmos e simular situações em que as bases de dados compostas por imagens reais não contemplam, tais como, a quantidade de imagens disponíveis (número de indivíduos) e as simulações de distorções dos padrões e oclusões.

O uso de bancos de dados públicos compostos por imagens reais da íris, que geralmente possuem uma quantidade relativamente pequena de imagens (da ordem de algumas centenas ou milhares), apresenta algumas desvantagens: os algoritmos normalmente não são testados exaustivamente devido ao número reduzido de imagens disponíveis, os algoritmos acabam se tornando dependentes do banco de dados e perdem a habilidade de generalização, além do fato que a construção de grandes bancos de dados não custa apenas tempo e esforço, mas também introduz um assunto controverso que envolve a questão da privacidade.

Em contrapartida, o uso de bancos de dados sintetizados em biometria apresenta por sua vez diversas vantagens, entre elas: o desenvolvimento de modelos paramétricos que permitem testar o sistema biométrico sob diversas condições, a atenuação das preocupações com a privacidade tipicamente associadas com o dado biométrico real, a eficiência (em relação ao custo e tempo) em construir um grande banco de dados representando uma diversidade de variações intraclasse, assim como, o desenvolvimento de procedimentos estatísticos para prever o desempenho em sistemas de reconhecimento em larga escala.

Para geração de íris sintéticas, algumas abordagens vêm sendo apresentadas. Cui e colaboradores (CUI *et al.*, 2004) apresentam um método baseado na análise de componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) e super-resolução. O método sintetiza um vetor de características globais com 75 dimensões, criado a partir de imagens de íris reais, para apenas oito dimensões e utiliza super resolução para reconstruir a imagem da íris. Essas oito dimensões devem ser alteradas para gerar novas imagens de íris.

Na abordagem proposta por Makthal e Ross (MAKTHAL & ROSS, 2005) um método baseado em campos aleatórios de Markov é apresentada. O algoritmo proposto é dividido em duas partes: a primeira seleciona regiões da íris (criptas, sulcos, etc) em uma ou mais imagens e determina pesos a cada uma delas; a seguinte executa um método iterativo que consulta as regiões, analisa a melhor delas e salva em uma nova imagem. O processo termina quando a imagem gerada se parecer com uma íris, sem ter ruídos visíveis (cerca de 10 iterações). A qualidade das imagens geradas é boa, mas requer intervenção humana na avaliação de cada iteração do método.

Zuo e Schmid (ZUO & SCHMID, 2006) apresentam um método baseado na anatomia da íris para gerar imagens sintéticas. O método gera fibras contínuas em coordenadas cilíndricas (Z, R, μ) em um ambiente 3D, onde Z é o tamanho da íris, R a distância medida radialmente e μ é o ângulo rotacional. Na sequência, é feita uma projeção das fibras em um espaço 2D, enquanto funções cosseno são utilizadas para adicionar o efeito do *collerette*. A esta imagem ainda são adicionados um efeito de borramento, um relevo e um filtro de erro Gaussiano. O modelo contém 40 parâmetros aleatórios e não biológicos capazes de gerar inúmeras íris diferentes.

Em relação a estes métodos apresentados, cabem algumas observações. Apesar de gerarem imagens convincentes, tais métodos refletem apenas a percepção de pessoas ou criam variações em cima de imagens reais. Para se ter dados mais consistentes é necessário gerar as imagens via parâmetros provenientes da biologia e da física como, por exemplo, estrutura das fibras, volume e densidade de pigmentação, índices de refração e, até mesmo, estrutura

celular. Os algoritmos não consideram uma possível alteração do tamanho da pupila, e em consequência a modificação do padrão da íris, após a imagem formada. Então, para se gerar íris sintéticas, que além do aspecto visual tenham relações com a anatomia e fisiologia das íris reais, deve se levar em conta a utilização de modelos que contemplem tanto a composição estrutural da íris como a sua deformação.